

Влияние детализации трабекулярной структуры фантомов кости на оценку дозы облучения костного мозга от $^{89,90}\text{Sr}$

П.А. Шарагин¹, Е.А. Шишкина^{1,2}, Е.И. Толстых¹, М.О. Дёгтева¹

¹Уральский научно-практический центр радиационной медицины, Федеральное медико-биологическое агентство, Челябинск, Россия

²Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

В настоящее время существует 2 основных подхода к созданию вычислительных фантомов для костной дозиметрии. В рамках первого подхода микроархитектура заполняющей фантомы спонгиозы включает отдельно трабекулы и отдельно костный мозг, т.е. ткань-источник и ткань-детектор разделены. Второй подход заключается в моделировании костной ткани как гомогенной среды, в которой трабекулярная кость и костный мозг объединены. Результатами моделирования в обоих случаях являются коэффициенты конверсии, которые позволяют преобразовывать удельную активность инкорпорированных радионуклидов в поглощенную в костном мозге дозу. Моделирование скелета необходимо для дозиметрии облученного населения р. Теча от инкорпорированных $^{89,90}\text{Sr}$. С этой целью были созданы фантомы, включающие описание микроструктуры спонгиозы для людей разного пола и возраста. Для внутриутробной дозиметрии были разработаны фантомы плода и беременной женщины, которые предполагают моделирование кости как гомогенной среды. Использование двух принципиально разных подходов к костной дозиметрии для пре- и постнатального периода ставит вопрос об их совместимости. Цель: оценить влияние детализации трабекулярной структуры фантомов кости на оценку коэффициентов конверсии облучения костного мозга от $^{89,90}\text{Sr}$. В рамках данной работы были сгенерированы фантомы 8 участков скелета новорожденного, занятых спонгиозой. Для каждого участка скелета было сгенерировано по одному фантому с детальным описанием микроструктуры спонгиозы и по одному фантому, в котором трабекулярная кость смоделирована как гомогенная среда. Для всех фантомов была проведена имитация транспорта излучений от инкорпорированных в ткани — источнике $^{89,90}\text{Sr}$ с использованием программы MCNP 6.2 и рассчитаны значения коэффициентов конверсии. В результате было получено 16 коэффициентов конверсии для всех фантомов. Коэффициенты конверсии, полученные для фантомов с гомогенной спонгиозой, превышают таковые для фантомов с детальным описанием микроструктуры в среднем в 2,4 раза. Такие значительные различия между результатами моделирования позволяют сделать вывод, что детализация трабекулярной структуры фантомов кости оказывает существенное влияние на оценку дозы облучения костного мозга от инкорпорированных $^{89,90}\text{Sr}$.

Ключевые слова: вычислительные фантомы, внутреннее облучение, красный костный мозг, стронций-90.

Введение

Одной из важных задач дозиметрических исследований, проводимых для облученного населения, проживающего на загрязненных территориях реки Течи (Челябинская область, Россия), является оценка доз облучения костного мозга, так как именно с дозой облучения костного мозга связано увеличение риска развития лейкозов у жителей прибрежных территорий, что было показано в эпидемиологических исследованиях [1, 2]. Загрязнение территории произошло в 1950-е гг., и основными источниками облучения костного мозга являются ^{89}Sr , ^{90}Sr , которые накапливаются в костной ткани. На реке Тече радиационному воздействию подверглись

люди всех возрастов, включая новорожденных детей. Кроме того, через организм матери изотопы стронция проникали через плаценту, накапливаясь в скелете плода, что приводило к внутриутробному облучению костного мозга. В этом контексте важной задачей является дозиметрическое моделирование скелета для расчета коэффициентов конверсии (K), позволяющих перейти от удельной активности $^{89,90}\text{Sr}$, инкорпорированных в минерализованной костной ткани к дозе в костном мозге. В настоящее время существует 2 основных подхода к описанию геометрии взаиморасположения тканей — источников и тканей — детекторов при моделировании костей скелета, на основе которых генерируются вычислительные фантомы.

Шарагин Павел Алексеевич

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

Адрес для переписки: 454076, Россия, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: sharagin@urcrm.ru

Первый подход основан на детальном описании костной микроархитектуры, включающей отдельно трабекулы (ткань-источник) и отдельно костный мозг (ткань-детектор). Совокупность трабекулярной кости и мягких тканей, находящихся в её полостях, называют термином «Спонгиоза» [3], который будет использоваться далее. Таким образом, первый подход включает детальное описание спонгиозы (ДС [DS]). Второй подход – генерирование фантома кости без учета микроструктуры спонгиозы, где кость – это гомогенная среда (ГС [HS]), в которой сплошная спонгиоза объединена с кортикальной костью, и эта единая среда является как источником, так и мишенью [4–7].

