

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

П. А. Шарагин¹✉, Е. А. Шишкина^{1,2}, Е. И. Толстых¹

¹ Уральский научно-практический центр радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства, Челябинск, Россия

² Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

Остеотропные бета-излучающие изотопы стронция ($^{89,90}\text{Sr}$) были основными источниками внутреннего облучения красного костного мозга (ККМ) для жителей прибрежных территорий реки Течи, подвергшейся радиоактивному загрязнению в 1950-е годы. Именно с дозой этих частиц связан повышенный риск лейкозов в когорте жителей ее прибрежных территорий. Важной задачей является совершенствование внутренней дозиметрии облучения ККМ. Она включает в себя разработку вычислительных фантомов, представляющих собой трехмерные модели участков скелета. Имитация переноса излучения в гетерогенной модели кости позволяет оценить коэффициенты перехода от активности радионуклида в кости к дозе на ККМ. Эта статья является продолжением работы по созданию набора вычислительных фантомов скелета людей разного возраста. Целью работы было разработать вычислительный фантом скелета годовалого ребенка для внутренней дозиметрии ККМ от инкорпорированных бета-излучателей. С помощью оригинальной методики SPSSD (stochastic parametric skeletal dosimetry) создавали трехмерные модели участков скелета в воксельной форме. Участки скелета с активным гемопоэзом моделировали как набор фантомов простой геометрической формы. Распределение ККМ в скелете, а также параметры фантомов оценивали на основе опубликованных результатов измерений реальных костей детей в возрасте от 9 месяцев до 2 лет. Для годовалого ребенка был сгенерирован вычислительный фантом, состоящий из 39 сегментов. Он имитирует структуру костной ткани и положение ККМ, а также популяционную вариабельность параметров микроструктуры и размеров скелета.

Ключевые слова: трабекулярная кость, кортикальная кость, дозиметрия костного мозга, вычислительные фантомы, Sr

Финансирование: работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы «Федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2035 года» и при финансовой поддержке Федерального медико-биологического агентства России.

Вклад авторов: П. А. Шарагин — получение, анализ и интерпретацию данных, написание и редактирование статьи; Е. И. Толстых — разработка методики исследования, редактирование статьи; Е. А. Шишкина — разработка концепции, редактирование статьи.

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

Статья получена: 14.06.2023 **Статья принята к печати:** 23.08.2023 **Опубликована онлайн:** 26.09.2023

DOI: 10.47183/mes.2023.030

COMPUTATIONAL RED BONE MARROW DOSIMETRY PHANTOM OF A ONE-YEAR-OLD CHILD ENABLING ASSESSMENT OF EXPOSURE DUE TO INCORPORATED BETA EMITTERS

Sharagin PA¹✉, Shishkina EA^{1,2}, Tolstykh EI¹

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

² Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

For residents of territories along the Techa River that was contaminated with radioactive substances in the 1950s, bone-seeking beta-emitting $^{89,90}\text{Sr}$ were the main source of internal exposure of active (red) bone marrow (AM). The dose of these radionuclides conditions the severity of leukemia risk for them. Improvement of the methods of internal AM dosimetry is an important task. Computational 3D phantoms of the skeleton sites are a component of the solution for this task. Simulation of radiation transfer in a heterogeneous bone model allows estimating the dose conversion factors from radionuclide activity to AM dose. This manuscript continues the series of papers covering the development of a set of computational phantoms of a reference human being of different age. The objective of the study was to develop a computational phantom of a one-year-old child skeleton for internal AM dosimetry (exposure due to incorporated beta emitters). Using the original SPSSD (stochastic parametric skeletal dosimetry) model, we develop voxel 3D models of skeletal sites. Skeleton sites with active hematopoiesis were modeled as a set of phantoms of simple geometries. Distribution of AM throughout the skeleton and parameters of the phantoms were assessed on the basis of the published results of measurement done in real bones of children aged 9 months to 2 years. The generated computational phantom of a one-year-old child consisted of 39 segments. It simulates the structure of the bone tissue, location of AM, and population variability of the skeleton microstructure and size parameters.

Keywords: trabecular bone, cortical bone, bone marrow dosimetry, computational phantoms, Sr

Funding: the work was part of the Federal Target Program "Ensuring Nuclear and Radiation Safety for 2016-2020 and up to 2035", with financial support from the Federal Medical Biological Agency of Russia.

Author contribution: Sharagin PA — data generation, analysis, interpretation, manuscript authoring and editing; Tolstykh EI — study methodology development, manuscript editing; Shishkina EA — conceptualization, manuscript editing.

✉ **Correspondence should be addressed:** Pavel A. Sharagin
Vorovsky, 68 A, Chelyabinsk, 454141, Russia; sharagin@urcrm.ru

Received: 14.06.2023 **Accepted:** 23.08.2023 **Published online:** 26.09.2023

DOI: 10.47183/mes.2023.030

Попадание радионуклидов в организм человека может приводить к внутреннему облучению тканей и органов. Один из наиболее радиочувствительных органов — красный костный мозг (ККМ). Находясь внутри полостей скелета, клетки ККМ являются основной мишенью облучения для остеотропных радионуклидов, которые

накапливаются в минерализованной костной ткани. Наиболее опасны из таких элементов $^{89,90}\text{Sr}$. Именно эти изотопы были основными источниками облучения ККМ для жителей прибрежных территорий реки Течи, загрязненной радионуклидами в 1950-е годы. Так, накопленные за время жизни поглощенные дозы на ККМ в когорте реки Теча

