

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ФАНТОМ ДЛЯ ДОЗИМЕТРИИ КРАСНОГО КОСТНОГО МОЗГА НОВОРОЖДЕННОГО РЕБЕНКА ОТ ИНКОРПОРИРОВАННЫХ БЕТА-ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

П. А. Шарагин<sup>1</sup>✉, Е. А. Шишкина<sup>1,2</sup>, Е. И. Толстых<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уральский научно-практический центр радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

<sup>2</sup> Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

Внутреннее облучение красного костного мозга (ККМ), обусловленное техногенными остеотропными радионуклидами, может приводить к серьезным медицинским последствиям. Так, радиоактивное загрязнение реки Течи в 1950-е годы стало причиной облучения ККМ у жителей прибрежных территорий, что привело к возникновению хронического лучевого синдрома у некоторых из них, а также повысило риск развития лейкозов в когорте этих жителей. Основными источниками внутреннего облучения ККМ были остеотропные бета-излучатели <sup>89,90</sup>Sr. Усовершенствование дозиметрии внутреннего облучения ККМ является важным этапом уточнения рисков хронического радиационного воздействия для жителей прибрежных территорий. Для оценки поглощенной энергии в ККМ от инкорпорированного <sup>90</sup>Sr используют вычислительные фантомы, в которых можно имитировать транспорт излучений. Фантом — это репрезентативное цифровое представление геометрии костей скелета и ККМ. Целью работы было разработать вычислительный фантом скелета новорожденного ребенка для дозиметрии ККМ от инкорпорированного <sup>90</sup>Sr. Для моделирования скелета использовали оригинальную методику SPSPD (Stochastic parametric skeletal dosimetry): участки скелета с активным гемопоэзом моделировали как набор фантомов простой геометрической формы, описывающих отдельные участки костей скелета. Содержание ККМ в скелете, а также параметры фантомов оценивали на основе опубликованных результатов измерений реальных костей. В результате был сгенерирован вычислительный фантом основных участков скелета с активным гемопоэзом для новорожденного ребенка, включающий 34 фантома участков костей. Смоделированный фантом имитирует структуру костной ткани, а также вариабельность параметров скелета внутри популяции и хорошо соответствует измерениям реальных костей.

**Ключевые слова:** красный костный мозг, трабекулярная кость, кортикальная кость, дозиметрия костного мозга, вычислительные фантомы, <sup>90</sup>Sr

**Финансирование:** работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности» и при финансовой поддержке Федерального медико-биологического агентства России. Методологические подходы были разработаны при финансовой поддержке Федерального медико-биологического агентства России и Управления международных программ здравоохранения Министерства энергетики США в рамках совместного американо-российского проекта JCCRER 1.1.

**Вклад авторов:** все авторы внесли равнозначный вклад в разработку методики исследования, получение, анализ и интерпретацию данных, в написание и редактирование статьи.

✉ **Для корреспонденции:** Павел Алексеевич Шарагин  
ул. Воровского, д. 68-а, г. Челябинск, 454141, Россия; sharagin@urcm.ru

**Статья получена:** 10.11.2022 **Статья принята к печати:** 19.12.2022 **Опубликована онлайн:** 27.12.2022

**DOI:** 10.47183/mes.2022.045

## COMPUTATIONAL PHANTOM FOR RED BONE MARROW DOSIMETRY FROM INCORPORATED BETA EMITTERS IN A NEWBORN BABY

Sharagin PA<sup>1</sup>✉, Shishkina EA<sup>1,2</sup>, Tolstykh EI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Urals Research Center for Radiation Medicine of the Federal Medical-Biological Agency, Chelyabinsk, Russia

<sup>2</sup> Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

Active (red) bone marrow (AM) exposure due to ingested bone-seeking radionuclides can lead to grave medical consequences. For example, a radioactive contamination of the Techa River in the 1950s caused exposure to AM for riverside residents and led to chronic radioactive exposure syndrome in some of them, with higher risk of leukemia. The main sources of the marrow exposure were the bone-seeking beta emitters <sup>89,90</sup>Sr. Improving the dosimetry of AM internal exposure is an important step in clarifying the risks of chronic radiation exposure for riverside residents. To evaluate the energy absorbed by AM from incorporated <sup>90</sup>Sr it is customary to use computational phantoms where radiation transport can be emulated. A phantom is a representative digital representation of skeletal bone geometry and AM. The goal of this work was to develop a computational phantom of a newborn skeleton for dosimetry of AM from incorporated <sup>90</sup>Sr. The researchers have used the Stochastic Parametric Skeletal Dosimetry method (SPSPD), where hematopoietic sites were modeled as a set of phantoms of simple geometric shape describing individual skeletal bone areas. The AM content in the skeleton as well as the phantom parameters were evaluated on the basis of published measurements of real bones. As a result, a computational phantom of the main skeletal hematopoietic sites was generated for a newborn baby, including 34 phantoms of bone areas. The simulated phantom simulates the bone structure as well as the variability of skeletal parameters within the population and corresponds well to measurements of real bones.

**Keywords:** active bone marrow, trabecular bone, cortical bone, bone marrow dosimetry, computational phantoms, <sup>90</sup>Sr

**Funding:** The work was performed within the framework of the Federal Targeted Program "Nuclear and Radiation Safety" and was financially supported by the Federal Medical — Biological Agency of Russia. The methodological approaches were developed with financial support from the Federal Medical — Biological Agency of Russia and the Office of International Health Programs of the U.S. Department of Energy as part of the joint U.S.-Russian JCCRER 1.1 project.

**Author contribution:** all authors contributed equally to the development of research methodology, data acquisition, analysis, and interpretation, and to the writing and editing of the article.

✉ **Correspondence should be addressed:** Pavel Alekseevich Sharagin  
Vorovskogo, 68-a, Chelyabinsk, 454141, Russia; sharagin@urcm.ru

**Received:** 10.11.2022 **Accepted:** 19.12.2022 **Published online:** 27.12.2022

**DOI:** 10.47183/mes.2022.045

Внутреннее облучение красного костного мозга (ККМ), обусловленное техногенными остеотропными радионуклидами, может приводить к серьезным медицинским последствиям. Такое облучение может происходить как в рамках радионуклидной терапии, так и после попадания радионуклидов в окружающую среду вследствие испытаний ядерного оружия или радиационных аварий. Радиоактивное загрязнение реки Течи в 1950-е годы привело к облучению ККМ у жителей прибрежных территорий при средних дозах около 0,35 Гр, что стало причиной возникновения хронического лучевого синдрома [1–4] и повышенного риска развития лейкозов в когорте жителей прибрежных сел. Основными источниками внутреннего облучения ККМ для них были остеотропные бета-излучатели  $^{89,90}\text{Sr}$  [2]. В этом контексте совершенствование дозиметрии ККМ от  $^{90}\text{Sr}$  является актуальной задачей радиобиологии и радиационной защиты. Дозиметрия  $^{90}\text{Sr}$  включает в себя биокинетическое моделирование, в рамках которого оценивается его распределение по тканям организма и расчет удельной активности  $^{90}\text{Sr}$  в тканях-источниках, а также дозиметрическое моделирование переноса энергии от ткани — источника излучения (кости) к ткани-мишени (ККМ). Результатом дозиметрического моделирования являются коэффициенты перехода (DF) от удельной активности источника излучения к мощности поглощенной дозы в мишени. Важный этап дозиметрического моделирования — разработка вычислительных фантомов, т. е. репрезентативного цифрового представления геометрии тканей источников и мишеней, в котором моделируют транспорт излучения. При построении фантомов для дозиметрии ККМ объектом моделирования является кость. Дозиметрическая модель кости представляет собой упрощенное представление реальной кости и состоит из слоя сплошной кортикальной кости, который покрывает фантом снаружи, и спонгиозы, заполняющей модель изнутри. Спонгиоза — это совокупность трабекулярной кости, которую моделируют как сеть стержневидных трабекул, и расположенного между ними ККМ. В настоящее время существует несколько подходов для моделирования формы и структуры кости на основе анализа изображений компьютерной томографии (КТ) [5–9]. Эти методы требуют патологоанатомического материала и не позволяют учесть индивидуальную вариабельность размеров костей человека. В качестве альтернативы в ФГБУН УНПЦ РМ был разработан оригинальный параметрический метод стохастического моделирования костных структур, SPSPD-моделирование (от англ. stochastic parametric skeletal dosimetry) [10]. Данный метод основан на использовании опубликованных усредненных результатов измерений костных структур в качестве параметров фантомов, что позволяет обойтись без аутопсийного материала, а также оценить неопределенности, связанные с вариабельностью скелетов у разных людей.