В рамках первого подхода существует несколько способов моделирования формы костей и их микроструктуры. Один из них основан на анализе изображений, полученных с использованием компьютерной микротомографии (микро-КТ) аутопсийного материала. Это метод парных изображений, в рамках которого данные микро-КТ спонгиозы вписываются в объем фантома, соответствующий форме кости, полученный с помощью компьютерной томографии (КТ) с более низким разрешением [8–11]. Другой метод использует КТ-изображения спонгиозы с фильтрацией шумов, имитируя случайную текстуру микроструктуры. Такие модели называются текстурированными [12]. Оба метода требуют наличия аутопсийного материала, вследствие чего являются дорогостоящими и трудоемкими, а параметры фантомов, полученных с использованием этих методов, основаны, как правило, на анализе ограниченного количества биоматериала. Это не гарантирует репрезентативности и не позволяет оценить неопределенности результатов моделирования, связанные с популяционной вариабельностью размеров костей и параметров микроархитектуры скелета. В качестве альтернативы был разработан оригинальный способ параметрического моделирования – SPSPD-моделирование (Stochastic Parametric Skeletal Dosimetry) [13, 14]. Генерируемые в рамках этого подхода фантомы представляют собой трехмерные воксельные модели простой геометрической формы (цилиндр, прямоугольный параллелепипед, эллипсоид и т.п.). В рамках SPSPD-моделирования (как в частном случае ДС-подхода) фантомы включают в себя трабекулярную кость, состоящую из трехмерной сети стержневидных костных трабекул, и костный мозг, расположенный между ними, а также имеют внешний слой кортикальной кости. Набор таких фантомов используется для моделирования целой кости. Литературные морфометрические данные используются в качестве параметров модели [15]. Для генерации вычислительных фантомов разработана компьютерная программа, позволяющая легко создавать наборы моделей с варьирующими параметрами микро- и макроархитектуры [16]. Именно этот вариант моделирования был использован для оценок K от $^{89,90}\text{Sr}$ для жителей прибрежных сел реки Течи разного пола и возраста: новорожденный, 1 год, 5 лет, 10 лет, 15 лет, взрослые [13], то есть для постнатального периода.

Второй подход, использующий приближение гомогенности костной ткани, много проще с точки зрения генерирования фантомов и чаще применяется в дозиметрии гамма- и нейтронного излучения [4, 5], но также применяется для дозиметрии $^{89,90}\text{Sr}$ [6, 7]. В частности, в Университете Флориды специально для оценки доз внутриутробного облучения от $^{89,90}\text{Sr}$ для жителей Уральского

региона были разработаны 8 моделей беременной женщины и плода на разных сроках (8, 12, 18, 22, 26, 30, 34 и 38 недель), в которых скелет описывался как гомогенная среда [6, 7]. Расчеты коэффициентов конверсии, полученные на основе этих фантомов, были использованы для предварительных оценок доз внутриутробного облучения. Однако возникает вопрос, насколько правомерно использовать ГС-подход при для костной дозиметрии и можно ли объединить названные подходы в одной дозиметрической системе для жителей прибрежных территорий реки Течи, которые подвергались как внутриутробному, так и постнатальному облучению.

Чтобы ответить на этот вопрос, в рамках настоящей работы проводится сравнение этих двух подходов с использованием уже имеющегося SPSPD-фантома новорожденного (как наиболее близкого к внутриутробному) и его абсолютного геометрического аналога, но с гомогенной спонгиозой.

Цель исследования – оценить влияние детализации трабекулярной структуры фантомов кости на оценку коэффициентов конверсии облучения костного мозга от $^{89,90}\text{Sr}$. Для этого были сопоставлены K , полученные для вычислительных фантомов, имитирующих участки костей с гомогенной (ГС) и негомогенной (SPSPD) спонгиозой, при одинаковых форме, массе и средней плотности фантомов.

Материалы и методы

В рамках данной работы были сгенерированы фантомы 8 участков скелета новорожденного, занятых спонгиозой.

Каждый фантом описывается простой геометрической формой (цилиндр, эллипсоид, прямоугольный параллелепипед и др.). Размеры этих геометрических тел соответствуют размерам участков кости новорожденных, занятых трабекулярными структурами (размер участка кости за вычетом кортикального слоя, если таковой имелся) [17, 18]. Размеры и параметры микроархитектуры участков костей получены на основе опубликованных данных. Так, например, параметры фантома тела грудного позвонка новорожденного получены на основе анализа данных литературы (4 публикации) [19–21]. Критерии отбора опубликованных данных, а также переход от размеров костей к параметрам фантома был подробно описан в предыдущих публикациях [17, 18]. Параметры каждого фантома включают линейные размеры и параметры трабекулярной микроструктуры: толщину трабекул ($Tb.Th$), размер межтрабекулярного пространства ($Tb.Sp$), долю костной ткани в общем объеме спонгиозы (BV/TV). Параметры фантомов, моделируемых в рамках данной работы, представлены в таблице 1.

Элементный состав сред, в которых осуществлялся транспорт излучений, представлен в таблице 2.

Плотность минерализованной кости (ρ_{bone}) новорожденного принималась равной $1,65 \text{ г/см}^3$ [24], а плотность костного мозга (ρ_{BM}) – 1 г/см^3 [25].