в среднем составляли 0,35 Гр, но у ряда лиц они превышали 1 Гр и могли достигать 7 Гр, что приводило к возникновению хронического лучевого синдрома и увеличивало риск развития лейкозов [1–4]. При этом вклад в дозу на ККМ составлял 61–94% — для ^{90}Sr , и 2,5–3,2% — для ^{89}Sr [5]. Облучению подверглись люди различного возраста, в том числе маленькие дети. Оценка доз для облученного населения может помочь подготовиться к потенциальным радиационным ситуациям. Предыдущие оценки доз на ККМ базировались на устаревших методах дозиметрического моделирования [6]. Уточнение доз на ККМ позволит с большей надежностью оценить радиационные риски лейкозов в Уральской когорте аварийно-облученного населения [7]. Для оценки доз на ККМ необходимо оценить удельную активность радионуклида в ткани-источнике, коэффициенты перехода (DF) от удельной активности источника излучения к мощности поглощенной дозы в мишени. Для расчета удельной активности радионуклида используют биокинетические модели, которые описывают распределение и транспорт радионуклида по тканям организма после его поступления [5]. Для расчета DF используют дозиметрическое моделирование, которое включает имитацию переноса излучений, возникающих при радиоактивном распаде изотопов стронция в костной ткани-источнике (кость), и поглощение энергии в ККМ — ткани-мишени, с соблюдением геометрии облучения. Поэтому важным этапом работы по дозиметрическому моделированию является создание вычислительных фантомов кости, которые представляют собой суррогат реальных тканей организма (ККМ и кость), репрезентативно описывающий геометрию тканей-источников и мишеней, в котором имитируется транспорт излучений. Следует отметить, что существующие сегодня подходы для моделирования формы и структуры кости основаны на анализе изображений компьютерной томографии (КТ) отдельных участков кости, полученных посмертно [6, 8–12]. Использование аутопсийного материала ограничивает количество объектов, используемых для оценок параметров фантомов и не позволяет учитывать индивидуальную вариабельность размеров костей человека.

В ФГБУН УНПЦ РМ был разработан оригинальный параметрический метод стохастического моделирования костных структур, SPSPD-моделирование (от англ. *stochastic parametric skeletal dosimetry*) [13]. Согласно методу, параметры фантомов определяют по многочисленным опубликованным результатам измерений костей. Таким образом SPSPD-моделирование позволяет оценивать неопределенности, связанные с вариабельностью параметров скелета у разных людей. Вычислительный фантом кости внутри заполнен спонгиозой, представляющей собой совокупность трабекулярной кости и ККМ, а снаружи покрыт плотным слоем кортикальной кости. Трабекулярная кость моделируется как сеть стержневидных тяжей — трабекул. Несмотря на то что такая модель является упрощенным представлением реальной кости, она хорошо подходит для внутренней дозиметрии остеотропных бета-излучателей [13]. Адекватность модели продемонстрирована в опубликованных численных экспериментах [14, 15], в результате которых были получены энергетические зависимости для SPSPD-фантомов, которые сопоставляли с опубликованными данными [12].

Представленная работа посвящена созданию вычислительного фантома скелета годовалого ребенка, т. е. она является очередным этапом работы по созданию

набора вычислительных фантомов стандартного человека для разных возрастных групп. Ранее опубликовано исследование, посвященное созданию вычислительного фантома скелета новорожденного [16].

Цель исследования — разработка вычислительного фантома скелета годовалого ребенка для дозиметрии ККМ от инкорпорированных в кости бета-излучающих радионуклидов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для создания фантомов использовали оригинальную методику SPSPD. Дозиметрическое моделирование проводили только для участков скелета с активным гемопоэзом (гемопоэтических сайтов). Набор гемопоэтических сайтов определяли согласно опубликованным данным о распределении ККМ внутри скелета [17]. SPSPD-фантом гемопоэтических сайтов скелета состоит из набора меньших фантомов — базовых фантомов сегментов кости (БФСК) простой геометрической формы, описывающих отдельные участки костей скелета. Определение параметров базовых фантомов сегментов кости по данным литературы представлено ниже.

Для оценки размерных характеристик кости годовалого ребенка рассматривали статьи в рецензируемых изданиях, атласы, руководства, монографии и диссертации. Кроме того, учитывали электронные ресурсы, содержащие коллекции рентгеновских снимков. Для анализа собирали результаты измерений людей/образцов, которые авторы определили, как здоровые и не имеющие заболеваний, приводящих к деформации кости. Этническая принадлежность — европеоиды и монголоиды, так как эти группы характерны для Уральского региона. Возраст субъектов — от 9 месяцев до 2 лет.

Для каждого гемопоэтического сайта по опубликованным данным оценивали линейные размеры, толщину кортикального слоя кости ($Ct.Th.$) и характеристики микроархитектуры кости: толщину трабекул ($Tb.Th.$), размер межтрабекулярного пространства ($Tb.Sp.$), долю костной ткани в объеме спонгиозы (BV/TV). В рассмотрение принимались данные измерений линейных размеров костей скелета с помощью различных техник: микрометров, анатомических боксов, ультразвуковых и рентгенологических исследований, а также КТ. Данные гистоморфометрии и микро-КТ использовали для оценки параметров трабекулярной кости ($Tb.Th.$, $Tb.Sp.$, BV/TV) и толщины кортикального слоя.

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, для каждой группы вводили взвешивающий коэффициент (W_N), который учитывал количество (N) исследуемых субъектов: $W_N = 1$, если $N \geq 25$; $W_N = N/25$, если $N < 25$. Методы отбора и анализа литературных данных подробно описаны ранее [18–21].

После получения набора средне популяционных характеристик размеров и формы костей, каждый гемопоэтический сайт был разбит на небольшие сегменты, описываемые простой геометрической формой с гомогенной микроархитектурой кости и толщиной кортикального слоя. Такая сегментация позволяет учесть неоднородную структуру трабекулярной и кортикальной

