

УДК 574:539.163 + 591.1
© 2008

КИНЕТИКА ^{90}Sr В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭНДОГЕННЫХ ФАКТОРОВ ОРГАНИЗМА

В.И. Стариченко

Россия, г. Екатеринбург, Институт экологии растений и животных УрО РАН

На примере кинетики ^{90}Sr в скелете мышей линии СВА, различающихся возрастом и морфофизиологическими параметрами организма, предпринята попытка верификации прогностической способности концепции лимитирующих морфофизиологических факторов (ЛМФФ) [1], которая предложена для объяснения метаболизма остеотропных токсических веществ в скелете позвоночных. Согласно ей, за судьбу токсиканта отвечает система из 10 ЛМФФ обмена, через которые опосредуется влияние других эндо- и экзогенных воздействий. В работе проанализировано влияние на кинетику ^{90}Sr двух факторов – соотношение “поверхность – объем” костной ткани и “десорбционная способность” кости. Показана корреляция ($r = -0,9$; $p < 0,01$) удельной активности ^{90}Sr в однотипных по строению костях (бедренной и большеберцовой) и их массы, с которой линейно связан фактор “поверхность – объем”. Выявлена необходимость учета (даже у одновозрастных животных) степени минерализации костной ткани ($r = -0,7 - -0,8$; $p < 0,01$), обуславливающей фактор “десорбционная способность”, прежде учитываемый концепцией ЛМФФ только на видовом уровне. Результаты, полученные в работе, могут представлять интерес в патологии костной ткани и в радионуклидной диагностике заболеваний скелета, а также могут быть привлечены для объяснения известного в радиоэкологии феномена возрастной инверсии депонирования ^{90}Sr .

Проблема индивидуального прогнозирования кинетики промышленных поллютантов (в первую очередь остеотропных радионуклидов) приобретает все большее значение в связи с возрастающей угрозой техногенных аварий, когда из внешней среды токсические вещества поступают в организм больших групп населения и сельскохозяйственных животных. В частности, в Уральском регионе в результате деятельности ПО “Маяк” и аварии, произошедшей на нем в 1957 г., одним из основных дозообразующих радионуклидов является ^{90}Sr , который кумулируется в костной ткани и, наряду с внешним γ -облучением, обуславливает многолетнее облучение населения и обитающих здесь животных. Эффект его действия зависит от радиочувствительности индивида и кинетики радионуклида (уровня депонирования, локализации, времени пребывания в организме).

При этом известно, что метаболизм остеотропных токсических веществ в скелете позвоноч-

ных животных и человека подвержен влиянию многих эндо- и экзогенных факторов. Однако многочисленные попытки их исследования ограничивались одним или несколькими факторами и не подвергали анализу все остальные [2–4]. Более того, нам не известны попытки выделения и систематизации всех эндогенных факторов, обуславливающих метаболизм остеотропных токсикантов, за исключением работы [1]. Для объяснения судьбы остеотропного вещества в целостном организме автором была предложена концепция лимитирующих морфофизиологических факторов (ЛМФФ). К ЛМФФ относятся морфологические структуры, физиологические процессы и физико-химические реакции, вовлекаемые в обмен остеотропных веществ в скелетных тканях. Через систему из 10 ЛМФФ опосредуется влияние других процессов жизнедеятельности и внешней среды (вида, пола, возраста, физиологического состояния, экзогенных воздействий) [1, 5, 6]. Степень опосредования

может быть весьма сложной и проявляется через действие на морфофизиологические факторы регуляторных систем организма и различных видов обмена веществ и энергии.

Ранее нами было показано, что индивидуальные особенности депонирования остеотропного радионуклида удовлетворительно объясняются различиями параметров ЛМФФ у отдельных особей [7, 8]. Однако прогностическая способность концепции ЛМФФ разработана недостаточно и ограничивается в настоящее время лишь качественным уровнем, так как оценить вклад каждого фактора в кинетику радионуклида в целостном организме крайне сложно. Уменьшить количество варьирующих ЛМФФ позволяет аппроксимация индивидуальных характеристик групповыми показателями однородной выборки инбредных животных (например, линейных мышей). При этом значительных различий количественных характеристик ЛМФФ можно добиться при использовании модифицированных условий развития животных, например, под влиянием различных гормонов или диет. Возрастные особенности депонирования остеотропных веществ давно известны, однако количественная взаимосвязь кинетических и морфофизиологических характеристик скелета не исследована.