Для каждой из 8 геометрических форм (см. табл. 1) было сгенерировано 2 фантома одинаковой массы, где спонгиоза моделировалась с помощью SPSPD-подхода (SPSPD-фантом) и в приближении гомогенной спонгиозы (ГС-фантом). На рисунке продемонстрирована схема ге-

Параметры фантомов, имитирующих участки скелета новорожденного, занятые спонгиозой
The parameters of the phantoms, imitating spongiosa regions of newborn skeleton

Таблица 1

[Table 1]

Форма фантома: характеристика размеров [Shape of phantom, size characteristics]	Обозначение [Designation]	Линейные размеры, мм [Linear dimensions, mm]	Tb.Th, мм [mm]	Tb.Sp, мм [mm]	BV/ TV,%	Масса спонгиозы, г [Spongiosa mass, g]	Участок кости, занятый спонгиозой [Bone region occupied by spongiosa]
Прямоугольный параллелепипед: высота × длина × толщина [Rectangular parallelepiped: height × length × thickness]	П1 [P1]	2,0×30,0×30,0	0,29	0,57	53	2,42	Участок кости черепа [Region of skull bone]
	П2 [P2]	2,3×23,9×23,9	0,17	0,32	31	1,59	Участок подвздошной кости [Region of iliac bone]
	П3 [P3]	5,0×30,0×2,5	0,14	0,52	19	0,40	Участок ребра [Region of rib]
Прямой цилиндр с эллиптическим основанием: высота × Д1 × Д2 [Straight cylinder with elliptical base: height × D1 × D2]	Ц1 [C1]	7,1×17,5×11,3	0,17	0,32	31	1,41	Участок седалищной кости [Region of ischi- um bone]
	Ц2 [C2]	5,1×7,6×10,6	0,1	0,6	45	0,42	Тело грудного позвонка [Thoracic vertebra body]
	Ц3 [C3]	30,0×3,8×3,8	0,11	0,39	37	0,42	Участок диафиза бедренной кости [Region of femur diaphysis]
Деформированный цилиндр: высота × Д1 × Д2 × Д3 × Д4 [Deformed cylinder: height × D1 × D2 × D3 × D4]	ДЦ [DC]	18,9×25,4×10,6×6,2×6,2	0,11	0,39	37	2,66	Дистальная часть бедренной кости [Distal part of femur]
Эллипсоид: ось 1 × ось 2 [Ellipsoid: axis 1 × axis 2]	Э [E]	6,8×11,2	0,12	0,48	22	0,38	Таранная кость [Talus bone]

Д – диаметр.

Химический состав минерализованной костной ткани и костного мозга, используемый для моделирования [23]

Таблица 2

[Table 2]

The chemical composition of mineral bone and bone marrow, used for modelling [23]

Элемент [Element]	Массовая доля [Mass fraction], %		
	Костная ткань [Mineral bone]	Костный мозг [Bone marrow]	Гомогенная спонгиоза [Homogeneous spongiosa]
H	4,2	11,0	7,6
C	16,0	–	8,0
N	4,5	–	2,2
O	50,2	89,0	69,6
Mg	0,3	–	0,15
P	8,0	–	0,4
S	0,3	–	0,1
Ca	16,5	–	8,5

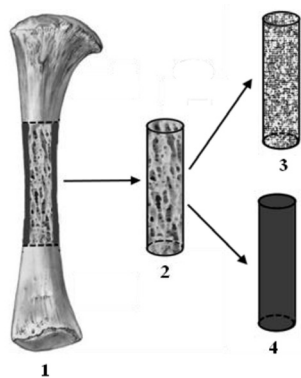


Рис. Схема моделирования участка бедренной кости новорожденного: 1 – бедренная кость; 2 – участок трубки (диафиза) кости, занятый спонгиозой, моделируется цилиндром; 3 – SPSPD-фантом с моделированием трабекул в виде стержней; 4 – ГС-фантом с гомогенной спонгиозой
[Fig. The scheme of modeling a section of the femur of a newborn: 1 – the femur; 2 – the section of the bone diaphysis occupied by the spongiosa is modeled by a cylinder; 3 – SPSPD-phantom with modeling of rod-like trabeculae; 4 – GS-phantom with homogeneous spongiosa]

нерирования фантомов на примере участка бедренной кости новорожденного.

SPSPD-моделирование проводили с использованием программы Trabecula [16]. В результате для каждого участка кости из таблицы 1 были сгенерированы трёхмерные воксельные фантомы [17, 26]. Параметры моделируемых фантомов представлены в таблице 1, химический состав костной ткани и костного мозга представлен в таблице 2. Размер вокселя выбирался как 50–75% размера наименьшей моделируемой структуры, т.е. толщины трабекулы ($Tb.Th$), и варьировал от 0,07 мм до 0,2 мм.

В рамках ГС-подхода фантомы описывались аналитическими поверхностями. Линейные размеры, масса и форма ГС-фантомов были взяты такими же, как для SPSPD фантомов (см. табл. 1). Внутри фантомы заполнены гомогенной спонгиозой, включающей трабекулярную кость и костный мозг, химический состав гомогенной спонгиозы представлен в таблице 2. Плотность гомогенной спонгиозы (ρ_{hs}) для ГС-фантомов рассчитывалась следующим образом:

$$\rho_{hs} = \frac{BV}{TV} * \rho_{bone} + (1 - \frac{BV}{TV}) \times \rho_{BM}, \quad (1)$$

где:

ρ_{bone} – плотность минерализованной костной ткани;

ρ_{BM} – плотность костного мозга.