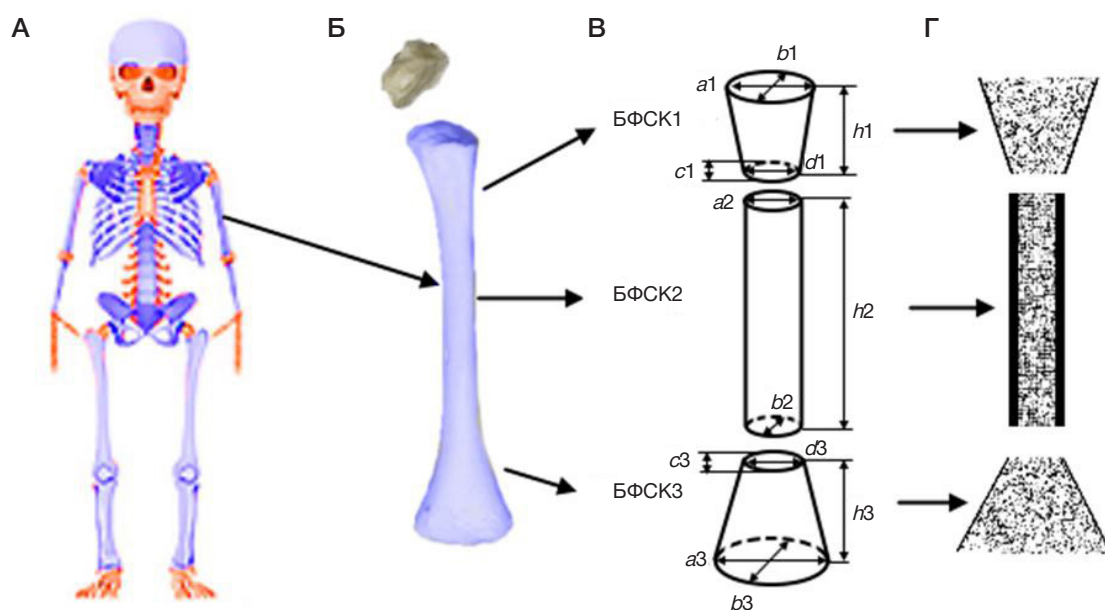


Рис. 1. Сегментация гемопоэтического сайта скелета годовалого ребенка на примере плечевой кости. **А.** Скелет годовалого ребенка (синим цветом выделены участки скелета с активным гемопоэзом). **Б.** Плечевая кость. **В.** Схема разделения кости на БФСК и их размерные характеристики. **Г.** БФСК плечевой кости в воксельном представлении в разрезе (черным цветом показаны воксели, имитирующие кость, белым — ККМ)

кости внутри одного гемопоэтического сайта, а также упрощает процесс моделирования. Процесс сегментации подробно описан [18, 19].

Каждый фантом включает в себя описание моделируемых сред и описание геометрии тканей источников и мишеней. ККМ и минерализованная костная ткань (в составе трабекулярной и кортикальной кости) являются средами, составляющими БФСК. Химический состав и плотность моделируемых сред определяли согласно опубликованным данным [22] и применяли для всех фантомов годовалого ребенка.

Для каждого сегмента в оригинальной программе Trabecula [23] был сгенерирован БФСК в воксельной форме. Воксели в составе БФСК имитируют либо минерализованную кость, либо костный мозг (КМ), в зависимости от положения центра вокселя в фантоме. Трабекулярную (ТК) и кортикальную (КК) кость рассматривали в качестве тканей-источников, а костный мозг — в качестве ткани-детектора. КМ был равномерно распределен между трабекулами внутри БФСК. Размер вокселя отличался для разных фантомов и не превышал 70% от толщины трабекулы [23, 24]. Размер вокселя в

смоделированных фантомах варьировал от 50 до 200 мкм. Расчет объемов тканей-источников и ткани-детектора автоматически происходил в программе «Trabecula» для каждого БФСК.

Гемопоэтические сайты годовалого ребенка, процесс сегментации, а также смоделированные БФСК представлены на примере плечевой кости (рис. 1).

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

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

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

Таблица 1. Массовая доля ККМ (% от общей массы ККМ в скелете) в основных гемопоэтических сайтах скелета ребенка в возрасте 1 год [15]

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

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

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	–

Согласно данным табл. 1, скелет годовалого ребенка включает в себя 13 гемопозитических сайтов для моделирования. Доля ККМ от общего содержания в скелете в них варьирует от 0,9 до 28,7%.

Так же как и для новорожденного [16], для годовалого ребенка в рамках SPSPD-подхода не были смоделированы следующие участки скелета: эпифизы трубчатых костей, грудина, кости лицевого отдела черепа и отростки грудных, поясничных и шейных позвонков, поскольку, по данным литературы, они содержат очень мало ККМ либо образованы хрящевой тканью [26–31].

Химический состав моделируемых сред был выбран на основе данных МКРЗ [22] для взрослых (табл. 2).

Плотность минерализованной костной ткани принимали на основе результатов измерений плотности кортикальной кости детей в возрасте 1 год [25] и считали равной 1,70 г/см³. Плотность красного костного мозга принимали равной плотности воды и считали равной 1 г/см³ [16].

Параметры спонгиозы оценивали на основе опубликованных данных, анализ опубликованных данных и расчет среднепопуляционных значений параметров спонгиозы подробно описаны ранее [21]. Значения параметров микроархитектуры БФСР годовалого ребенка представлены в табл. 3.

Линейные размеры и толщина кортикального слоя, принятые для БФСР годовалого ребенка, представлены в табл. 4.

Фантом гемопозитических сайтов скелета новорожденного состоит из 39 БФСР (табл. 4). В зависимости от формы моделируемых гемопозитических

сайтов для их описания использовали разное число БФСР: от 1 (ребра) до 9 (крестец).

Большая часть БФСР представлена цилиндрами и прямоугольными параллелепипедами. Размеры фантомов варьируют в широких пределах: от 2,7 до 35,8 мм. Фантомы, описывающие позвоночник, не покрыты кортикальным слоем, что связано с незавершенным процессом окостенения (табл. 4). Наибольшее значение *St.Th.* для БФСР годовалого ребенка характерно для тела бедренной и берцовой костей (2,3 мм). В первый год жизни происходит интенсивное окостенение костей свода черепа, закрываются роднички, и, как следствие, БФСР для свода черепа годовалого ребенка, в отличие от новорожденного, покрыты слоем кортикальной кости. Параметры спонгиозы для разных БФСР значительно различались. Отношение *BV/TV* в БФСР варьирует от 14 до 52%, *Tb.Th.* — от 0,09 до 0,29 мм, *Tb.Sp.* — от 0,48 до 0,98 мм (табл. 3).

Индивидуальная вариабельность размерных параметров БФСР в среднем составила 14%, наибольшее значение вариабельности оценено для тела акромиона лопатки (42%), а наименьшее — для вертлужной части лобковой кости (3%). Вариабельность толщины кортикального слоя в среднем равна 20%, с максимальным значением 47% — для крыла подвздошной кости. Вариабельность параметров спонгиозы в среднем составила 25% при минимальном значении, равном 9%, и максимальном — 52%.