Цель настоящего исследования — разработка вычислительного фантома скелета новорожденного ребенка для дозиметрии ККМ от инкорпорированного  $^{90}\text{Sr}$ .

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для моделирования скелета использовали оригинальную методику SPSPD. В рамках данного подхода можно моделировать только участки скелета с активным гемопоэзом, т. е. содержащие ККМ (гемопоэтические сайты). SPSPD-фантом гемопоэтических сайтов скелета (ФГСС) состоит из набора меньших фантомов — базовых фантомов сегментов кости (БФСК) простой геометрической формы, описывающих отдельные участки костей скелета. Каждый фантом включает в себя описание моделируемых сред и описание геометрии тканей источников и мишеней.

Моделируемые участки скелета с активным гемопоэзом (гемопоэтические сайты) были определены согласно опубликованным данным о распределении ККМ.

Каждый БФСК состоит из минерализованной костной ткани и ККМ. Для имитации транспорта энергии в этих двух средах, согласно опубликованным данным, были определены их химический состав и плотность. Эти характеристики применяют в качестве параметров для всех фантомов.

Для каждого БФСК оценивали параметры, характеризующие геометрию облучения: линейные размеры кости, толщину кортикального слоя (*Ct.Th*), толщину трабекул (*Tb.Th*), размер межтрабекулярного пространства (*Tb.Sp.*), долю костной ткани в объеме спонгиозы (*BV/TV*). Перечисленные параметры оценивали по опубликованным данным. Для оценки характеристик геометрии кости рассматривали статьи в рецензируемых изданиях, атласы, руководства, монографии и диссертации. Кроме того, анализировали электронные ресурсы, содержащие коллекции рентгеновских снимков. Для анализа принимали результаты измерений людей/образцов, которые авторы определили как здоровые и не имеющие заболеваний, приводящих к деформации кости. Этническая принадлежность — европеоиды и монголоиды. Выбор этнических групп связан с тем, что эти группы характерны для населения Уральского региона. В рассмотрение принимали данные измерений костей скелета с помощью различных техник: микрометров, анатомических боксов, ультразвуковых и рентгенологических исследований, КТ (для линейных размеров и *Ct.Th*), гистоморфометрии и микро-КТ — для параметров микроархитектуры (*Tb.Th*, *Tb.Sp.*, *BV/TV*). В качестве параметров цифровых фантомов принимали усредненные оценки характеристик костей. Если были доступны опубликованные данные по индивидуальным измерениям, мы объединяли их и рассчитывали арифметические средние и стандартные отклонения (SD). В случае усреднения результатов исследований групп людей вводили взвешивающий коэффициент (*Wn*), который учитывал число (*n*) исследуемых субъектов:  $Wn = 1$ , если  $n \geq 25$ ;  $Wn = n/25$ , если  $n < 25$ . Методы отбора и анализа литературных данных подробно описаны [11–14].

На основе средних значений выбранных параметров для каждого сегмента кости в программе Trabecula [15] был сгенерирован вычислительный фантом в воксельной

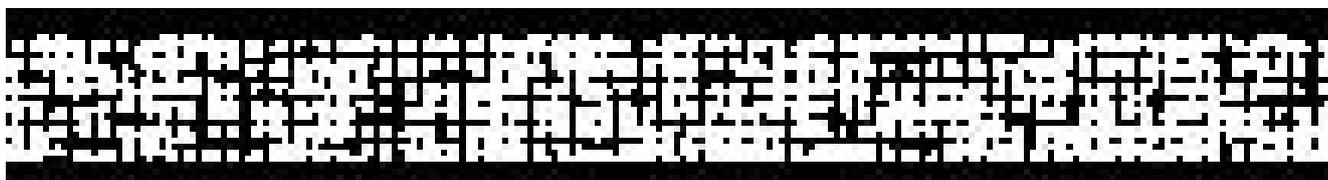


Рис. 1. Срез фантома подвздошной кости новорожденного (черным цветом показаны трабекулы и кортикальная кость, белым — ККМ)

Таблица 1. Массовая доля ККМ (% от общей массы ККМ в скелете) в основных гемопоэтических сайтах скелета новорожденного [17]

№	Гемопоэтический сайт	Массовая доля ККМ, %
1	Бедро	6,7
2	Плечо	4,5
3	Крестец	4,4
4	Берцовые кости	7,1
5	Тазовые кости	11,4
6	Череп	28,2
7	Ключица	0,7
8	Лопатка	2,3
9	Ребра	7,1
10	Лучевая и локтевая кость	2,4
11	Кости кисти и стопы	10,8
12	Шейные позвонки	1,7
13	Грудные позвонки	7,2
14	Поясничные позвонки	5,5

форме — базовый фантом сегмента кости (БФСК). БФСК представляет собой модель простой геометрической формы (прямоугольный параллелепипед, цилиндр, призма и др.), внутри заполненный спонгиозой и снаружи покрытый кортикальным слоем, как показано на примере фантома подвздошной кости новорожденного (рис. 1).

Каждый элемент фантома (ККМ, трабекула, кортикальный слой) имитировался набором трехмерных элементов — вокселей, из которых «складывались» моделируемые структуры. Каждый воксель имитировал либо минерализованную кость, либо костный мозг (КМ), в зависимости от положения центра вокселя в фантоме. В качестве тканей-источников дозиметрическая модель рассматривает отдельно трабекулярную кость (ТК) и кортикальную кость (КК), КМ рассматривается как ткань-мишень в предположении, что ККМ равномерно распределен внутри БФСК. Размер вокселя различался у разных фантомов, не превышал 70% от толщины трабекулы [15, 16], и в смоделированных фантомах варьировал от 50 до 200 мкм. Объемы тканей-источников и ткани-детектора автоматически рассчитывались в программе Tabecula для каждого воксельного фантома.

Для имитации популяционной вариативности размеров и характеристик микроструктуры для каждого БФСК, сгенерированного со средними значениями параметров, было создано 12 дополнительных фантомов сегментов кости (ДФСК) с параметрами, случайно разыгранными в пределах их индивидуальной вариативности (в границах минимальных и максимальных измеренных значений).