Таким образом достигалось равенство масс фантомов при двух подходах к моделированию.

Расчет транспорта излучений проводился в приближении, что источник $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ (суммарный спектр) и ^{89}Sr (спектр) равномерно распределены в тканях-источниках:

1) костных трабекулах (для SPSPD-фантомов);

2) во всей гомогенной спонгиозе (для ГС-фантомов).

Тканью-детектором в первом случае является костный мозг, а во втором – вся гомогенная спонгиоза. Расчет поглощенных в ткани-детекторе энергии на единичный распад радионуклида в ткани-источнике проводился для каждого сегмента по-отдельности с использованием лицензионной программы MCNP 6.2, после чего произво-

дился расчет коэффициентов для конвертации удельной активности $^{89,90}\text{Sr}$ инкорпорированных в объеме ткани-источника в единицы мощности поглощенной дозы в красном костном мозге (ткани-детекторе), т.е. коэффициентов конверсии (K), $(\text{Гр с}^{-1})/(\text{Бк г}^{-1})$; K рассчитывались следующим образом:

$$K = \frac{E}{m_T} \times m_S, \quad (2)$$

где:

E – энергия, поглощенная в ткани-детекторе на единичный распад материнского радионуклида в ткани источнике;

m_T – масса ткани-детектора в фантоме;

m_S – масса ткани-источника в фантоме;

Для ГС-фантомов $m_T = m_S$.

Результаты и обсуждение

В рамках данной работы было сгенерировано 8 фантомов, имитирующих участки спонгиозы в составе костей новорожденного, в приближении гомогенной спонгиозы, и 8 фантомов, имитирующих микроархитектуру костной ткани. Для каждого фантома был проведен расчет K . Коэффициенты конверсии для SPSPD и ГС фантомов представлены в таблице 3.

Как видно из таблицы 3, коэффициенты конверсии, рассчитанные в приближении гомогенной спонгиозы, систематически выше таковых, рассчитанных с помощью SPSPD-подхода. Отношение K_{GS}/K_{SPSPD} варьирует в диапазоне 1,6–3,4 и в среднем составляет 2,4. Более высокие значения коэффициентов конверсии, рассчитанных в приближении гомогенной спонгиозы, ожидаемы и легко объяснимы. При использовании ГС-подхода ткань-источник и ткань-детектор совпадают, поэтому потеря энергии излучения $^{89,90}\text{Sr}$ происходит только за счет выхода электронов из объема фантома. При SPSPD-подходе часть энергии от инкорпорированных в трабекулах $^{89,90}\text{Sr}$ поглощается в них же (ткани-источнике), не формируя дозу в костном мозге. Очевидно, что SPSPD-подход дает более точные оценки K . Увеличение K более чем в 2 раза при ГС-подходе может привести к неоправданному завышению доз облучения красного костного мозга при равном эффекте облучения и, как следствие, – к недооценке радиационных рисков. Как следует из анализа таблицы 1, отношение K_{GS}/K_{SPSPD} зависит от параметра BV/TV : чем больше доля костной ткани в спонгиозе, тем более она гомогенна и тем меньше разница между 2 результатами моделирования. Основные факторы, влияющие на формирование дозы в красном костном мозге в моделях с детализированной микроструктурой, более подробно описаны в работах [27, 28].

Обобщая все вышесказанное, можно сказать, что детализация трабекулярной структуры фантомов кости оказывает существенное влияние на оценку дозы облучения костного мозга от инкорпорированных $^{89,90}\text{Sr}$, из чего следует, что использование существующих фантомов, базирующихся на ГС-подходе [6, 7] для оценок доз внутриутробного облучения жителей Уральского региона, при поступлении $^{89,90}\text{Sr}$ в организм беременной женщины приводят к их завышению. Поэтому в качестве продолжения нашей работы мы планируем создание дозиметрических фантомов скелета плода с использованием SPSPD-

Таблица 3

Сопоставление значений $K ((\text{Гр} \times \text{с}^{-1})/(\text{Бк} \times \text{г}^{-1}) \times 10^{10})$, полученных с помощью SPSPD- и ГС-подходов для всего набора фантомов

[Table 3]

Comparison of the values of $K ((\text{Gy} \times \text{s}^{-1})/(\text{Bq} \times \text{g}^{-1}) \times 10^{10})$, obtained using SPSPD and HS approaches for the whole set of phantoms

Фантом [Phantom]	$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$			^{89}Sr		
	K_{SPSPD}	$K_{\text{ГС}}$	$K_{\text{ГС}}/K_{\text{SPSPD}}$	K_{SPSPD}	$K_{\text{ГС}}$	$K_{\text{ГС}}/K_{\text{SPSPD}}$
П1 [P1]	0,62	1,02	1,64	0,39	0,61	1,58
П2 [P2]	0,46	1,23	2,65	0,28	0,72	2,54
П3 [P3]	0,24	0,82	3,43	0,15	0,41	2,71
Ц1 [C1]	0,56	1,32	2,37	0,33	0,76	2,32
Ц2 [C2]	0,67	1,03	1,55	0,40	0,63	1,55
Ц3 [C3]	0,53	1,41	2,67	0,33	0,79	2,40
ДЦ [DC]	0,70	1,72	2,45	0,40	0,91	2,26
Э [E]	0,37	1,01	2,77	0,22	0,62	2,80

моделирования. Это будет сделано, чтобы обеспечить единый подход к дозиметрии костного мозга и избежать переоценки доз в период внутриутробного облучения.