Значения вариабельности были использованы для моделирования ДФСР. Объемы ДФСР варьируют в широких пределах и могут отличаться от объема БФСР

Таблица 3. Параметры спонгиозы, принятые для БФСР годовалого ребенка [32–42] (в скобках дан CV, %)

Гемопозитический сайт	<i>BV/TV</i> , %	<i>Tb.Th.</i> , мм	<i>Tb.Sp.</i> , мм
Бедро	22 (32)	0,16 (38)	0,54 (20)
Плечо	22 (32)	0,17 (17)	0,58 (47)
Ребра	29 (34)	0,23 (35)	0,51 (14)
Берцовые	20 (15)	0,09 (9)	0,74 (11)
Тазовые кости	23 (13)	0,12 (20)	0,48 (23)
Череп	52 (10)	0,29 (31)	0,57 (35)
Ключица*	29 (31)	0,15 (13)	0,80 (25)
Локтевая, лучевая*	16 (31)	0,13 (15)	0,77 (16)
Лопатка*	22 (36)	0,19 (52)	0,96 (23)
Шейные позвонки	20 (20)	0,18 (13)	0,60 (20)
Грудные позвонки + поясничные позвонки + крестец	14 (29)	0,10 (42)	0,60 (20)

Примечание: * — параметры спонгиозы рассчитаны по результатам измерений схожих костей или по данным для других возрастов, способ расчета описан ранее [20].

Таблица 4. Линейные размеры и кортикальная толщина, принятые для БФСР годовалого ребенка

Гемопозитический сайт	Сегмент	Форма ¹	Параметры фантома, мм (в скобках дан CV, %) ²						Источники данных
			<i>h</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>Ct.Th.</i>	
Бедро	Трубка диафиза ⁴	ц	30	11,2 (7)	11,2 (7)			2,3 (17)	43–47
	Проксимальный конец	дц	35,8 (4)	34 (12)	18 (8)	11,2 (7)	11,2 (7)	0,7 (17)	
	Дистальный конец	дц	35,8 (4)	34 (12)	18 (8)	11,2 (7)	11,2 (7)	0,6 (17)	
Плечо	Трубка диафиза ⁴	ц	30	9,1 (13)	9,1 (13)			1,6 (19)	43, 45, 47, 48
	Проксимальный конец	дц	16 (13)	19,8 (13)	19,8 (13)	9,1 (13)	9,1 (13)	0,5 (20)	
	Дистальный конец	дц	16 (13)	19,8 (16)	9,1 (13)	9,1 (13)	9,1 (13)	0,4 (20)	
Ребра	Ребра ⁴	п	8,7 (32)	30	3,9(35)			0,5 (33)	49, 50
Крестец	Тело 1-го позвонка	п	9,2 (20)	25,2 (10)	12,5 (10)				51–55
	Тело 2-го позвонка	п	9,2 (20)	20,2 (10)	10 (10)				
	Тело 3-го позвонка	п	8,3 (20)	15,1 (10)	8,8 (10)				
	Тело 4-го позвонка	п	5,5 (20)	15,1 (10)	8,8 (10)				
	Тело 5-го позвонка	п	5,5 (20)	12,6 (10)	5 (10)				
	Крыло 1-го позвонка	п	9,2 (20)	10,7 (10)	12,5 (10)				
	Крыло 2-го позвонка	п	9,2 (20)	8 (10)	10 (10)				
	Крыло 3-го позвонка	п	8,3 (20)	8 (10)	8,8 (10)				
	Крыло 4-го позвонка	п	5,5 (20)	5,4 (9)	8,8 (10)				
Берцовые	Малая берцовая кость ⁴	ц	30	4,4 (11)	4,4 (11)			1,2 (17)	56
	Трубка диафиза б.б. ⁴	ц	30	9 (13)	9 (13)			2,3 (9)	55–58
	Проксимальный конец б.б.	дц	38,9 (6)	27,2 (12)	15,2 (18)	9 (13)	9 (13)	0,5 (14)	
	Дистальный конец б.б.	дц	22,3 (6)	16,8 (23)	16,8 (23)	9 (13)	9 (13)	0,5 (14)	
Тазовые кости	Подвздошная кость часть 1 ³	п	5 (18)	30	30			1,2 (33) 0,5 (47)	59–64
	Подвздошная кость часть 2	п	5 (18)	30	30			0,4 (30)	
	Подвздошная кость вертлужная часть	дц	14,5 (10)	26,1 (9)	10 (30)	23,6 (22)	17,8 (40)	0,4 (30)	
	Вертлужная часть лобковой кости	ц	4,8 (15)	15,5 (3)	10,9 (7)	7,7 (11)	7,7 (11)	0,4 (30)	
	Лобковая кость (верхняя ветвь)	ц	19,3 (15)	7,7 (11)	7,7 (11)			0,4 (30)	
	Вертлужная часть седалищной кости	п	17,5 (15)	17,5 (15)	17,8 (30)	17,5(15)		0,4 (3)	
	Бугристость седалищной кости	ц	13 (15)	11,7 (15)	11,9 (15)			0,4 (3)	
Череп	Плоские кости свода ⁴	п	2,7 (30)	30	30			0,7 (29)	65–68
Ключица	Тело	ц	42,2 (11)	7,2 (10)	5,2 (10)			0,9 (10)	69–72
	Грудинный конец	дц	7,4 (11)	14,1 (10)	12,7 (9)	7,2 (10)	5,2 (10)	0,4 (10)	
	Акромиальный конец	дц	7,4 (11)	12,1 (10)	7,2 (19)	7,2 (10)	5,2 (10)	0,4 (10)	
Локтевая, лучевая	Трубка диафиза ⁴	ц	30	5,3 (6)	5,3 (6)			1,1 (13)	46, 56, 57
	Конец	дц	16,2 (6)	8 (6)	5,3 (6)	5,3 (6)	5,3 (6)	0,4 (29)	
Лопатка	Гленоид	ц	6,8 (26)	17,5 (18)	10,2 (29)			0,5 (29)	73–77
	Акромион	п	7 (19)	16 (41)	13 (42)			0,4 (13)	
	Тело ⁴	п	2,7 (13)	30	30			0,4 (13)	
Шейные позвонки	Тело позвонка	ц	5,8 (9)	9,7 (7)	12,6 (7)				78, 79
Грудные позвонки	Тело позвонка	ц	8 (15)	11,9 (13)	15 (23)				78, 80
Поясничные позвонки	Тело позвонка	ц	9,6 (16)	9,6 (16)	21 (3)				78, 53