Таблица 2. Химический состав моделируемых сред, принятый для всех БФСК

Химический состав, отн. ед.		
Химический элемент	Кость	Костный мозг
H	0,035	0,105
C	0,16	0,414
N	0,042	0,034
O	0,445	0,439
Na	0,003	0,001
Mg	0,002	0,002
P	0,095	0,002
S	0,003	0,002
Ca	0,215	—

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основные гемопоэтические сайты скелета новорожденного и массовая доля ККМ в них были определены согласно данным МРТ-исследований [17] и представлены в табл. 1.

ФГСС скелета новорожденного включает в себя 14 гемопоэтических сайтов. Содержание ККМ в них варьирует от 1,7 до 28,2%.

Гемопоэтические сайты включают участки, которые не моделировали в рамках SPSPD-подхода. Так, не были смоделированы эпифизы трубчатых костей, так как они по большей части состоят из хрящевой ткани [18–22]. Не моделировали кости лицевого черепа, так как его доля по сравнению с мозговым составляет около 13%, а значительная часть тела нижней и верхней челюсти занята развивающимися зубами [33–35]. Кроме того, не моделировали отростки позвонков, так как у новорожденных в них наблюдаются только небольшие очаги окостенения [23].

Химический состав моделируемых сред был выбран на основе данных МКРЗ для взрослых [19]. Химический состав костной ткани и ККМ, используемый для всех БФСК, представлен в табл. 2.

Плотность минерализованной костной ткани оценена на основе результатов измерений плотности кортикальной кости новорожденных [24] и равна 1,65 г/см<sup>3</sup>. Плотность ККМ принимали равной плотности воды (1 г/см<sup>3</sup>) [25].

Параметры микроархитектуры спонгиозы были оценены на основе опубликованных данных и подробно

Таблица 3. Линейные размеры и кортикальная толщина, принятые для БФСК новорожденного

Гемопозитический сайт	Сегмент	Форма <sup>1</sup>	Параметры фантома, мм (в скобках дан CV, %) <sup>2</sup>						Ссылки на источники данных
			<i>h</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>Ct.Th.</i>	
Бедро	Трубка диафиза <sup>4</sup>	ц	30	7,2 (11)	7,2 (11)	–	–	1,7 (24)	26–32
	Проксимальный конец	дц	19 (5)	26 (9)	12 (12)	7,2 (11)	7,2 (11)	0,5 (24)	
	Дистальный конец	дц	19 (5)	26 (9)	12 (12)	7,2 (11)	7,2 (11)	0,4 (24)	
Плечо	Трубка диафиза <sup>4</sup>	ц	30	6 (12)	6 (12)	–	–	1,3 (15)	26–31, 33
	Проксимальный конец	дц	13 (10)	13 (12)	13 (12)	6 (12)	6 (11)	0,4 (15)	
	Дистальный конец	дц	13 (10)	17 (13)	6 (12)	6 (12)	6 (11)	0,3 (19)	
Ребра	Ребра <sup>4</sup>	п	5,7 (38)	30	3,2 (12)	–	–	0,4 (37)	34, 35
Крестец	Тело 1-го позвонка	п	6,3 (21)	15 (10)	7,5 (10)	–	–	–	36–39
	Тело 2-го позвонка	п	6,3 (21)	12 (10)	6 (10)	–	–	–	
	Тело 3-го позвонка	п	5,7 (19)	8,9 (10)	5,3 (9)	–	–	–	
	Тело 4-го позвонка	п	3,8 (21)	8,9 (10)	5,3 (9)	–	–	–	
	Тело 5-го позвонка	п	3,8 (21)	7,5 (10)	3,8 (11)	–	–	–	
Берцовые	Малая берцовая кость <sup>4</sup>	ц	30	2,9 (7)	2,9 (7)	–	–	0,7 (14)	26, 30, 40
	Трубка диафиза б.б. <sup>4</sup>	ц	30	6,9 (28)	6,9 (28)	–	–	1,4 (14)	26–29, 32, 41, 42
	Проксимальный конец б.б.	дц	19 (9)	21 (9)	13 (18)	6,9 (28)	6,9 (28)	0,3 (17)	
	Дистальный конец б.б.	дц	15 (9)	15 (23)	15 (23)	6,9 (28)	6,9 (28)	0,3 (17)	
Тазовые кости	Подвздошная кость часть 1	п	4 (23)	24 (3)	24 (3)	–	–	1,2 (33) 0,5 (47)3	23, 43–47
	Подвздошная кость часть 2	п	4 (23)	20 (3)	20 (3)	–	–	0,2 (25)	
	Лобковая кость	ц	16 (13)	7,5 (16)	7,5 (16)	–	–	0,4 (9)	
	Седалищная кость	ц	7,5 (16)	18 (11)	12 (8)	–	–	0,4 (9)	
Череп	Плоские кости свода <sup>4</sup>	п	2 (25)	30	30	–	–	–	49–52
Ключица	Тело	ц	33 (15)	4,3 (23)	5,9 (25)	–	–	0,8 (25)	53–58
	Грудинный конец	дц	5,9 (15)	12 (24)	10 (24)	5,9 (25)	4,3 (23)	0,3 (24)	
	Акромиальный конец	дц	5,9 (15)	10 (24)	5,9 (49)	5,9 (25)	4,3 (23)	0,3 (24)	
Локтевая и лучевая	Трубка диафиза <sup>4</sup>	ц	30	3,9 (8)	3,9 (8)	–	–	0,9 (13)	26, 27, 29, 30, 41
	Конец	дц	12 (6)	5,8 (7)	5,8 (7)	3,9 (8)	3,9 (8)	0,3 (29)	
Кости кистей и стоп	Трубчатые кости	ц	8,9 (43)	3,8 (42)	3,8 (42)	–	–	0,2 (25)	23, 53, 59,
	Таранная и пяточная кости	э	–	7,8 (14)	12 (11)	7,8 (14)	–	0,2 (25)	
Лопатка	Гленоид	ц	5,4 (4)	10 (21)	7,6 (18)	–	–	0,5 (29)	53, 60–63
	Акромион	п	7 (19)	16 (14)	13 (25)	–	–	0,4 (13)	
	Тело <sup>4</sup>	п	2,7 (13)	30	30	–	–	0,4 (17)	
Шейные позвонки	Тело позвонка	ц	4,1 (1)	6,9 (1)	6,5 (1)	–	–	–	64–66
Грудные позвонки	Тело позвонка	ц	5,1 (2)	7,6 (2)	11 (2)	–	–	–	66, 67
Поясничные позвонки	Тело позвонка	ц	7,1 (1)	7,7 (1)	15 (1)	–	–	–	37, 66, 67

**Примечания:** <sup>1</sup> — форму фантома обозначали следующим образом: ц — цилиндр, дц — деформированный цилиндр, п — прямоугольный параллелепипед, э — эллипсоид; <sup>2</sup> — размеры БФСК обозначали следующим образом: *h* — высота; *a* — большая ось (ц), большая ось для большего основания (дц), или сторона *a* (п); *b* — малая ось (ц), малая ось для большего основания (дц), или сторона *b* (п); *c* — большая ось для меньшего основания (дц); *d* — малая ось для меньшего основания (дц); для эллипсоида (э) *a*, *b*, *c* обозначают оси эллипсоида; <sup>3</sup> — толщину кортикального слоя принимали разной для внутренней (медиальной) и внешней (ягодичной) поверхностей данного сегмента подвздошной кости (рис. 1); <sup>4</sup> — БФСК имитировал лишь часть моделируемого сегмента кости, в случае если размеры сегмента кости значительно превышали 30 мм, так как в таких случаях, с точки зрения дозиметрии не имеет смысла моделировать весь участок кости полностью [11, 12].