Цель данной работы – верификация прогностической способности концепции ЛМФФ на примере кинетики ^{90}Sr у линейных мышей разного возраста и физиологического состояния, характеризующихся морфофизиологическими особенностями скелета. Углубленный анализ эндогенных факторов, определяющих кинетику остеотропных ксенобиотиков и радионуклидов в скелете позвоночных животных и человека, позволит приблизиться к выяснению механизмов возникновения индивидуальных особенностей их обмена, прогнозу и ретроспекции динамики остеотропных веществ, которая является определяющей при оценке поглощенной дозы излучения от инкорпорированных радионуклидов, а также будет способствовать дальнейшему изучению нормальной и патологической физиологии кальцифицированных тканей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Работа проведена на потомстве лаборатор-

ных мышей линии СВА. С момента родов самки были разделены на две группы. В контрольной группе животных содержали на обычном виварном рационе, в опытной – на овсяной монодиете (в течение всего периода молочного вскармливания детенышей и до конца эксперимента). Во избежание дефицита кальция и витаминов в рацион всех животных включали минеральную подкормку кусковым мелом и свежую зелень.

Для исследования динамики изменения кинетических и морфофизиологических характеристик скелета использовали две возрастные группы половозрелого потомства. Когда детенышам исполнилось 8 недель, части из них от контрольных и опытных самок был введен ^{90}Sr . Оставшихся детенышей содержали на прежних рационах до достижения ими возраста 12 недель, после чего им тоже был введен ^{90}Sr . Радионуклид вводили однократно внутривентриально, по 3,2 кБк на животное. Через 3 недели после введения ^{90}Sr производили эфирную эвтаназию животных. Возраст на момент умерщвления – 2,5 мес (I возраст) и 3,5 мес (II возраст). Всего сформировано 4 экспериментальные группы: контрольная и опытная I-го и II-го возрастов, соответственно. Исследовано 434 животных.

Для радиометрии использовали предварительно взвешенные бедренные и большеберцовые кости, которые озоляли в муфельной печи при $t=600\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 5 ч. Зола взвешивали. Находили коэффициент озоления (отношение массы золы к массе сырой кости), по которому судили о минеральной плотности костей. После этого концентрированной азотной кислотой проводили “мокрое” озоление костных образцов. Радиометрию осуществляли на счетчике “RFT 10 MHz-Zähler VAG-120”. Для расчета удельной активности образцов (Бк/г сырой кости) градуировку прибора выполняли по серии калийных эталонов [9]. Для этого использовали химически чистый KCl. Соль предварительно прокаливали при $t = 120\text{--}130\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 2 ч, затем растирали в фарфоровой ступке и готовили серию проб (от 50 до 500 мг). После их радиометрии строили кривую самопоглощения. Ошибка метода не превышает 7–10 %.

Выбор метода статистического анализа данных осуществляли после проверки характера их распределения. Для описания данных использовали среднее значение и стандартную

ошибку среднего. Значимость различий между выборками оценивали с помощью t-критерия Стьюдента и F-критерия. Для анализа меры зависимости между изучаемыми показателями проводили регрессионный и корреляционный анализ. Статистический вывод осуществляли на 5 % уровне значимости.

Статистическая обработка данных выполнена с использованием программных пакетов "EXCEL" и "STATISTICA" (StatSoft Inc.).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее нами [10] были исследованы различные стрессорирующие воздействия на беременную самку, например, овсяная монодиета, инъекции паратиреоидного и адренокортикотропного гормонов, различные режимы охлаждения. Было показано, что диета, состоящая только из овса, является наиболее эффективным модификатором ростовых процессов и применение ее у линейных мышей приводит к резкому изменению массовых и метрических характеристик потомства. К тому же овсяная монодиета – наиболее простое в методическом отношении воздействие, что особенно важно при работе с большим количеством животных. При этом применение несбалансированной диеты у самок с момента родов максимально тормозит ростовые процессы в организме детенышей, в другие сроки постнатального развития она менее эффективна. Это может быть связано с недостатком в овсяной монодиете пластических веществ [11], необходимых для естественного развития детенышей, и практически полностью компенсируемым материнским организмом во время беременности, в значительно меньшей степени – во время лактации.

Использованная овсяная монодиета привела к значимому уменьшению массовых характеристик животных обеих опытных групп, по сравнению с соответствующим контролем (табл. 1, рис. 1). Например, уменьшение массы тела и массы бедренных костей: I-й возраст – $F(1;295)=868,4$ и $F(1;295)=729,5$, соответственно; II-й возраст – $F(1;131)=380,6$ и $F(1;131)=380,6$, соответственно. Значимы различия и при сравнении разновозрастных групп друг с другом: для контрольных групп $F(1;244)=344,2$ по массе тела и $F(1;244)=337,6$

по массе бедренных костей, для опытных – $F(1;182)=43,2$ и $F(1;182)=65,4$, соответственно. Для большеберцовых костей соотношение аналогично. Для всех массовых показателей различия между группами значимы ($p<0,01$).