Примечание: ¹ — форму фантома обозначали следующим образом: ц — цилиндр, дц — деформированный цилиндр, п — прямоугольный параллелепипед, э — эллипсоид; ² — размеры БФСР 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; ³ — толщину кортикального слоя принимали разной для внутренней (медиальной) и внешней (ягодичной) поверхностей данного сегмента подвздошной кости (см. рис. 1); ⁴ — БФСР 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 целиком [13, 16].

более чем в 3 раза как в меньшую, так и в большую сторону. В дальнейшей работе как для БФСР, так и для ДФСР будут рассчитаны *DF*. Среднеквадратическое отклонение *DF*, рассчитанных для ДФСР, от *DF*, рассчитанных для БФСР, будет характеризовать популяционную вариабельность *DF*.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе, посвященной новорожденному [16], было показано, что массы сгенерированных фантомов соответствуют массам реальных костей. Мы не смогли

Таблица 5. Сравнение объемов БФСК новорожденного и годовалого ребенка

БФСК	Моделируемая среда	Объем моделируемой структуры, см ³		
		Новорожденный	1 год	1 год / новорожденный
Дистальный конец бедренной кости	КМ	1,36	6,53	4,8
	ТК	0,79	1,88	2,38
	КК	0,37	1,41	3,81
	Весь БФСК	2,52	9,82	3,9
Ключица, грудинный конец	КМ	0,19	0,35	1,84
	ТК	0,08	0,14	1,75
	КК	0,05	0,09	1,8
	Весь БФСК	0,32	0,58	1,81
Тело поясничного позвонка	КМ	0,36	1,32	3,67
	ТК	0,29	0,2	0,69
	Весь БФСК	0,65	1,52	2,34
Тело шейного позвонка	КМ	0,06	0,45	7,5
	ТК	0,08	0,11	1,38
	Весь БФСК	0,14	0,56	4

провести подобное сравнение для фантома годовалого, так как в доступной литературе нами не было найдено результатов измерений сырых костей для скелета детей в возрасте 1 год. Однако интересно сравнить фантомы скелетов годовалого ребенка и новорожденного. В целом, вычислительный фантом скелета годовалого ребенка состоит из большего количества БФСК, чем фантом новорожденного (34 БФСК), и обусловлен окостенением и увеличением размера крестца, что потребовало применить дополнительную сегментацию подвздошной кости. В то же время уже в первый год жизни происходит замещение ККМ желтым костным мозгом в костях кистей и стоп, таким образом, эти участки не моделируются в рамках создания фантома годовалого ребенка.

Естественно, что объем аналогичных БФСК увеличивается с возрастом вместе с размерами костей. Сравнение объемов фантомов участков скелета новорожденного и годовалого ребенка на примере дистального участка бедренной кости, ключицы, тел шейного и поясничного позвонков представлено в табл. 5.

Объем БФСК в составе фантома годовалого ребенка существенно выше, чем у новорожденного (табл. 5). Объемы моделируемых сред также увеличиваются в подавляющем большинстве фантомов. Причем, если увеличение объема тканей источников (ТК и КК) в различных БФСК в среднем составляет 1,5 раза, то приращение объема ткани-мишени в среднем составило 4,5 раза. Уменьшение объема трабекулярной кости (ТК) для фантомов тел поясничных позвонков определяется уменьшением параметра BV/TV с 0,45 до 0,14, согласно литературным данным (табл. 3). Для большинства БФСК можно наблюдать существенное

увеличение объема КК за первый год жизни (за исключением БФСК тел позвонков), в среднем объем КК за этот период увеличился в 2,3 раза. Общий объем БФСК для ребенка в возрасте 1 год, в среднем, больше объема фантома новорожденного в 2,4 раза.

ВЫВОДЫ

В результате данной работы были разработаны вычислительные фантомы основных участков скелета с активным гемопоэзом для годовалого ребенка. Разработку данных фантомов проводили по той же методологии, что и для новорожденного. Смоделированные фантомы имитируют структуру костной ткани, а также популяционную вариабельность размеров структур отдельных костей. Представленный фантом для годовалого ребенка в дальнейшем будет использован для расчетов DF для $^{89,90}Sr$, которые, в свою очередь, необходимы для оценки уточненных коэффициентов, связывающих индивидуальное поступление радионуклида и дозу на ККМ, что поможет усовершенствовать дозовые оценки для жителей Уральского региона. Следует отметить, что SPSPD-фантом может быть использован для расчетов DF для других остеотропных бета-излучателей, в том числе применяемых в радионуклидной терапии, таких как ^{89}Sr , ^{32}P , ^{186}Re , ^{188}Re , ^{117}mSn . В качестве направления дальнейшей работы мы также планируем создать SPSPD-фантомы скелета для других возрастных групп: 5 лет, 10 лет, а также 15-летних детей и взрослых. SPSPD-фантомы могут быть использованы для дозиметрии инкорпорированных остеотропных бета-излучателей у населения при попадании радионуклидов в окружающую среду.