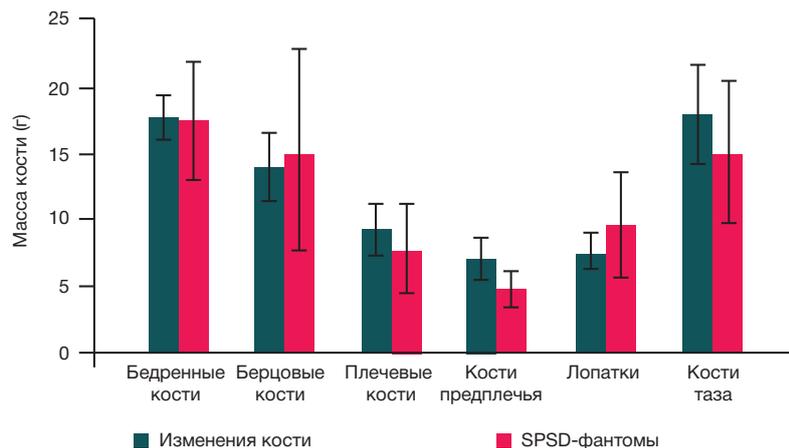
описаны ранее [14]. Линейные размеры и толщина кортикального слоя, принятые в качестве параметров БФСК, представлены в табл. 3.

Таким образом, ФГСС новорожденного состоит из 34-х БФСК. В зависимости от формы моделируемого гемопозитического сайта он может включать в себя от 1 (ребра) до 5 (крестец) БФСК. Большая часть БФСК представляет собой цилиндры и прямоугольные параллелепипеды. Размеры фантомов варьируют в широких пределах: от 2 до 33 мм. Как показано в табл. 3, не все фантомы покрыты

кортикальным слоем, что связано с незавершенным процессом окостенения позвоночника и костей свода черепа. Наибольшее значение *Ct.Th* для новорожденного характерно для тела бедренной кости (1,7 мм).

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Чтобы проверить адекватность SPSS-подхода, мы провели сравнение смоделированных фантомов и реальных костей. Имеются уникальные данные о массе



**Рис. 2.** Сравнение измеренных масс костей [68] и масс, соответствующих размерам SPSPD-фантомов, оцененных как сумма масс всех сегментов, описывающих конкретные кости (левая + правая) новорожденных с учетом повторяющихся и парных сегментов. Стандартные отклонения показаны «усами»

влажных минерализованных костей, полученные при исследовании 40 доношенных новорожденных [68]. Массы, соответствующие размерам фантомов, рассчитывали как сумму произведений объемов моделируемых сред (КМ, КК, ТК) на их плотности.

Сравнение измеренных масс костей и масс SPSPD-фантомов костей (рассчитанных как сумма масс сегментов, описывающих кость) представлено на рис. 2.

По результатам сравнения, массы, соответствующие размерам SPSPD-фантомов, в большинстве случаев попадают в диапазон стандартного отклонения значений, полученных автором сравниваемой работы [68], т. е. хорошо соответствуют массам реальных костей.

Особенностью SPSPD-фантома является генерация БФСК простой геометрической формы, т. е. упрощенное представление реальной формы участка кости. Упрощенное представление может привести к смещенным оценкам результатов моделирования. Как упоминалось ранее, БФСК моделируется со средними популяционными значениями параметров, а параметры ДФСК выбирали случайным образом в пределах диапазона их популяционной вариативности. В результате смоделированный сегмент

кости оказывается «внутри» набора геометрических фигур ДФСК. Дисперсия набора DF, рассчитанных для ДФСК, отражает влияние изменчивости размеров, формы и микроструктуры костей.

## ВЫВОДЫ

В результате работы были сгенерированы вычислительные фантомы основных участков скелета с активным гемопоэзом для новорожденного ребенка. Смоделированный фантом имитирует структуру костной ткани, а также вариативность параметров скелета внутри популяции. Фантом хорошо соответствует измерениям реальных костей новорожденного. Представленный фантом используется для усовершенствования дозиметрической системы реки Теча. В дальнейшем будут созданы SPSPD-фантомы скелета для других возрастных групп: 1 год, 5 лет, 10 лет, 15 лет, взрослые и для плода человека на 24-й неделе беременности. SPSPD-фантомы могут быть использованы для дозиметрии других остеотропных бета-излучателей, в том числе применяемых в радионуклидной терапии, таких как  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{186}\text{Re}$ ,  $^{188}\text{Re}$ ,  $^{117}\text{mSm}$ .

## Литература

1. Degteva MO, Shagina NB, Vorobiova MI, Shishkina EA, Tolstykh EI, Akleyev AV. Contemporary Understanding of Radioactive Contamination of the Techa River in 1949–1956. *Radiat Biol Radioecol.* 2016; 56 (5): 523–34. English, Russian. PMID: 30703313.
2. Krestinina LY, Epifanova S, Silkin S, Mikryukova L, Degteva M, Shagina N, Akleyev A. Chronic low-dose exposure in the Techa River Cohort: risk of mortality from circulatory diseases. *Radiat Environ Biophys.* 2013; 52 (1): 47–57. DOI: 10.1007/s00411-012-0438-5. Epub 2012 Nov 4.
3. Аклев А. В. Хронический лучевой синдром у жителей прибрежных сел реки Теча. Челябинск: Книга, 2012; 464 с.
4. Preston DL, Sokolnikov ME, Krestinina LY, Stram DO. Estimates of Radiation Effects on Cancer Risks in the Mayak Worker, Techa River and Atomic Bomb Survivor Studies. *Radiat Prot Dosimetry.* 2017; 173 (1–3): 26–31. DOI: 10.1093/rpd/ncw316.
5. O'Reilly SE, DeWeese LS, Maynard MR, Rajon DA, Wayson MB, Marshall EL, et al. An 13 image-based skeletal dosimetry model for the ICRP reference adult female-internal electron 14 sources. *Phys Med Biol.* 2016; 61 (24): 8794–8824. Epub 2016 Nov 29.
6. Xu XG, Chao TC, Bozkurt A. VIP-Man: an image-based whole-body adult male model constructed from color photographs of the Visible Human Project for multi-particle Monte Carlo calculations. *Health Phys.* 2000; 78 (5): 476–86. DOI: 10.1097/00004032-200005000-00003. PMID: 10772019.
7. Shah AP, Bolch WE, Rajon DA, Patton PW, Jokisch DW. A paired-image radiation transport model for skeletal dosimetry. *J Nucl Med.* 2005; 46 (2): 344–53. PMID: 15695796.
8. Pafundi D. Image-based skeletal tissues and electron dosimetry models for the ICRP reference pediatric age series. A dissertation presented to the graduate schools of the University of Florida in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of the philosophy. University of Florida, 2009.
9. Hough M, Johnson P, Rajon D, Jokisch D, Lee C, Bolch W. An image-based skeletal dosimetry model for the ICRP reference adult male-internal electron sources. *Phys Med Biol.* 2011; 56 (8): 2309–46. DOI: 10.1088/0031-9155/56/8/001. Epub 2011 Mar 22.
10. Degteva MO, Tolstykh EI, Shishkina EA, Sharagin PA, Zalyapin VI, Volchkova AYU, et al. Stochastic Parametric Skeletal Dosimetry model for humans: General description. *PlosOne*; 2021 (submitted).
11. Sharagin PA, Shishkina EA, Tolstykh EI, Volchkova AYU, Smith MA, Degteva MO. Segmentation of hematopoietic sites of human skeleton for calculations of dose to active marrow exposed to