Заключение

Коэффициенты конверсии, рассчитанные в приближении гомогенной спонгиозы, превышают таковые, рассчитанные с учетом микроархитектуры кости, в 1,6–3,4 раза. Такие значительные различия между результатами моделирования позволяют сделать вывод, что детализация трабекулярной структуры фантомов кости оказывает существенное влияние на оценку дозы облучения костного мозга от инкорпорированных $^{89,90}\text{Sr}$.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Шарагин П.А. – написание статьи, дизайн исследований;

Шишкина Е.А. – разработка концепции, редактирование статьи;

Толстых Е.И. – редактирование статьи;

Дёгтева М.О. – разработка основной концепции, редактирование статьи.

Благодарности

Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за проделанную работу.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Финансирование работы осуществлялось в рамках федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года» НИОКР.

Литература

- Krestina L.Yu., Davis F.G., Schonfeld S., et al. Leukaemia incidence in the Techa River Cohort: 1953–2007 // *British Journal of Cancer*. 2013. Vol. 109. P. 2886–2893. DOI: 10.1038/bjc.2013.614. PubMed PMID: 24129230; PubMed Central PMCID: PMC3844904.
- Preston D.L., Sokolnikov M.E., Krestina L.Y., et al. Estimates of Radiation Effects on Cancer Risks in the Mayak Worker, Techa River and Atomic Bomb Survivor Studies // *Radiation Protection Dosimetry*. 2017. Vol. 173, No 1–3. P. 26–31. DOI: 10.1093/rpd/ncw316. PubMed PMID: 27885076.
- ICRP, 2009. Adult reference computational phantoms. ICRP Publication 110. Ann. ICRP 39(2).
- Cristy M., Eckerman K.F. Specific Absorbed Fractions of Energy at Various Ages from Internal Photon Sources. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory. 1987. ORNL/TM-8381. Vol. 1–6.
- Han E., Bolch W., Eckerman K. Revisions to the ORNL series of adult and pediatric computational phantoms for use with the MIRD schema // *Health Physics*. 2006. Vol. 90. No 4. P. 337–56.
- Maynard M.R., Shagina N.B., Tolstykh E.I., et al. Fetal organ dosimetry for the Techa River and Ozyorsk offspring cohorts, part 1: Urals-based series of fetal computational phantoms // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2015. Vol. 54, No 1. P. 37–46. DOI:10.1007/s00411-014-0571-4.
- Maynard M.R., Shagina N.B., Tolstykh E.I., et al. Fetal organ dosimetry for the Techa River and Ozyorsk Offspring Cohorts, part 2: radionuclide S values for fetal self-dose and maternal cross-dose // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2015. Vol. 54, No 1. P. 47–59. DOI:10.1007/s00411-014-0570-5.
- Hough M., Johnson P., Rajon D., et al. An image-based skeletal dosimetry model for the ICRP reference adult male—internal electron sources // *Physics in Medicine and Biology*. 2011. Vol. 56, No 8. P. 2309–46. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/56/8/001> PMID: 21427487.
- Bolch W.E., Eckerman K., Endo A., et al. ICRP Publication 143: Paediatric Reference Computational Phantoms // *Annals of the ICRP*. 2020. Vol. 49, No 1. P. 5–297. <https://doi.org/10.1177/0146645320915031> PMID: 33000625
- Pafundi D., Lee C., Watchman C., et al. An image-based skeletal tissue model for the ICRP reference newborn // *Physics in Medicine and Biology*. 2009. Vol. 54, No 14. P. 4497–531. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/54/14/009> PMID: 19556686.
- Shah A.P., Jokisch D.W., Rajon D.A., et al. Chord-based versus voxel-based methods of electron transport in the skeletal tissues // *Medical Physics*. 2005. Vol. 32, No 10. P. 3151–9. DOI: 10.1118/1.2040712. PubMed PMID: 16279069
- Abadi E., Segars W.P., Sturgeon G.M., et al. Modeling “Textured” Bones in Virtual Human Phantoms // *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*. 2019. Vol. 3, No 1. P. 47–53.