Литература

1. Degteva MO, Shagina NB, Vorobiova MI, Shishkina EA, Tolstykh EI, Akleyev AV. Contemporary Understanding of Radioactive Contamination of the Tcha River in 1949-1956. *Radiats Biol Radioecol*. 2016; 56 (5): 523–34. PMID: 30703313. Russian.
2. Krestinina LY, Epifanova S, Silkin S, Mikryukova L, Degteva M, Shagina N, et al. Chronic low-dose exposure in the Tcha 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. Аклеев 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. Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, et al. Enhancements in the Techa river dosimetry system: TRDS-2016D Code for reconstruction of deterministic estimates of dose from environmental exposures. *Health Phys*. 2019; 117 (4): 378–87. DOI: 10.1097/HP.0000000000001067.
 6. Spiers FW, Beddoe AH, Whitwell JR. Mean skeletal dose factors for beta-particle emitters in human bone. Part I: volume-seeking radionuclides. *The British journal of radiology*. 1978; 51 (608): 622–7.
 7. Силкин С. С., Крестинина Л. Ю., Старцев Н. В, Аклев А. В. Уральская когорта аварийно-облученного населения. *Медицина экстремальных ситуаций*. 2019; 21 (3): 393–402.
 8. 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 Dec 21; 61 (24): 8794–824. Epub 2016 Nov 29.
 9. 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.
 10. 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.
 11. 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.
 12. 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.
 13. Degteva MO, Tolstykh EI, Shishkina EA, Sharagin PA, Zalyapin VI, Volchkova AYU, et al. *PLoS One*. 2021; 16 (10): e0257605. DOI: 10.1371/journal.pone.0257605. PMID: 34648511; PMCID: PMC8516275. *PlosOne*.
 14. Дёгтева М. О., Шишкина Е. А., Толстых Е. И., Залыпин В. И., Шарагин П. А., Смит М. А., и др. Методологический подход к разработке дозиметрических моделей скелета человека для бета-излучающих радионуклидов. *Радиационная гигиена*. 2019; 12 (2). DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-66-75.
 15. Volchkova AYU, Sharagin PA, Shishkina EA. Internal bone marrow dosimetry: the effect of the exposure due to 90Sr incorporated in the adjacent bone segments. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software*. 2022; 15 (4): 44–58. DOI: 10.14529/mmp220404.
 16. Шарагин П. А., Шишкина Е. А., Толстых Е. И. Вычислительный фантом для дозиметрии красного костного мозга новорожденного ребенка от инкорпорированных бета-излучателей. *Медицина экстремальных ситуаций*. 2022; (4): 74–82. DOI: 10.47183/mes.2022.045.
 17. Cristy M. Active bone marrow distribution as a function of age in humans. *Phys Med Biol*. 1981; 26 (3): 389–400.
 18. 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. *RAD Conference Proceedings*. 2018; (3): 154–8. DOI: 10.21175/RadProc.2018.33.
 19. 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; с. 200–204.
 20. Толстых Е. И., Шарагин П. А., Шишкина Е. А., Дегтева М. О. Формирование доз облучения красного костного мозга человека от 89,90Sr, оценка параметров трабекулярной кости для дозиметрического моделирования. В сборнике: Материалы международной научной конференции "Современные проблемы радиобиологии". Беларусь, Гомель, 23-24 сентября 2021; с. 176–179.
 21. 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.
 22. Valentin J. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values. *Annals of the ICRP*. 2002; 32 (3–4): 1–277.
 23. 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.
 24. 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.
 25. Robinson RA. Chemical analysis and electron microscopy of bone. In: Rodahl K, Nicholson JT, Brown EM editors. *Bone as a tissue*. New York: McGraw-Hill, 1960; p. 186–250.
 26. Vogler JB 3rd, Murphy WA. Bone marrow imaging. *Radiology*. 1988; 168 (3): 679–93.
 27. Vande Berg BC, Malghem J, Lecouvet FE, Maldague B. Magnetic resonance imaging of the normal bone marrow. *Skeletal Radiology*. 1998; 27: 471–83.
 28. Vande Berg BC, Malghem J, Lecouvet FE, Maldague B. Magnetic resonance imaging of normal bone marrow. *Eur Radiol*. 1998; 8 (8): 1327–34.
 29. 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.
 30. 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.
 31. Cunningham C, Scheuer L, Black S. *Developmental juvenile osteology*. Elsevier Academic Press, 2016.
 32. Ryan TM, Krovitz GE. Trabecular bone ontogeny in the human proximal femur. *J Hum Evol*. 2006; 51 (6): 591–602.
 33. Milovanovic P, Djonic D, Hahn M, Amling M, Busse B, Djuric M. Region-dependent patterns of trabecular bone growth in the human proximal femur: A study of 3D bone microarchitecture from early postnatal to late childhood period. *Am J Phys Anthropol*. 2017; 164 (2): 281–91. DOI: 10.1002/ajpa.23268. Epub 2017 Jun 20.
 34. Saers JP, Cazorla-Bak Y, Shaw CN, Stock JT, Ryan TM. Trabecular bone structural variation throughout the human lower limb. *J Hum Evol*. 2016; 97: 97–108. DOI: 10.1016/j.jhevol.2016.05.012.
 35. Ryan TM, Raichlen DA, Gosman JH. Structural and mechanical changes in trabecular bone during early development in the human femur and humerus. In: *Building bones: bone formation and development in anthropology*. Cambridge University Press, 2017; p. 281–302. Available from: <https://doi.org/10.1017/9781316388907.013>.
 36. Byers S, Moore AJ, Byard RW, Fazzalari NL. Quantitative histomorphometric analysis of the human growth plate from birth to adolescence. *Bone*. 2000; 27 (4): 495–501.
 37. Gosman JH, Ketcham RA. Patterns in ontogeny of human trabecular bone from SunWatch Village in the Prehistoric Ohio Valley: general features of microarchitectural change. *Am J Phys Anthropol*. 2009; 138 (3): 318–32. DOI: 10.1002/ajpa.20931. PubMed PMID: 18785633.
 38. Volpato V. Bone endostructure morphogenesis of the human ilium. *Comptes rendus Palévol*. 2008; 7: 463–71. DOI: 10.1016/j.crvp.2008.06.001.
 39. Glorieux FH, Travers R, Taylor A, Bowen JR, Rauch F, Norman M, et al. Normative data for iliac bone histomorphometry in growing children. *Bone*. 2000; 26 (2): 103–9.
 40. 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.
41. 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.
 42. Acquaah F, Robson Brown KA, Ahmed F, Jeffery N, Abel RL. Early trabecular development in human vertebrae: overproduction, constructive regression, and refinement. *Front Endocrinol (Lausanne).* 2015; 6: 67. DOI: 10.3389/fendo.2015.00067. eCollection 2015.
 43. 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.
 44. 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.
 45. Maresh MM. Measurements from roentgenograms. In: McCammon RW, editor. *Human Growth and Development.* Springfield, IL: Charles C. Thomas, 1970; p. 157–200.
 46. 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; 11: 435–46.
 47. Svadovsky VS. Age-related bone remodeling. Moscow, 1961.
 48. 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.
 49. 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
 50. Pfeiffer S. Cortical Bone Histology in Juveniles. Available from: https://www.researchgate.net/publication/303179375_Cortical_bone_histology_in_Juveniles
 51. 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>.
 52. Кузнецов Л. Е. Переломы таза у детей: морфология, биомеханика, диагностика. М.: Фолиум, 1994.
 53. Mavrych V, Bolgova O, Ganguly P, Kashchenko S. Age-related changes of lumbar vertebral body morphometry. *Austin J Anat.* 2014; 1 (3): 7.
 54. Dimeglio A, Bonnel F, Canavese F. The Growing Spine. In: Jean Marc Vital, Derek Thomas Cawley, editors. *Spinal Anatomy. Modern Concepts.* Springer, 2020; p. 25–52.
 55. Андроневский А. Анатомия ребенка. Бухарест: Меридиан, 1970.
 56. 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.
 57. 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.
 58. Lopez-Costas O, Rissech C, Tranco G, Turbón D. Postnatal ontogenesis of the tibia. Implications for age and sex estimation. *Forensic Sci Int.* 2012; 214 (1–3): 207.e1–11. DOI: 10.1016/j.forsciint.2011.07.038. Epub 2011 Aug 20. PubMed PMID: 21862250.
 59. Blake KAS. An investigation of sex determination from the subadult pelvis: a morphometric analysis. Doctoral Dissertation, University of Pittsburgh. 2011.
 60. 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.
 61. 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
 62. Corron L, Marchal F, Condemni S, Chaumoitte 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.
 63. Parfitt AM, Travers R, Rauch F, Glorieux FH. Structural and cellular changes during bone growth in healthy children. *Bone.* 2000; 27 (4): 487–94. PMID: 11033443.
 64. 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.
 65. 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.
 66. Margulies S, Coats B. Experimental injury biomechanics of the pediatric head and brain. Chapter 4. In: Crandall JR, Myers BS, Meaney DF, Schmidtke SZ, editors. *Pediatric Injury Biomechanics Springer Science + Business Media New York.* 2013; p. 157–190.
 67. 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 May 18; 10 (5): e0127322. DOI: 10.1371/journal.pone.0127322. eCollection 2015.
 68. 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.
 69. 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.
 70. Bleuze MM, Wheeler SM, Williams LJ, Dupras TL. Growth of the pectoral girdle in a sample of juveniles from the kellis 2 cemetery, Dakkeh Oasis, Egypt. *Am J Hum Biol.* 2016; 28 (5): 636–45.
 71. Black SM, Scheuer JL. Age changes in the clavicle: from the early neonatal period to skeletal maturity. *International Journal of Osteoarchaeology.* 1996; 6: 425–34.
 72. 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.
 73. Vallois HV. L'omoplate humaine. *Bulletin de la Société d'Anthropologie de Paris.* 1946; 7: 16–99.
 74. 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.
 75. Rissech C, Black S. Scapular development from neonatal period to skeletal maturity. A preliminary study. *Int J Osteoarchaeol.* 2007; 17: 451–64.
 76. Cardoso HFV, Spake L, Humphrey LT. Age estimation of immature human skeletal remains from the dimensions of the girdle bones in the postnatal period. *Am J Phys Anthropol.* 2017; 163 (4): 772–83. DOI: 10.1002/ajpa.23248. Epub 2017 May 24. PubMed PMID: 28542741.
 77. Badr El Dine F, Hassan H. Ontogenetic study of the scapula among some Egyptians: Forensic implications in age and sex estimation using Multidetector Computed Tomography, *Egyptian Journal of Forensic Sciences.* 2015; 6 (2): 56–77.
 78. 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.
 79. Johnson KT, Al-Holou WN, Anderson RC, Wilson TJ, Karnati T, Ibrahim M, et al. Morphometric analysis of the developing pediatric cervical spine. *J Neurosurg Pediatr.* 2016; 18 (3): 377–89. DOI: 10.3171/2016.3.PEDS1612. Epub 2016 May 27. PubMed PMID: 27231821.
 80. Comeau A. Age-related changes in geometric characteristics of the pediatric thoracic cage and comparison of thorax shape with a pediatric CPR Manikin. PhD thesis. 2010.