Факт замедления ростовых процессов в организме при несбалансированном рационе хорошо известен и описан в литературе [12, 13]. Об изменении темпов роста скелета, несмотря на гармоничное развитие отдельных сегментов тела, свидетельствуют и различия величины индексов бедренных и большеберцовых костей (отношение массы соответствующих костей в мг к массе тела в г). В опытных группах индекс бедренных костей в среднем равен 6,2, большеберцовых – 5,2, в контроле – 5,6 и 4,5, соответственно. При этом в опытных группах изменились не только размерно-массовые показатели животных, но и физиологический (вероятнее всего и гормональный) статус организма. В пользу этого свидетельствуют случаи спаривания контрольных животных уже в возрасте 1,5–2 месяцев, у животных, содержащихся на овсяной монодиете, на протяжении всего эксперимента такого зарегистрировано не было. Более того, опытные животные после отсадки самки (в месячном возрасте потомства) иногда были не готовы к переходу на самостоятельное питание и погибали от истощения.

В таблице приведены также данные радиометрии. Половые различия в накоплении радионуклида значимы не во всех группах и не всегда совпадают с проявлением полового диморфизма массовых показателей. Это соответствует давно утвердившемуся в радиобиологии мнению об относительно небольшом вкладе половых особенностей в накопление большинства остеотропных радионуклидов [обзор 10, 14]. Некоторыми авторами половые различия в накоплении ^{90}Sr обнаружены в период размножения и лактации в связи с изменениями в минеральном обмене самок [15, 16].

Известно, что с увеличением возраста величина отложения остеотропного радионуклида в скелете уменьшается [14, 16–21]. Полученные нами результаты (табл. 1, рис. 1) совпадают с литературными данными, например, в бедренных костях удельная активность ^{90}Sr составляет в разновозрастном контроле 935 ± 17 и 643 ± 10 Бк/г, в опыте – 1606 ± 24 и 1266 ± 45 Бк/г, соот-

Таблица 1

Массовые характеристики и параметры депонирования ^{90}Sr в костной ткани экспериментальных животных (M \pm m)

Возраст на момент эвтаназии ¹⁾	Группа	Пол	n	Масса, г			^{90}Sr , Бк/г сырой кости		^{90}Sr , Бк	
				Тело	Бедренная ²⁾	Б/берцовая ²⁾	Бедренная	Б/берцовая	Бедренная ²⁾	Б/берцовая ²⁾
I	1	Самцы	94	18,8 \pm 0,1*	0,1031 \pm 0,001*	0,0842 \pm 0,001*	891 \pm 22*	757 \pm 19*	91 \pm 2	63 \pm 1
		Самки	72	16,0 \pm 0,1	0,0969 \pm 0,001	0,0759 \pm 0,001	992 \pm 26	829 \pm 22	95 \pm 2	62 \pm 1
	Среднее	166	17,6 \pm 0,2	0,1004 \pm 0,001	0,0806 \pm 0,001	935 \pm 17	788 \pm 14	93 \pm 1	63 \pm 1	
	2	Самцы	62	11,8 \pm 0,3	0,0733 \pm 0,001	0,0587 \pm 0,001	1638 \pm 35	1579 \pm 40*	118 \pm 2*	90 \pm 1*
		Самки	71	11,6 \pm 0,2	0,0722 \pm 0,001	0,0605 \pm 0,001	1579 \pm 32	1465 \pm 33	112 \pm 1	87 \pm 1
	Среднее	133	11,7 \pm 0,2	0,0727 \pm 0,001	0,0597 \pm 0,001	1606 \pm 24	1518 \pm 26	115 \pm 1	88 \pm 1	
II	3	Самцы	51	22,8 \pm 0,3*	0,1206 \pm 0,001	0,0979 \pm 0,001*	606 \pm 9*	574 \pm 10*	73 \pm 1*	56 \pm 1
		Самки	31	19,8 \pm 0,2	0,1178 \pm 0,001	0,0918 \pm 0,001	704 \pm 15	643 \pm 19	83 \pm 1	59 \pm 2
	Среднее	82	21,7 \pm 0,3	0,1196 \pm 0,001	0,0956 \pm 0,001	643 \pm 10	600 \pm 10	77 \pm 1	57 \pm 1	
	4	Самцы	19	15,0 \pm 0,4*	0,0894 \pm 0,002	0,0758 \pm 0,002	1169 \pm 69	1106 \pm 59	102 \pm 4	83 \pm 3
		Самки	34	13,0 \pm 0,4	0,0837 \pm 0,002	0,0696 \pm 0,002	1320 \pm 57	1235 \pm 56	108 \pm 3	84 \pm 3
	Среднее	53	13,7 \pm 0,3	0,0858 \pm 0,002	0,0719 \pm 0,001	1266 \pm 45	1189 \pm 42	106 \pm 3	83 \pm 2	

Примечание:

Группы: 1, 3 – контроль; 2, 4 – опыт.