- bone-seeking radionuclides. In: RAD Conference Proceedings, 2018; (3): 154–8. DOI: 10.21175/RadProc.2018.33.
12. Шарагин П. А., Толстых Е. И., Шишкина Е. А., Дегтева М. О. Дозиметрическое моделирование кости для остеотропных бета-излучающих радионуклидов: размерные параметры и сегментация. В сборнике: Материалы международной научной конференции «Современные проблемы радиобиологии». Беларусь, Гомель, 23–24 сентября 2021. 2021; с. 200–204.
  13. Толстых Е. И., Шарагин П. А., Шишкина Е. А., Дегтева М. О. Формирование доз облучения красного костного мозга человека от  $^{89}\text{Sr}$ , оценка параметров трабекулярной кости от дозиметрического моделирования. В сборнике: Материалы международной научной конференции «Современные проблемы радиобиологии». Беларусь, Гомель, 23–24 сентября 2021. 2021; с. 176–179.
  14. Толстых Е. И., Шарагин П. А., Шишкина Е. А., Волчкова А. Ю., Дегтева М. О. Анатомо-морфологический базис для дозиметрического моделирования трабекулярной кости человека с использованием стохастического параметрического подхода. Клинический вестник ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна. 2022; 3: 25–40.
  15. Shishkina EA, Timofeev YS, Volchkova AY, Sharagin PA, Zalyapin VI, Degteva MO, et al. Trabecula: A Random Generator of Computational Phantoms for Bone Marrow Dosimetry. *Health Phys.* 2020; 118 (1): 53–59. DOI: 10.1097/HP.0000000000001127.
  16. Zalyapin VI, Timofeev YuS, Shishkina EA. A parametric stochastic model of bone geometry. *Bulletin of Southern Urals State University, Issue «Mathematical Modelling. Programming & Computer Software» (SUSU MMCS).* 2018; 11 (2): 44–57. DOI: 10.14529/mmp180204.
  17. Cristy M. Active bone marrow distribution as a function of age in humans. *Phys Med Biol.* 1981; 26 (3): 389–400.
  18. Vogler JB 3rd, Murphy WA. Bone marrow imaging. *Radiology.* 1988; 168 (3): 679–93.
  19. Vande Berg BC, Malghem J, Lecouvet FE, Maldague B. Magnetic resonance imaging of the normal bone marrow. *Skeletal Radiology.* 1998; 27: 471–83.
  20. Vande Berg BC, Malghem J, Lecouvet FE, Maldague B. Magnetic resonance imaging of normal bone marrow. *Eur Radiol.* 1998; 8 (8): 1327–34.
  21. Taccone A, Oddone M, Dell'Acqua AD, Occhi M, Ciccone MA. MRI "road-map" of normal age-related bone marrow. II. Thorax, pelvis and extremities. *Pediatr Radiol.* 1995; 25 (8): 596–606; PubMed PMID: 8570312.
  22. Taccone A, Oddone M, Occhi M, Dell'Acqua AD, Ciccone MA. MRI "road-map" of normal age-related bone marrow. I. Cranial bone and spine. *Pediatr Radiol.* 1995; 25 (8): 588–95; PubMed PMID: 8570311.
  23. Cunningham C, Scheuer L, Black S. *Developmental Juvenile Osteology.* Elsevier Academic Press, 2016.
  24. Robinson RA. Chemical analysis and electron microscopy of bone. In: *Bone as a tissue*, ed. by Rodahl K, Nicholson JT, Brown EM. New York: McGraw-Hill, 1960; p. 186–250.
  25. Valentin J. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values. *Annals of the ICRP.* *Annals of the ICRP.* 32 (3–4): 1–277. 2002.
  26. Медведев М. В. Ультразвуковая фетометрия: справочные таблицы и номограммы. М.: Реальное время, 2009; 19–24.
  27. Florence JL. Linear and cortical bone dimensions as indicators of health status in subadults from the Milwaukee County Poor Farm Cemetery. M.A., University of Colorado at Denver, 2007.
  28. Miles AEW. Growth Curves of Immature Bones from a Scottish Island Population of Sixteenth to mid-Nineteenth Century: Limb-bone Diaphyses and Some Bones of the Hand and Foot. *International Journal of Osteoarchaeology.* 1994; 4: 121–36.
  29. Maresh MM. Measurements from roentgenograms. In: *Human Growth and Development* (R.W. McCammon, Ed.). Springfield, IL: Charles C. Thomas, 1970; p. 157–200.
  30. Jeanty P. Fetal limb biometry. *Radiology.* 1983; 147 (2): 601–2. DOI: 10.1148/radiology.147.2.6836145. PMID: 6836145.
  31. Svadovsky VS. Age-related bone remodeling. Moscow, 1961.
  32. Dhavale N, Halcrow SE, Buckley HR, Tayles N, Dornett KM, Gray AR. Linear and appositional growth in infants and children from the prehistoric settlement of Ban Non Wat, Northeast Thailand: Evaluating biological responses to agricultural intensification in Southeast Asia. *Journal of Archaeological Science: Reports.* 2017; V11: 435–46.
  33. Danforth ME, Wrobel GD, Armstrong CW, Swanson D. Juvenile age estimation using diaphyseal long bone lengths among ancient Maya populations. *Latin American Antiquity.* 2017; 20 (1): 3–13.
  34. Beresheim AC, Pfeiffer S, Grynpsas M. Ontogenetic changes to bone microstructure in an archaeologically derived sample of human ribs. *J Anat.* 2019. DOI: 10.1111/joa.13116.
  35. Pfeiffer S. Cortical Bone Histology in Juveniles. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/303179375\\_Cortical\\_bone\\_histology\\_in\\_Juveniles](https://www.researchgate.net/publication/303179375_Cortical_bone_histology_in_Juveniles)
  36. Hresko AM, Hinchcliff EM, Deckey DG, Hresko MT. Developmental sacral morphology: MR study from infancy to skeletal maturity. *Eur Spine J.* 2020. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00586-020-06350-6>.
  37. Mavrych V, Bolgova O, Ganguly P and Kashchenko S. Age-Related Changes of Lumbar Vertebral Body Morphometry. *Austin J Anat.* 2014; 1 (3): 7.
  38. Dimeglio A, Bonnel F, Canavese F. *The Growing Spine.* In: *Spinal Anatomy. Modern Concepts.* Springer. 2020; 25–52.
  39. Андронеску А. Анатомия ребенка. Бухарест: Меридиан, 1970.
  40. Bernert Zs, Évinger S, Hajdu T. New data on the biological age estimation of children using bone measurements based on historical populations from the Carpathian Basin. *Annales Historico-Naturales Musei Nationalis Hungarici.* 2007; 99: 199–206.
  41. Gindhart PS. Growth Standards for the Tibia and Radius in Children Aged One Month through Eighteen Years. *Am J Phys Anthropol.* 1973; 39: 41–48.
  42. Suominen PK, Nurmi E, Lauerma K. Intraosseous access in neonates and infants: risk of severe complications - a case report. *Acta Anaesthesiol Scand.* 2015; 59 (10): 1389–93. DOI: 10.1111/aas.12602. Epub 2015 Aug 24. PubMed PMID: 26300243.
  43. Blake KAS. An investigation of sex determination from the subadult pelvis: A morphometric analysis. Doctoral Dissertation, University of Pittsburgh. 2011.
  44. Cunningham CA, Black SM. Iliac cortical thickness in the neonate — the gradient effect. *J Anat.* 2009; 215 (3): 364–70. DOI: 10.1111/j.1469-7580.2009.01112.x.
  45. Cunningham CA, Black SM. Anticipating bipedalism: trabecular organization in the newborn ilium. *J Anat.* 2009; 214 (6): 817–29. DOI: 10.1111/j.1469-7580.2009.01073.x.
  46. Corron L, Marchal F, Condemi S, Chaumoitre K, Adalian P. A New Approach of Juvenile Age Estimation using Measurements of the Ilium and Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS) Models for Better Age Prediction. *Forensic Sci.* 2017; 62 (1): 18–29. DOI: 10.1111/1556-4029.13224.
  47. Yusof NA, Soames RW, Cunningham CA, Black SM. *Anat Rec (Hoboken).* Growth of the human ilium: the anomalous sacroiliac junction 2013; 296 (11): 1688–94. DOI: 10.1002/ar.22785.
  48. Schnitzler CM, Mesquita JM, Pettifor JM. Cortical bone development in black and white South African children: iliac crest histomorphometry. *Bone.* 2009; 44 (4): 603–11. DOI: 10.1016/j.bone.2008.12.009.
  49. De Boer HH, Van der Merwe AE, Soerdjbalie-Maikoe VV. Human cranial vault thickness in a contemporary sample of 1097 autopsy cases: relation to body weight, stature, age, sex and ancestry. *Int J Legal Med.* 2016; 130 (5): 1371–7. DOI: 10.1007/s00414-016-1324-5.
  50. Margulies S, Coats B. Experimental Injury Biomechanics of the Pediatric Head and Brain. In: *Pediatric Injury Biomechanics.* New York: Springer Science + Business Media, 2013; 157–190.
  51. Li Z, Park BK, Liu W, Zhang J, Reed MP, Rupp JD, et al. A statistical skull geometry model for children 0–3 years old. *PLoS One.* 2015; 10 (5): e0127322. DOI: 10.1371/journal.pone.0127322. eCollection 2015.
  52. Rodriguez-Florez N, Ibrahim A, Hutchinson JC, Borghi A, James G, Arthurs OJ, et al. Cranial bone structure in children with sagittal craniosynostosis: Relationship with surgical outcomes. *J Plast Reconstr Aesthet Surg.* 2017; 70 (11): 1589–97. DOI: 10.1016/j.bjps.2017.06.017.
  53. Fazekas IGy. and Kósa F. *Forensic Fetal Osteology.* Budapest:

- Akadémiai Kiadó, 1978.
54. Sherer D, Sokolovski M, Dalloul M, Khoury-Collado F, Osho J, Lamarque M, et al. Fetal clavicle length throughout gestation: a nomogram. *Ultrasound in Obstetrics and Gynecology*. 2006; 27: 306–10.
  55. McGraw MA, Mehlman CT, Lindsell CJ, Kirby CL. Postnatal growth of the clavicle: birth to eighteen years of age. *Journal of Pediatric Orthopedics*. 2009; 29: 937.
  56. Black SM, and Scheuer JL. Age changes in the clavicle: from the early neonatal period to skeletal maturity. *International Journal of Osteoarchaeology*. 1996; 6: 425–34.
  57. Bernat A, Huysmans T, Van Glabbeek F, Sijbers J, Gielen J, Van Tongel A. The anatomy of the clavicle: a three-dimensional cadaveric study. *Clin Anat*. 2014; 27 (5): 712–23.
  58. Fujita T, Orimo H, Ohata M, Yoshikawa M. Changes in the cortical thickness of the clavicle according to age. *J Am Geriatr Soc*. 1968; 16 (4): 458–62.
  59. Raziye D, Ceren U, Kadir D, Osman S, Mehmed Ali M. A Radiological Investigation on the Hand Development in Human Fetuses Throughout the Fetal Period and an Evaluation Performed in Terms of its Clinical Importance Hand Development. *International Journal of Morphology*. *International Journal of Morphology*. 2016; 34: 1539–52. DOI: 10.4067/s0717-95022016000400057.
  60. Corrigan GE. The neonatal scapula. *Biol Neonat*. 1960; 2: 159–67. PubMed PMID: 13695677.
  61. Hrdlicka A. The scapula: visual observations. *Am J Phys Anthropol*. 1942; 29: 73–94.
  62. Vallois HV. L'omoplate humaine. *Bulletin de la Société d'Anthropologie de Paris*. 1946; 7: 16–99.
  63. Saunders S, Hoppa R, Southern R. Diaphyseal growth in a nineteenth-century skeletal sample of subadults from St Thomas' Church, Belleville, Ontario. *International Journal of Osteoarchaeology*. 1993; 3: 265–81.
  64. Хомутова Е. Ю. Анатомия шейного отдела позвоночника новорожденных при лучевых методах исследования [диссертация]. Санкт-Петербург, 2005.
  65. Sharma N, Jain SK, Singh PK, Rohin Garg. A morphometric study of predictors for sexual dimorphism of cervical part of vertebral column in human fetuses. *Journal of the Anatomical Society of India*. 2017; 66: 135–39.
  66. 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. *Calcif Tissue Int*. 1997; 61: 95–100.
  67. Ponrartana S, Aggabao PC, Dharmavaram NL, Fisher CL, Friedlich P, Devaskar SU, et al. Sexual Dimorphism in Newborn Vertebrae and its Potential Implications. *J Pediatr*. 2015; 167: 416–21.
  68. Борисов Б. К. Весовые показатели развития скелета плода человека и содержание в нем стронция и кальция. М.: Государственный комитет по использованию атомной энергии СССР, 1973; 14 с.