13. Degteva M.O., Tolstykh E.I., Shishkina E.A., et al. Stochastic Parametric Skeletal Dosimetry model for humans: General description // PLoS ONE. 2021. Vol. 16, No 10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257605>
14. Дёгтева М.О., Шишкина Е.А., Толстых Е.И., и др. Методологический подход к разработке дозиметрических моделей скелета человека для бета-излучающих радионуклидов // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2. С. 66-75. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2-66-75>.
15. Shishkina E.A., Zalyapin V.I., Timofeev Yu.S., et al. Parametric stochastic model of bone structures to be used in computational dosimetric phantoms of human skeleton // Radiation & Applications. 2018. Vol. 3, No 2. P. 133-137.
16. Shishkina E.A., Timofeev Y.S., Volchkova A.Yu., et al. Trabecula: A Random Generator of Computational Phantoms for Bone Marrow Dosimetry // Health Physics. 2020. Vol. 118, No 1. P. 53-9. DOI: 10.1097/hp.0000000000001127. PMID: 31764420.
17. Шарагин П.А., Толстых Е.И., Шишкина Е.А., и др. Дозиметрическое моделирование кости для остеотропных бета-излучающих радионуклидов: размерные параметры и сегментация. Материалы международной научной конференции «Современные проблемы радиобиологии». Беларусь, Гомель, 23-24 сентября 2021. С. 200-204.
18. Толстых Е.И., Шарагин П.А., Шарагин П.А., и др. Формирование доз облучения красного костного мозга человека от $^{89,90}\text{Sr}$, оценка параметров трабекулярной кости для дозиметрического моделирования. Материалы международной научной конференции «Современные проблемы радиобиологии». Беларусь, Гомель, 23-24 сентября 2021. С. 176-179.
19. Acquah F., Robson Brown K.A., Ahmed F. Early Trabecular Development in Human Vertebrae: Overproduction, Constructive Regression, and Refinement // Frontiers in Endocrinology. 2015. Vol. 6, No 67. DOI: 10.3389/fendo.2015.00067.
20. Kneissel M., Roschger P., Steiner W., et al. Cancellous Bone Structure in the Growing and Aging Lumbar Spine in a Historic Nubian Population // Calcified Tissue International. 1997. No 61. P. 95-100.
21. Ponrartana S., Aggabao P.C., Dharmavaram N.L., et al. Sexual Dimorphism in Newborn Vertebrae and its Potential Implications // The Journal of Pediatrics. 2015. No 167. P. 416-21.
22. Pafundi D. Image-based skeletal tissue and electron dosimetry models for the ICRP reference pediatric age series Biomedical Engineering. PhD Dissertation. University of Florida, 2009.
23. ICRP, 2002. Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values. ICRP Publication 89. Ann. ICRP 32(3-4).
24. Robinson R.A. Chemical analysis and electron microscopy of bone // Bone as a Tissue. In: Rodahl K., Nicholson J.T., Brown E.M., editor. Bone as a Tissue. New York: McGraw-Hill Book Company, 1960. P. 186-250.
25. Tissue Properties Database V4.0. URL: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/elements> (Дата обращения: 15.05.2018.)
26. Zalyapin V., Timofeev Yu., Shishkina E. A parametric stochastic model of bone geometry // Bulletin of the South Ural State University Ser Mathematical Modelling, Programming & Computer Software (Bulletin SUSU MMCS). 2018. Vol. 11. P. 44-57. DOI: 10.14529/mmp180204.
27. Volchkova A.Yu., Sharagin P.A., Shishkina E.A. Internal bone marrow dosimetry: the effect of the exposure due to ^{90}Sr incorporated in the adjacent bone segments // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software (Bulletin SUSU MMCS). (In press).
28. Шишкина Е.А., Шарагин П.А., Волчкова А.Ю. Аналитическое описание дозообразования в костном мозге от ^{90}Sr , инкорпорированного в кальцифицированных тканях // Вопросы радиационной безопасности. 2021. № 3. С. 72-82.

Поступила: 30.05.2022 г.

Шарагин Павел Алексеевич – младший научный сотрудник биофизической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 454076, Россия, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: sharagin@urcrm.ru

Шишкина Елена Анатольевна – доктор биологических наук, старший научный сотрудник биофизической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

Толстых Евгения Игоревна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник биофизической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

Дёгтева Марина Олеговна – кандидат технических наук, заведующая биофизической лабораторией Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

Для цитирования: Шарагин П.А., Шишкина Е.А., Толстых Е.И., Дёгтева М.О. Влияние детализации трабекулярной структуры фантомов кости на оценку дозы облучения костного мозга от $^{89,90}\text{Sr}$ // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 7-14. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-7-14

The effect of detailing the trabecular structure of bone phantoms on the assessment of the bone marrow dose from $^{89,90}\text{Sr}$

Pavel A. Sharagin¹, Elena A. Shishkina^{1,2}, Evgenia I. Tolstykh¹, Marina O. Degteva¹