1) Объяснения в тексте.

2) Обе кости.

* Различия между самцами и самками значимы на уровне $p < 0,05$ (по t-критерию Стьюдента).

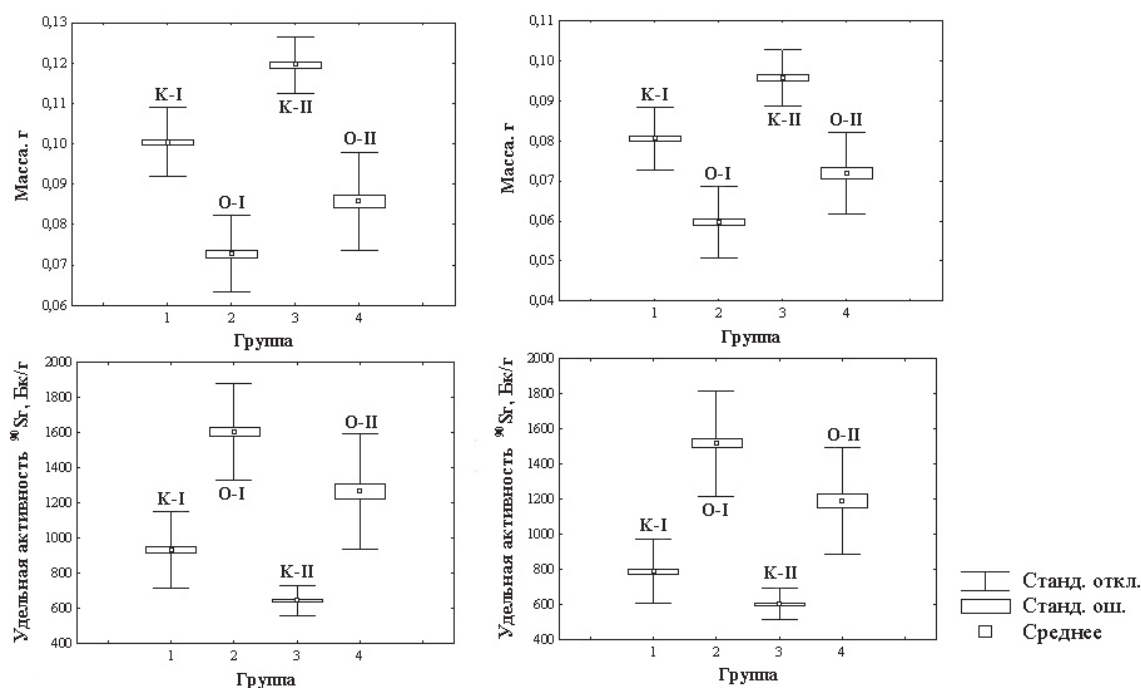


Рис. 1. Масса и удельная активность ^{90}Sr в бедренных (слева) и в большеберцовых (справа) костях животных экспериментальных групп (1, 3 – контроль; 2, 4 – опыт, I и II-го возрастов, соответственно)

ответственно; содержание ^{90}Sr : 93 ± 1 и 77 ± 1 Бк – в контрольных, 115 ± 1 и 106 ± 3 Бк – в опытных группах, соответственно. Различия между всеми группами значимы ($p \leq 0,01$) как для бедренных, так и для большеберцовых костей.

Отмечено, что удельная активность ^{90}Sr в бедренной кости больше, чем в большеберцовой. Эта же закономерность имеет место для других остеотропных веществ как в лабораторном эксперименте при однократном (^{91}Y) и хроническом (стабильный фтор) поступлении, так и в природной среде при обитании животных в течение длительного времени на территориях, загрязненных радионуклидами, например, в зоне Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС) (собственные неопубликованные данные). Полученные результаты подтверждают данные других авторов, свидетельствующие о существовании особенностей депонирования остеотропных радионуклидов не только на уровне целостного организма и скелета, но и о различиях их аккумуляции в гомологичных

участках скелета, в различных костях, а также в пределах одной и той же кости [22, 23].