## References

1. Degteva MO, Shagina NB, Vorobiova MI, Shishkina EA, Tolstykh EI, Akleyev AV. Contemporary Understanding of Radioactive Contamination of the Techa River in 1949–1956. *Radiats Biol Radioecol*. 2016; 56 (5): 523–34. English, Russian. PMID: 30703313.
2. Krestinina LY, Epifanova S, Silkin S, Mikryukova L, Degteva M, Shagina N, Akleyev A. Chronic low-dose exposure in the Techa River Cohort: risk of mortality from circulatory diseases. *Radiat Environ Biophys*. 2013; 52 (1): 47–57. DOI: 10.1007/s00411-012-0438-5. Epub 2012 Nov 4.
3. Akleev AV. Xronicheskij luchevoj sindrom u zhitelej pribrezhnyx sel reki Techa. Chelyabinsk: Kniga, 2012; 464 s. Russian.
4. Preston DL, Sokolnikov ME, Krestinina LY, Stram DO. Estimates of Radiation Effects on Cancer Risks in the Mayak Worker, Techa River and Atomic Bomb Survivor Studies. *Radiat Prot Dosimetry*. 2017; 173 (1–3): 26–31. DOI: 10.1093/rpd/ncw316.
5. O'Reilly SE, DeWeese LS, Maynard MR, Rajon DA, Wayson MB, Marshall EL, et al. An 13 image-based skeletal dosimetry model for the ICRP reference adult female-internal electron 14 sources. *Phys Med Biol*. 2016; 61 (24): 8794–8824. Epub 2016 Nov 29.
6. Xu XG, Chao TC, Bozkurt A. VIP-Man: an image-based whole-body adult male model constructed from color photographs of the Visible Human Project for multi-particle Monte Carlo calculations. *Health Phys*. 2000; 78 (5): 476–86. DOI: 10.1097/00004032-200005000-00003. PMID: 10772019.
7. Shah AP, Bolch WE, Rajon DA, Patton PW, Jokisch DW. A paired-image radiation transport model for skeletal dosimetry. *J Nucl Med*. 2005; 46 (2): 344–53. PMID: 15695796.
8. Pafundi D. Image-based skeletal tissues and electron dosimetry models for the ICRP reference pediatric age series. A dissertation presented to the graduate schools of the University of Florida in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of the philosophy. University of Florida, 2009.
9. Hough M, Johnson P, Rajon D, Jokisch D, Lee C, Bolch W. An image-based skeletal dosimetry model for the ICRP reference adult male-internal electron sources. *Phys Med Biol*. 2011; 56 (8): 2309–46. DOI: 10.1088/0031-9155/56/8/001. Epub 2011 Mar 22.
10. Degteva MO, Tolstykh EI, Shishkina EA, Sharagin PA, Zalyapin VI, Volchkova AYU, et al. Stochastic Parametric Skeletal Dosimetry model for humans: General description. *PlosOne*; 2021 (submitted).
11. Sharagin PA, Shishkina EA, Tolstykh EI, Volchkova AYU, Smith MA, Degteva MO. Segmentation of hematopoietic sites of human skeleton for calculations of dose to active marrow exposed to bone-seeking radionuclides. In: *RAD Conference Proceedings*, 2018; (3): 154–8. DOI: 10.21175/RadProc.2018.33.
12. Sharagin PA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Degteva MO. Dozimetriceskoe modelirovanie kosti dlya osteotrofnyx beta-izluchayushix radionuklidov: razmernye parametry i segmentaciya. V sbornike: *Materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Sovremennye problemy radiobiologii»*. Belarus', Gomel', 23–24 sentyabrya 2021. 2021; s. 200–204. Russian.
13. Tolstykh EI, Sharagin PA, Shishkina EA, Degteva MO. Formirovanie doz oblucheniya krasnogo kostnogo mozga cheloveka ot 89,90Sr, ocenka parametrov trabekulyarnoj kosti dlya dozimetriceskogo modelirovaniya. V sbornike: *Materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Sovremennye problemy radiobiologii»*. Belarus', Gomel', 23–24 sentyabrya 2021. 2021; s. 176–179. Russian.
14. Tolstykh EI, Sharagin PA, Shishkina EA, Volchkova AYU, Degteva MO. Anatomico-morfologicheskij bazis dlya dozimetriceskogo modelirovaniya trabekulyarnoj kosti cheloveka s ispol'zovaniem stoxasticheskogo parametriceskogo podxoda. *Klinicheskij vestnik GNC FMBC im.A. I. Burnazyana*. 2022; 3: 25–40. Russian.
15. Shishkina EA, Timofeev YS, Volchkova AY, Sharagin PA, Zalyapin VI, Degteva MO, et al. Trabecula: A Random Generator of Computational Phantoms for Bone Marrow Dosimetry. *Health Phys*. 2020; 118 (1): 53–59. DOI: 10.1097/HP.0000000000001127.
16. Zalyapin VI, Timofeev YuS, Shishkina EA. A parametric stochastic model of bone geometry. *Bulletin of Southern Urals State University, Issue «Mathematical Modelling. Programming & Computer Software» (SUSU MMCS)*. 2018; 11 (2): 44–57. DOI: 10.14529/mmp180204.
17. Cristy M. Active bone marrow distribution as a function of age in humans. *Phys Med Biol*. 1981; 26 (3): 389–400.
18. Vogler JB 3rd, Murphy WA. Bone marrow imaging. *Radiology*. 1988; 168 (3): 679–93.
19. Vande Berg BC, Malghem J, Lecouvet FE, Maldague B. Magnetic resonance imaging of the normal bone marrow. *Skeletal Radiology*. 1998; 27: 471–83.
20. Vande Berg BC, Malghem J, Lecouvet FE, Maldague B. Magnetic resonance imaging of normal bone marrow. *Eur Radiol*. 1998; 8 (8): 1327–34.
21. Taccone A, Oddone M, Dell'Acqua AD, Occhi M, Ciccone MA. MRI "road-map" of normal age-related bone marrow. II. Thorax,