¹Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency, Chelyabinsk, Russia

²Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

Today there exist two main approaches to developing computational phantoms for bone dosimetry. The first approach is based on a detailed description of the microarchitecture of the spongiosa filling the phantoms. This microarchitecture includes trabeculae and bone marrow separately, i.e., the source tissue and the detector tissue are separated. The second approach involves generating a homogeneous bone where the target and source tissues are combined. In both cases the simulation results are conversion factors that allow converting the specific activity of incorporated radionuclides into the absorbed dose in the bone marrow. For dosimetry of the Techa River population exposed due to incorporated $^{89,90}\text{Sr}$, the skeletal phantoms were created for people of different sex and age, starting with a newborn. These phantoms included a detailed description of the trabecular bone microstructure, i.e., they belong to the first approach. Also, phantoms of the skeleton of the fetus and pregnant woman at various gestation stages have been developed, which involves modeling the bone as a homogeneous medium. These phantoms are designed for dosimetry of external and internal exposure, including $^{89,90}\text{Sr}$ dosimetry. The usage of two fundamentally different approaches to bone dosimetry for the pre- and postnatal period raises the issue of compatibility of these approaches and possibility of their combining within a single dosimetric system. Objective: to evaluate the effect of detailing the trabecular structure of bone phantoms on the evaluation of conversion factors of bone marrow exposure due to $^{89,90}\text{Sr}$. Computational phantoms of eight regions of a newborn's skeleton filled in with trabecular bone were generated. For each bone region two phantoms were generated: one phantom with a detailed description of the spongiosa microstructure and one phantom with spongiosa modeled as a homogeneous media. For all phantoms, the radiation transport from $^{89,90}\text{Sr}$ incorporated in the source tissue was simulated using the MCNP 6.2 code, and the values of conversion factors were calculated. As a result, 16 conversion factors were obtained for all phantoms. On the average the conversion factors obtained for phantoms with homogeneous spongiosa exceed those for phantoms with a detailed description of the spongiosa microstructure by 2.4 times. Such significant difference between the results makes it possible to conclude that the detailing description of trabecular structure of bone phantoms has a significant impact on the assessment of the bone marrow dose due to incorporated $^{89,90}\text{Sr}$.

Key words: computational phantoms, internal exposure, red bone marrow, strontium-90.

Authors' personal contribution

Pavel A. Sharagin – article writing, research design;
Elena A. Shishkina – concept development, article editing;
Evgenia I. Tolstykh – article editing;
Marina O. Degteva – basic concept development, article editing.

Acknowledgment

The authors are grateful to anonymous reviewers for their work.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Financial support

The work was funded within the framework of the federal target program "Ensuring Nuclear and Radiation safety for 2016-2020 and for the period up to 2030" R&D.

References

1. Krestinina LYu, Davis FG, Schonfeld S, Preston DL, Degteva M, Epifanova S, et al. Leukaemia incidence in the Techa River Cohort: 1953–2007. *British Journal of Cancer*. 2013;109: 2886–2893. DOI: 10.1038/bjc.2013.614. PubMed PMID: 24129230; PubMed Central PMCID: PMC3844904.
2. Preston DL, Sokolnikov ME, Krestinina LYu, Stram DO. Estimates of Radiation Effects on Cancer Risks in the Mayak Worker, Techa River and Atomic Bomb Survivor Studies. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017;173(1-3): 26–31. DOI: 10.1093/rpd/ncw316. PubMed PMID: 27885076.
3. ICRP, 2009. Adult reference computational phantoms. ICRP Publication 110. Ann. ICRP 39(2).
4. Cristy M, Eckerman KF. Specific Absorbed Fractions of Energy at Various Ages from Internal Photon Sources. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory. 1987. ORNL/TM-8381. Vol. 1–6.
5. Han E, Bolch W, Eckerman K. Revisions to the ORNL series of adult and pediatric computational phantoms for use with the MIRD schema. *Health Physics*. 2006;90(4): 337–56.

Pavel A. Sharagin

Urals Research Center for Radiation Medicine

Address for correspondence: Vorovsky str., 68a, Chelyabinsk, 454076, Russia; E-mail: sharagin@urcrm.ru