Попытаемся объяснить неравномерность депонирования ^{90}Sr в разных костях и возрастные особенности аккумуляции с позиций концепции ЛМФФ. При этом различия между бедренной и большеберцовой костями внутри одной группы будем считать локальным уровнем, допуская, что для однотипных по строению и топографии костей различия всех остальных ЛМФФ относительно невелики. Различия между аналогичными костями разных групп будем рассматривать как организменный уровень аккумуляции.

Согласно концепции ЛМФФ, одним из факторов выведения остеотропных веществ из кости является соотношение “поверхность – объем” (удельная поверхность): чем оно больше, тем интенсивнее идет процесс элиминации. Нами показано [24, 25], что в длинных трубчатых костях удельная поверхность отрицательно коррелирует с их массой, что позволяет по массе оценивать соотношение “поверхность

– объем”. Поэтому при сравнении пары костей (например, бедренная – большеберцовая) можно предполагать, что меньшая из них будет обладать большей скоростью выведения радионуклида. Действительно, как следует из таблицы, бедренные кости внутри отдельных групп на 20–25 % тяжелее большеберцовых и удельная активность ^{90}Sr в них в среднем на 9,6 % выше. Корреляция удельной активности ^{90}Sr и массы составляет $-0,90$ ($p < 0,01$) для бедренных и $-0,88$ ($p < 0,01$) – для большеберцовых костей. Столь высокий уровень корреляции свидетельствует о связи кинетики радионуклида с фактором “поверхность – объем”, опосредованно проявляющимся через массу кости.

На протяжении всего эксперимента животные, содержащиеся на овсяной монофагии, были гораздо мельче контрольных (без явно выраженных диспропорций в размерах тела), поэтому, следуя логике предыдущих рассуждений, можно было бы ожидать, что удельная активность радионуклида в их костях будет ниже, чем в контроле. Полученные результаты, на первый взгляд, противоречат этому утверждению. Однако костные поверхности, кроме количественного параметра “площадь”, характеризуются еще качественно – степенью минерализации. Оценкой минерализации кости (соотношение минерального и органического компонентов) можно считать коэффициент озоления, так как масса минеральных веществ в кости и общая масса костной ткани уменьшаются пропорционально [26]. При этом недобызвествленная кость дает меньше зольного остатка, чем полностью минерализованная. Количество минерализованной костной ткани увеличивается с возрастом [26–28].

Коэффициент озоления бедренных костей для животных I-го контроля равен $0,30 \pm 0,001$, для опыта – $0,23 \pm 0,002$; для животных II-го возраста – $0,33 \pm 0,002$ и $0,25 \pm 0,004$, соответственно, что свидетельствует о наличии в костях опытных животных меньшего количества минерального вещества. Следовательно, полностью минерализованной кости в скелете животных опытных групп приблизительно на 20–25 % меньше, чем у контрольных ($p < 0,01$). По прошествии месяца (временной разрыв между I и II возрастом) минерализация костной ткани у всех животных увеличивается, однако различия меж-

ду контролем и опытом остаются на прежнем уровне. Интерес представляет сравнение II-ой опытной группы с I-м контролем. Видно, что опытные животные в возрасте 3,5 месяцев по всем изученным показателям еще не достигли уровня 2,5-месячных контрольных животных. Например, масса тела – $13,7 \pm 0,3$ и $17,6 \pm 0,2$ г; масса бедренной кости – $0,0858 \pm 0,002$ и $0,1004 \pm 0,001$ г; удельная активность ^{90}Sr в бедренной кости 1266 ± 45 и 935 ± 17 Бк/г; коэффициент озоления – $0,25 \pm 0,004$ и $0,30 \pm 0,001$, соответственно. Полученные результаты свидетельствуют о несоответствии физиологического и хронологического возраста костной ткани у животных опытных групп, то есть диета, состоящая в течение длительного времени из овса, замедляет не только темп роста тела, но и дифференциацию морфологических структур скелета. Факт различий физиологического и календарного возрастов при содержании животных в разных условиях или на разных диетах известен из литературы и свидетельствует о необходимости учета в физиологических исследованиях всех экзогенных факторов.

Через степень минерализации костной ткани опосредуется проявление еще одного ЛМФФ – “десорбционная способность” кости. Известно, что сорбционные свойства молодой и полностью сформировавшейся костной ткани близки, однако десорбционная способность не полностью минерализованной кости гораздо ниже, вследствие чего она сильнее удерживает депонированные на ее поверхности радионуклиды [1, 24, 27, 29]. Радиометрические данные подтверждают это положение: у опытных животных удельная активность ^{90}Sr больше, чем у контрольных. Корреляция удельной активности ^{90}Sr и коэффициента озоления для бедренных костей составляет $-0,77$ ($p < 0,01$), для большеберцовых – $-0,74$ ($p < 0,01$). На начальной стадии разработки концепция ЛМФФ принимала во внимание лишь видовые особенности десорбционной способности костных поверхностей. Однако полученные результаты свидетельствуют о необходимости дополнения концепции ЛМФФ положением об учете десорбционной способности при анализе кинетики остеотропного вещества даже у одновозрастных индивидов.