- pelvis and extremities. *Pediatr Radiol.* 1995; 25 (8): 596–606; PubMed PMID: 8570312.
22. Taccone A, Oddone M, Occhi M, Dell'Acqua AD, Ciccone MA. MRI "road-map" of normal age-related bone marrow. I. Cranial bone and spine. *Pediatr Radiol.* 1995; 25 (8): 588–95; PubMed PMID: 8570311.
  23. Cunningham C, Scheuer L, Black S. *Developmental Juvenile Osteology.* Elsevier Academic Press, 2016.
  24. Robinson RA. Chemical analysis and electron microscopy of bone. In: *Bone as a tissue*, ed. by Rodahl K, Nicholson JT, Brown EM. New York: McGraw-Hill, 1960; p. 186–250.
  25. Valentin J. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values. *Annals of the ICRP.* *Annals of the ICRP.* 32 (3–4): 1–277. 2002.
  26. Medvedev MV. *Ul'trazvukovaya fetometriya: spravochnye tablicy i nomogrammy.* M.: Real'noe vremya, 2009; 19–24. Russian.
  27. Florence JL. Linear and cortical bone dimensions as indicators of health status in subadults from the Milwaukee County Poor Farm Cemetery. M.A., University of Colorado at Denver, 2007.
  28. Miles AEW. Growth Curves of Immature Bones from a Scottish Island Population of Sixteenth to mid-Nineteenth Century: Limb-bone Diaphyses and Some Bones of the Hand and Foot. *International Journal of Osteoarcheology.* 1994; 4: 121–36.
  29. Maresh MM. Measurements from roentgenograms. In: *Human Growth and Development* (R.W. McCammon, Ed.). Springfield, IL: Charles C. Thomas, 1970; p. 157–200.
  30. Jeanty P. Fetal limb biometry. *Radiology.* 1983; 147 (2): 601–2. DOI: 10.1148/radiology.147.2.6836145. PMID: 6836145.
  31. Svadovsky VS. Age-related bone remodeling. Moscow, 1961.
  32. Dhavale N, Halcrow SE, Buckley HR, Tayles N, Domett KM, Gray AR. Linear and appositional growth in infants and children from the prehistoric settlement of Ban Non Wat, Northeast Thailand: Evaluating biological responses to agricultural intensification in Southeast Asia. *Journal of Archaeological Science: Reports.* 2017; V11: 435–46.
  33. Danforth ME, Wrobel GD, Armstrong CW, Swanson D. Juvenile age estimation using diaphyseal long bone lengths among ancient Maya populations. *Latin American Antiquity.* 2017; 20 (1): 3–13.
  34. Beresheim AC, Pfeiffer S, Grynpas M. Ontogenetic changes to bone microstructure in an archaeologically derived sample of human ribs. *J Anat.* 2019. DOI: 10.1111/joa.13116.
  35. Pfeiffer S. *Cortical Bone Histology in Juveniles.* Available from: [https://www.researchgate.net/publication/303179375\\_Cortical\\_bone\\_histology\\_in\\_Juveniles](https://www.researchgate.net/publication/303179375_Cortical_bone_histology_in_Juveniles)
  36. Hresko AM, Hinchcliff EM, Deckey DG, Hresko MT. Developmental sacral morphology: MR study from infancy to skeletal maturity. *Eur Spine J.* 2020. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00586-020-06350-6>.
  37. Mavrych V, Bolgova O, Ganguly P and Kashchenko S. Age-Related Changes of Lumbar Vertebral Body Morphometry. *Austin J Anat.* 2014; 1 (3): 7.
  38. Dimeglio A, Bonnel F, Canavese F. *The Growing Spine.* In: *Spinal Anatomy. Modern Concepts.* Springer. 2020; 25–52.
  39. Andronesky A. *Anatomiya rebenka.* Buxarest: Meridian, 1970. Russian.
  40. Bernert Zs, Évinger S, Hajdu T. New data on the biological age estimation of children using bone measurements based on historical populations from the Carpathian Basin. *Annales Historico-Naturales Musei Nationalis Hungarici.* 2007; 99: 199–206.
  41. Gindhart PS. Growth Standards for the Tibia and Radius in Children Aged One Month through Eighteen Years. *Am J Phys Anthropol.* 1973; 39: 41–48.
  42. Suominen PK, Nurmi E, Lauerma K. Intraosseous access in neonates and infants: risk of severe complications - a case report. *Acta Anaesthesiol Scand.* 2015; 59 (10): 1389–93. DOI: 10.1111/aas.12602. Epub 2015 Aug 24. PubMed PMID: 26300243.
  43. Blake KAS. An investigation of sex determination from the subadult pelvis: A morphometric analysis. Doctoral Dissertation, University of Pittsburgh. 2011.
  44. Cunningham CA, Black SM. Iliac cortical thickness in the neonate — the gradient effect. *J Anat.* 2009; 215 (3): 364–70. DOI: 10.1111/j.1469-7580.2009.01112.x.
  45. Cunningham CA, Black SM. Anticipating bipedalism: trabecular organization in the newborn ilium. *J Anat.* 2009; 214 (6): 817–29. DOI: 10.1111/j.1469-7580.2009.01073.x.
  46. Corron L, Marchal F, Condemi S, Chamoûtère K, Adalian P. A New Approach of Juvenile Age Estimation using Measurements of the Ilium and Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS) Models for Better Age Prediction. *Forensic Sci.* 2017; 62 (1): 18–29. DOI: 10.1111/1556-4029.13224.
  47. Yusof NA, Soames RW, Cunningham CA, Black SM. *Anat Rec (Hoboken).* Growth of the human ilium: the anomalous sacroiliac junction 2013; 296 (11): 1688–94. DOI: 10.1002/ar.22785.
  48. Schnitzler CM, Mesquita JM, Pettifor JM. Cortical bone development in black and white South African children: iliac crest histomorphometry. *Bone.* 2009; 44 (4): 603–11. DOI: 10.1016/j.bone.2008.12.009.
  49. De Boer HH, Van der Merwe AE, Soerdjbalie-Maikoe VV. Human cranial vault thickness in a contemporary sample of 1097 autopsy cases: relation to body weight, stature, age, sex and ancestry. *Int J Legal Med.* 2016; 130 (5): 1371–7. DOI: 10.1007/s00414-016-1324-5.
  50. Margulies S, Coats B. *Experimental Injury Biomechanics of the Pediatric Head and Brain.* In: *Pediatric Injury Biomechanics.* New York: Springer Science + Business Media, 2013; 157–190.
  51. Li Z, Park BK, Liu W, Zhang J, Reed MP, Rupp JD, et al. A statistical skull geometry model for children 0–3 years old. *PLoS One.* 2015; 10 (5): e0127322. DOI: 10.1371/journal.pone.0127322. eCollection 2015.
  52. Rodriguez-Florez N, Ibrahim A, Hutchinson JC, Borghi A, James G, Arthurs OJ, et al. Cranial bone structure in children with sagittal craniosynostosis: Relationship with surgical outcomes. *J Plast Reconstr Aesthet Surg.* 2017; 70 (11): 1589–97. DOI: 10.1016/j.bjps.2017.06.017.
  53. Fazekas IGy. and Kósa F. *Forensic Fetal Osteology.* Budapest: Akadémiai Kiadó, 1978.
  54. Sherer D, Sokolovski M, Dalloul M, Khoury-Collado F, Osho J, Lamarque M, et al. Fetal clavicle length throughout gestation: a nomogram. *Ultrasound in Obstetrics and Gynecology.* 2006; 27: 306–10.
  55. McGraw MA, Mehlman CT, Lindsell CJ, Kirby CL. Postnatal growth of the clavicle: birth to eighteen years of age. *Journal of Pediatric Orthopedics.* 2009; 29: 937.
  56. Black SM. and Scheuer JL. Age changes in the clavicle: from the early neonatal period to skeletal maturity. *International Journal of Osteoarcheology.* 1996; 6: 425–34.
  57. Bernat A, Huysmans T, Van Glabbeek F, Sijbers J, Gielen J, Van Tongel A. The anatomy of the clavicle: a three-dimensional cadaveric study. *Clin Anat.* 2014; 27 (5): 712–23.
  58. Fujita T, Orimo H, Ohata M, Yoshikawa M. Changes in the cortical thickness of the clavicle according to age. *J Am Geriatr Soc.* 1968; 16 (4): 458–62.
  59. Raziye D, Ceren U, Kadir D, Osman S, Mehmed Ali M. A Radiological Investigation on the Hand Development in Human Fetuses Throughout the Fetal Period and an Evaluation Performed in Terms of its Clinical Importance Hand Development. *International Journal of Morphology. International Journal of Morphology.* 2016; 34: 1539–52. DOI: 10.4067/s0717-95022016000400057.
  60. Corrigan GE. The neonatal scapula. *Biol Neonat.* 1960; 2: 159–67. PubMed PMID: 13695677.
  61. Hrdlicka A. The scapula: visual observations. *Am J Phys Anthropol.* 1942; 29: 73–94.
  62. Vallois HV. L'omoplate humaine. *Bulletin de la Société d'Anthropologie de Paris.* 1946; 7: 16–99.
  63. Saunders S, Hoppa R, Southern R. Diaphyseal growth in a nineteenth-century skeletal sample of subadults from St Thomas' Church, Belleville, Ontario. *International Journal of Osteoarcheology.* 1993; 3: 265–81.
  64. Xomutova E. Yu. *Anatomiya shejnogo otdela pozvonochnika novorozhdennyx pri luchevox metodax issledovaniya [dissertaciya].* Sankt-Peterburg, 2005. Russian.
  65. Sharma N, Jain SK, Singh PK, Rohin Garg. A morphometric study of predictors for sexual dimorphism of cervical part of vertebral column in human fetuses. *Journal of the Anatomical Society of India.* 2017; 66: 135–39.
  66. 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. *Calcif Tissue Int.* 1997; 61: 95–100.
67. Ponrartana S, Aggabao PC, Dharmavaram NL, Fisher CL, Friedlich P, Devaskar SU, et al. Sexual Dimorphism in Newborn Vertebrae and its Potential Implications. *J Pediatr.* 2015; 167: 416–21.
68. Borisov BK. Vesovye pokazateli razvitiya skeleta ploda cheloveka i sodержanie v nem stronciya i kal'ciya. M.: Gosudarstvennyj komitet po ispol'zovaniyu atomnoj ehnergii SSSR, 1973; 14 s. Russian.