6. Maynard MR, Shagina NB, Tolstykh EI, Degteva MO, Fell TP, Bolch WE. Fetal organ dosimetry for the Techa River and Ozyorsk offspring cohorts, part 1: Urals-based series of fetal computational phantoms. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2015;54(1): 37-46. DOI:10.1007/s00411-014-0571-4.
7. Maynard MR, Shagina NB, Tolstykh EI, Degteva MO, Fell TP, Bolch WE. Fetal organ dosimetry for the Techa River and Ozyorsk Offspring Cohorts, part 2: radionuclide S values for fetal self-dose and maternal cross-dose. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2015;54(1): 47-59. DOI:10.1007/s00411-014-0570-5.
8. Hough M, Johnson P, Rajon D, Jokisch D, Lee Ch, Bolch W. An image-based skeletal dosimetry model for the ICRP reference adult male—internal electron sources. *Physics in Medicine and Biology*. 2011;56(8): 2309–46. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/56/8/001> PMID: 21427487.
9. Bolch WE, Eckerman K, Endo A, Hunt JGS, Jokisch DW, Kim CH, et al. ICRP Publication 143: Paediatric Reference Computational Phantoms. *Annals of the ICRP*. 2020;49(1): 5–297. DOI: 10.1177/0146645320915031.
10. Pafundi D, Lee C, Watchman C, Bourke V, Aris J, Shagina N, et al. An image-based skeletal tissue model for the ICRP reference newborn. *Physics in Medicine and Biology*. 2009;54(14): 4497–531. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/54/14/009> PMID: 19556686.
11. Shah AP, Jokisch DW, Rajon DA, Watchman ChJ, Patton PhW, Bolch WE. Chord-based versus voxel-based methods of electron transport in the skeletal tissues. *Medical Physics*. 2005;32(10): 3151-9. DOI: 10.1118/1.2040712. PubMed PMID: 16279069.
12. Abadi E, Segars WP, Sturgeon GM, Harrawood B, Kapadia A, Samei E. Modeling “Textured” Bones in Virtual Human Phantoms. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*. 2019;3(1): 47–53.
13. Degteva MO, Tolstykh EI, Shishkina EA, Sharagin PA, Zalyapin VI, Volchkova AYU, et al. Stochastic Parametric Skeletal Dosimetry model for humans: General description. *PLoS ONE*. 2021;16(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257605>
14. Degteva MO, Shishkina EA, Tolstykh EI, Zalyapin VI, Sharagin PA, Smith MA, et al. Methodological approach to development of dosimetric models of the human skeleton for beta-emitting radionuclides. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2): 66-75. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2-66-75>.
15. Shishkina EA, Zalyapin VI, Timofeev YuS, Degteva MO. Parametric stochastic model of bone structures to be used in computational dosimetric phantoms of human skeleton. *Radiation & Applications*. 2018;3(2): 133-137.
16. Shishkina EA, Timofeev YS, Volchkova AYU, Sharagin PA, Zalyapin VI, Degteva MO, et al. Trabecula: A Random Generator of Computational Phantoms for Bone Marrow Dosimetry. *Health Physics*. 2020;118(1):53-59. DOI: 10.1097/HP.0000000000001127. PMID: 31764420.
17. Sharagin PA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Napie BA, Smit MA, Degteva MO. Dosimetric modeling of bone for bone-seeking beta-emitting radionuclides: size parameters and segmentation. Proceedings of the contemporary issues of radiobiology – 2021 International Scientific Conference. Belarus, Gomel; 2021. P. 200-204 (In Russian).
18. Tolstykh EI, Sharagin PA, Shishkina EA. Dosimetric modeling of red bone marrow exposure from $^{89,90}\text{Sr}$: resolving age-dependent trabecular bone parameters. Proceedings of the contemporary issues of radiobiology – 2021 International Scientific Conference. Belarus, Gomel; 2021. P. 176-179. (In Russian).
19. Acquaaah F, Robson Brown KA, Ahmed F, Jeffery N, Abel RL. Early Trabecular Development in Human Vertebrae: Overproduction, Constructive Regression, and Refinement. *Frontiers in Endocrinology*. 2015;6(67). DOI: 10.3389/fendo.2015.00067.
20. Kneissel M, Roschger P, Steiner W, Schamall D, Kalchauer G, Boyde A, et al. Cancellous Bone Structure in the Growing and Aging Lumbar Spine in a Historic Nubian Population. *Calcified Tissue International*. 1997;61: 95–100.
21. Ponrartana S, Aggabao PC, Dharmavaram NL, Fisher CL, Friedlich Ph, Devaskar ShU, et al. Sexual Dimorphism in Newborn Vertebrae and its Potential Implications. *The Journal of Pediatrics*. 2015;167: 416–21.
22. Pafundi D. Image-based skeletal tissue and electron dosimetry models for the ICRP reference pediatric age series Biomedical Engineering. PhD Dissertation. University of Florida. 2009.
23. ICRP, 2002. Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values. ICRP Publication 89. Ann. ICRP 32(3-4).
24. Robinson RA. Chemical analysis and electron microscopy of bone. In: Bone as a tissue. In: Rodahl K, Nicholson JT, Brown EM, editors. Bone as a Tissue. New York: McGraw-Hill Book Company; 1960: 186-250.
25. Tissue Properties Database V4.0. URL: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/elements> (Accessed 15.05.2018.)
26. Zalyapin V, Timofeev Yu, Shishkina E. A parametric stochastic model of bone geometry. *Bulletin of the South Ural State University Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software (Bulletin SUSU MMCS)*. 2018;11: 44-57. DOI: 10.14529/mmp180204.
27. Volchkova AYU, Sharagin PA, Shishkina EA. Internal bone marrow dosimetry: the effect of the exposure due to ^{90}Sr incorporated in the adjacent bone segments. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software (Bulletin SUSU MMCS)*. (In press).
28. Shishkina EA, Sharagin PA, Volchkova AYU. Analytical description of dose forming in bone marrow from ^{90}Sr incorporated in calcified tissues. *Voprosy radiacionnoj bezopasnosti = Issues of Radiation Safety*. 2021;3: 72-82 (In Russian).

Received: May 30, 2022

For correspondence: Pavel A. Sharagin – Junior Researcher of the Biophysics Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency (Vorovsky str., 68a, Chelyabinsk, 454076, Russia; E-mail: sharagin@urcrm.ru)

Elena A. Shishkina – Doctor of Biological Sciences, Senior Researcher of the Biophysics Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency, Chelyabinsk, Russia

Evgenia I. Tolstykh – Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher of the Biophysics Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency, Chelyabinsk, Russia

Marina O. Degteva – Candidate of Technical Sciences, Head, the Biophysics Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency, Chelyabinsk, Russia

For citation: Sharagin P.A., Shishkina E.A., Tolstykh E.I., Degteva M.O. The effect of detailing the trabecular structure of bone phantoms on the assessment of the bone marrow dose from $^{89,90}\text{Sr}$. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 4. P. 7-14. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-7-14