К сожалению, в работе не проведена оценка влияния на кинетику ^{90}Sr таких ЛМФФ как ско-

рость роста и интенсивность резорбции костной ткани. В тоже время на крысах линии Вистар нами было выявлено [10, 30] снижение скорости периостального костеобразования на уровне середины диафиза бедренной кости с $8,5 \pm 0,5$ до $2,3 \pm 0,3$ мкм сут⁻¹ в течение первых 4-х месяцев жизни и уменьшение аппозиционного роста кости на фоне инъекций паратиреоидного гормона. В связи с этим представляет интерес изучение обусловленности костного метаболизма интенсивностью аппозиционного роста и костной перестройки в нормальных и модифицированных условиях развития скелета, в том числе после отмены модифицирующего воздействия.

Существенный интерес представляют данные по выведению ⁹⁰Sr из всего скелета. Аппроксимация метаболизма в целостном скелете результатами кинетики в его небольших участках позволяет изучать сравнительный аспект скорости выведения излучателя.

В остеологии и радиобиологии принято считать, что бедренная кость репрезентативно отражает минеральный состав и метаболические характеристики целостного скелета и по массе составляет приблизительно 1/20 его часть [14, 31–34]. Поэтому на основании содержания ⁹⁰Sr в бедренных костях можно оценить изменение задержки радионуклида во всем скелете экспериментальных животных (рис. 2). Количество ⁹⁰Sr в скелете через 3 недели составляет для контрольных групп $29,1 \pm 0,5$ и $23,9 \pm 0,3$ % от введенного количества, для опытных – $35,9 \pm 0,3$ и $33,0 \pm 0,8$ % от введенного количества, соответственно. Интенсивность выведения радионуклида из организма интактных животных контрольных групп близка к полученной нами ранее на других линиях мышей и мелких млекопитающих из природной среды. Например, после однократного внутрибрюшинного введения ⁹⁰Sr нескольким линиям лабораторных мышей через 25 сут в их скелете осталось 20–23 % от введенного количества [35], в скелете серых полевок, отловленных на территории ВУРСа, после трехнедельного содержания на чистых кормах в условиях вивария фиксировали 24–27 % от первоначального уровня ⁹⁰Sr [9].

Таким образом, в работе на мышах линии СВА показано, что возрастные и физиологические особенности депонирования ⁹⁰Sr могут быть интерпретированы через параметры таких

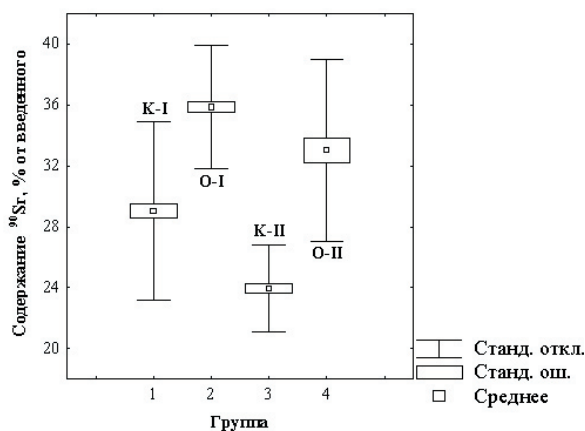


Рис. 2. Содержание ⁹⁰Sr в скелете животных экспериментальных групп (расчетные данные) (обозначения, что и на рис. 1)

ЛМФФ, как соотношение “поверхность – объем” (удельная поверхность) костной ткани и ее “десорбционная способность”. Например, на локальном уровне (отдельные кости) кинетика ⁹⁰Sr коррелирует ($r = -0,9$; $p < 0,01$) с удельной поверхностью, оцениваемой по массе кости, то есть чем больше удельная поверхность кости, тем меньше удельная активность ⁹⁰Sr. Однако на уровне целостного организма на конечный результат аккумуляции ⁹⁰Sr более значимо влияет “качество” поверхностей (степень кальцификации): чем сильнее они недообызвествлены, тем меньше скорость десорбции радионуклида и величина его накопления выше ($r = -0,7 - -0,8$; $p < 0,01$). Выявление значимости “качества” костных поверхностей для отдельного индивида является дополнением концепции ЛМФФ.