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. PMID: 30703313. Russian.
2. Krestinina LY, Epifanova S, Silkin S, Mikryukova L, Degteva M, Shagina N, et al. 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. Hronicheskij luchevoj sindrom u zhitelej pribrezhnyh 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. Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, et al. Enhancements in the Techa river dosimetry system: TRDS-2016D Code for reconstruction of deterministic estimates of dose from environmental exposures. *Health Phys.* 2019; 117 (4): 378–87. DOI: 10.1097/HP.0000000000001067.
6. Spiers FW, Beddoe AH, Whitwell JR. Mean skeletal dose factors for beta-particle emitters in human bone. Part I: volume-seeking radionuclides. *The British journal of radiology.* 1978; 51 (608): 622–7.
7. Silkin SS, Krestinina LY, Starcev NV, Akleev AV. Ural'skaya kogorta avarijno-obluchennogo naseleniya. *Medicina ehkstremaal'nyh situacij.* 2019; 21 (3): 393–402. Russian.
8. 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 Dec 21; 61 (24): 8794–824. Epub 2016 Nov 29.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Degteva MO, Tolstykh EI, Shishkina EA, Sharagin PA, Zalyapin VI, Volchkova AYU, et al. PLoS One. 2021; 16 (10): e0257605. DOI: 10.1371/journal.pone.0257605. PMID: 34648511; PMCID: PMC8516275. PlosOne.
14. Dyogteva MO, Shishkina EA, Tolstykh EI, Zalyapin VI, Sharagin PA, Smit MA, i dr. Metodologicheskij podhod k razrabotke dozimetricheskijh modelej skeleta cheloveka dlya beta-izluchayushhih radionuklidov. *Radiacionnaya gigiena.* 2019; 12 (2). DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-66-75. Russian.
15. Volchkova AYU, Sharagin PA, Shishkina EA. Internal bone marrow dosimetry: the effect of the exposure due to 90Sr incorporated in the adjacent bone segments. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software.* 2022; 15 (4): 44–58. DOI: 10.14529/mmp220404.
16. Sharagin PA, Shishkina EA, Tolstykh EI. Vychislitel'nyj fantom dlya dozimetrii krasnogo kostnogo mozga novorozhdenного rebenka ot inkorporirovannyh beta-izluchatelej. *Medicina ehkstremaal'nyh situacij.* 2022; (4): 74–82. DOI: 10.47183/mes.2022.045. Russian.
17. Cristy M. Active bone marrow distribution as a function of age in humans. *Phys Med Biol.* 1981; 26 (3): 389–400.
18. 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. *RAD Conference Proceedings.* 2018; (3): 154–8. DOI: 10.21175/RadProc.2018.33.
19. Sharagin PA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Degteva MO. Dozimetriceskoe modelirovanie kosti dlya osteotropnyh beta-izluchayushhih radionuklidov: razmernye parametry i segmentaciya. V sbornike: *Materiyy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Sovremennye problemy radiobiologii". Belarus', Gomel', 23-24 sentyabrya 2021; s. 200–204. Russian.*
20. Tolstykh EI, Sharagin PA, Shishkina EA, Degteva MO. Formirovanie doz oblucheniya krasnogo kostnogo mozga cheloveka ot 89,90Sr, oцена parametrov trabekulyarnoj kosti dlya dozimetricheskogo modelirovaniya. V sbornike: *Materiyy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Sovremennye problemy radiobiologii". Belarus', Gomel', 23-24 sentyabrya 2021; s. 176–179. Russian.*
21. Tolstykh EI, Sharagin PA, Shishkina EA, Volchkova AYU, Degteva MO. Anatomico-morfologicheskij bazis dlya dozimetricheskogo modelirovaniya trabekulyarnoj kosti cheloveka s ispol'zovaniem stoxasticheskogo parametricheskogo podhoda. *Klinicheskij vestnik GNC FMBC im. A. I. Burnazyana.* 2022; 3: 25–40. Russian.
22. Valentin J. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values. *Annals of the ICRP. Annals of the ICRP.* 2002; 32 (3–4): 1–277.
23. 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.
24. 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.
25. Robinson RA. Chemical analysis and electron microscopy of bone. In: Rodahl K, Nicholson JT, Brown EM editors. *Bone as a tissue.* New York: McGraw-Hill, 1960; p. 186–250.
26. Vogler JB 3rd, Murphy WA. Bone marrow imaging. *Radiology.* 1988; 168 (3): 679–93.
27. Vande Berg BC, Malghem J, Lecouvet FE, Maldague B. Magnetic resonance imaging of the normal bone marrow. *Skeletal Radiology.* 1998; 27: 471–83.
28. Vande Berg BC, Malghem J, Lecouvet FE, Maldague B. Magnetic resonance imaging of normal bone marrow. *Eur Radiol.* 1998; 8 (8): 1327–34.
29. 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.
30. 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.
31. Cunningham C, Scheuer L, Black S. *Developmental juvenile osteology.* Elsevier Academic Press, 2016.
32. Ryan TM, Krovitz GE. Trabecular bone ontogeny in the human proximal femur. *J Hum Evol.* 2006; 51 (6): 591–602.
33. Milovanovic P, Djonic D, Hahn M, Amling M, Busse B, Djuric M. Region-dependent patterns of trabecular bone growth in the human proximal femur: A study of 3D bone microarchitecture from early postnatal to late childhood period. *Am J Phys Anthropol.* 2017; 164 (2): 281–91. DOI: 10.1002/ajpa.23268. Epub 2017 Jun 20.
34. Saers JP, Cazorla-Bak Y, Shaw CN, Stock JT, Ryan TM. Trabecular bone structural variation throughout the human lower limb. *J Hum Evol.* 2016; 97: 97–108. DOI: 10.1016/j.jhevol.2016.05.012.
35. Ryan TM, Raichlen DA, Gosman JH. Structural and mechanical changes in trabecular bone during early development in the human femur and humerus. In: *Building bones: bone formation and development in anthropology.* Cambridge University Press, 2017; p. 281–302. Available from: <https://doi.org/10.1017/9781316388907.013>.
36. Byers S, Moore AJ, Byard RW, Fazzalari NL. Quantitative histomorphometric analysis of the human growth plate from birth