Полученные в работе результаты могут представлять интерес в патологии костной ткани и при интерпретации результатов радионуклидной диагностики заболеваний скелета, а также могут быть привлечены к объяснению известного в радиоэкологии феномена возрастной инверсии депонирования ⁹⁰Sr. В природных условиях на территориях загрязненных радионуклидами (например, ВУРС) в скелете некоторых молодых особей фиксируется большая, по сравнению со старыми животными, удельная активность ⁹⁰Sr [36, 37]. В лабораторном эксперименте при хроническом поступлении ра-

дионуклида, начатом в раннем постнатальном онтогенезе, выявлена прямо противоположная закономерность: у взрослых особей удельная активность радионуклида больше, чем у молодых. То есть в природе наблюдаются случаи нарушения возрастной закономерности аккумуляции остеотропных веществ. Поскольку механизм их депонирования в скелете позвоночных, независимо от пути и ритма поступления, одинаков, и, учитывая, что у некоторых молодых индивидов в природе физиологический возраст костной ткани значительно моложе хронологического, то есть кость по ряду причин недообызвествлена, факт более интенсивного кумулирования ^{90}Sr в скелете этих животных можно удовлетворительно объяснить полученными нами результатами. Это предположение проверено на обыкновенной слепушонке (*Ellobius talpinus* Pallas, 1970), обитающей в головной части ВУРСа [30]. Анализ показал значимую корреляцию между степенью минерализации костной ткани и уровнем аккумуляции в ней ^{90}Sr . Представленные данные могут служить также для верификации относительного возраста мелких млекопитающих из природных популяций, оцененного по другим критериям.

Автор выражает благодарность д.б.н. Н.М. Любашевскому за помощь в проведении эксперимента и обсуждении полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Любашевский Н.М. Метаболизм радиоизотопов в скелете позвоночных. – М.: Наука, 1980. – 255 с.
2. V.J. Stover. Metabolism of radioactive isotopes which deposit mainly in the skeleton // *Health Phys.* – 1959. – Vol. 1. – No. 4. – P. 373–378.
3. Москалев Ю.И. О влиянии возраста и перерезки седалищного нерва на распределение цезия-137 и стронция-89, 90 // Распределение, биологическое действие и миграция радиоактивных изотопов. – М., 1961. – С. 105–117.
4. ICRP, Publication 20. Alkaline earth metabolism in adult man. – Oxford: Pergamon Press, 1973. – 92 p.
5. Любашевский Н.М., Попов Б.В., Стариченко В.И. Математическая модель влияния морфофизиологических факторов обмена на метаболизм радионуклидов в скелете позвоночных // Математическое моделирование в медицине и биологии: Матер. науч.-практ. конф. – Свердловск, 1981. – С. 24–26.
6. Любашевский Н.М., Попов Б.В., Мокронос А.А. и др. Биологические основы межвидовых экстраполяций параметров скелетного метаболизма // Пограничные проблемы экологии. – Свердловск, 1986. – С. 84–102.
7. Стариченко В.И. Экспериментальная оценка параметров морфофизиологических факторов обмена техногенных элементов в скелете позвоночных // Техногенные элементы и животный организм (полевые наблюдения и эксперимент). – Свердловск, 1986. – С. 89–108.
8. Любашевский Н.М., Попов Б.В., Стариченко В.И., Мокронос А.А. Лимитирующие морфофизиологические факторы в межвидовой и межвозрастной экстраполяции и в индивидуальном прогнозировании обмена остеотропных радионуклидов // Радиобиологический эксперимент и человек. – М.: МЗ СССР, 1986. – С. 10–19.
9. 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. Радиэкология. – 1998. – Т. 38, вып. 3. – С. 375–383.
10. Стариченко В.И., Любашевский Н.М., Попов Б.В. Индивидуальная изменчивость метаболизма остеотропных токсических веществ. – Екатеринбург: Наука, 1993. – 168 с.
11. Петрухин И.В., Петрухин Н.И. Кормление домашних и декоративных животных: справ. кн. – М.: Нива России, 1992. – 336 с.
12. Пархон К.И. Возрастная биология. Клинические и экспериментальные исследования. – Бухарест: Изд-во литературы на иностранных языках, 1959. – 467 с.
13. Касавина Б.С., Торбенко В.П. Жизнь костной ткани. – М.: Наука, 1979. – 176 с.
14. Шведов В.Л., Аклев А.В. Радиобиология стронция-90. – Челябинск: УНПЦ РМ, 2001. – 298 с.
15. Ильенко А.И., Крапивко Т.П. Экология животных в радиационном биогеоценозе. – М.: Наука, 1989. – 224 с.

16. Вредные химические вещества. Радиоактивные вещества: Справ. изд. / Баженов В.А., Булдаков Л.А., Василенко И.Я. и др. – Л.: Химия, 1990. – 464 с.
17. Куликова В.Г. Влияние пола, возраста, кастрации, половых гормонов и адреналэкстемии на поведение цезия-137 и церия-144 в организме крыс // Обмен радиоизотопов в животном организме. – Свердловск, 1966. – С. 111–123.
18. Булдаков Л.А., Москалев Ю.И. Проблемы распределения и экспериментальной оценки допустимых уровней ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{106}Ru . – М.: Атомиздат, 1968. – 295 с.
19. Гольдман М., Делла Роза Р.Дж. Исследования динамики метаболизма стронция в зависимости от возраста при непрерывном поступлении радиоактивного изотопа с диетой // Метаболизм стронция. – М.: Атомиздат, 1971. – С. 175–191.
20. Журавлев В.Ф. Токсикология радиоактивных веществ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 336 с.
21. Калистратова В.С., Заликин Г.А., Нисимов П.Г. и др. Биокинетика радионуклидов как функция возраста экспериментальных животных // Радиационная биология. Радиозэкология. – 1996. – Т. 36, вып. 3. – С. 421–426.
22. T.J. Wronski, J.M. Smith, W.S.S. Jee. The microdistribution and retention of injected ^{239}Pu on trabecular bone surfaces of the beagle: implications for the induction of osteosarcoma // Radiat. Res. – 1980. – Vol. 83. – No. 1. – P. 74–89.
23. Москалев Ю.И., Заликин Г.А., Нисимов П.Г. Проблемы радиобиологии ^{238}Pu . – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 168 с.
24. Любашевский Н.М., Шарыгин Н.М., Степина В.И. Нативные поверхности и сорбционная способность зрелой и формирующейся костной ткани // Метаболизм радиоизотопов в животном организме. – Свердловск, 1974. – С. 12–18.
25. Стариченко В.И., Попов Б.В., Любашевский Н.М., Мокронос А.А. Морфофизиологические факторы при очаговом новообразовании кости и кинетика обмена остеотропных элементов в организме позвоночных // Техногенные элементы и животный организм (полевые наблюдения и эксперимент). – Свердловск, 1986. – С. 109–121.
26. Человек. Медико-биологические данные: Публикация № 23 МКРЗ / Пер. с англ. – М.: Медицина, 1977. – 496 с.
27. Ньюман У., Ньюман М. Минеральный обмен кости. – М.: Иностранная литература, 1961. – 270 с.
28. ICRP, Publication 70. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: the skeleton. – Oxford: Pergamon Press, 1995. – 81 p.
29. Книжников В.А., Марей А.Н. К метаболизму стронция у человека // Метаболизм стронция. – М.: Атомиздат, 1971. – С. 59–73.
30. Стариченко В.И. Индивидуальные особенности кинетики остеотропных веществ: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. – Челябинск, 2007. – 50 с.
31. Любашевский Н.М., Меньшикова Г.А., Уткина В.Ф. Соотношение составных частей скелета крыс и распределение в них стронция-85 и иттрия-91 // Метаболизм радиоизотопов в животном организме. – Свердловск, 1974. – С. 3–11.
32. Борисова В.В., Запольская Н.А., Павлицкая Е.Д. Экспериментальная проверка различных моделей на основе обмена в костной ткани ^{90}Sr и ^{137}Cs // Распределение и биологическое действие радиоактивных изотопов. – М.: Атомиздат, 1966. – С. 103–108.
33. Бесядовский Р.А., Иванов К.В., Козюра А.К. Справочное руководство для радиобиологов. – М.: Атомиздат, 1978. – 128 с.
34. A.N. Indritz, P.V.J. Hegarty. 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. – Vol. 131. – No. 2. – P. 317–320.
35. Стариченко В.И., Григоркина Е.Б. Индивидуальная изменчивость радиочувствительности и скелетного метаболизма радионуклидов // Очерки по экологической диагностике. – Свердловск, 1991. – С. 21–30.
36. Тарасов О.В. Радиозэкология наземных позвоночных головной части Восточно-Уральского радиоактивного следа: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Озерск, 2000. – 16 с.
37. Стариченко В.И. Накопление ^{90}Sr в костной ткани обыкновенной слепушонки, обитающей в головной части ВУРСа // Радиационная биология. Радиозэкология. – 2004. – Т. 44. – № 3. – С. 370–374.