- to adolescence. *Bone*. 2000; 27 (4): 495–501.
37. Gosman JH, Ketcham RA. Patterns in ontogeny of human trabecular bone from SunWatch Village in the Prehistoric Ohio Valley: general features of microarchitectural change. *Am J Phys Anthropol*. 2009; 138 (3): 318–32. DOI: 10.1002/ajpa.20931. PubMed PMID: 18785633.
 38. Volpato V. Bone endostructure morphogenesis of the human ilium. *Comptes rendus Palévol*. 2008; 7: 463–71. DOI: 10.1016/j.crpv.2008.06.001.
 39. Glorieux FH, Travers R, Taylor A, Bowen JR, Rauch F, Norman M, et al. Normative data for iliac bone histomorphometry in growing children. *Bone*. 2000; 26 (2): 103–9.
 40. 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.
 41. 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.
 42. Acquah F, Robson Brown KA, Ahmed F, Jeffery N, Abel RL. Early trabecular development in human vertebrae: overproduction, constructive regression, and refinement. *Front Endocrinol (Lausanne)*. 2015; 6: 67. DOI: 10.3389/fendo.2015.00067. eCollection 2015.
 43. 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.
 44. 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.
 45. Maresh MM. Measurements from roentgenograms. In: McCammon RW, editor. *Human Growth and Development*. Springfield, IL: Charles C. Thomas, 1970; p. 157–200.
 46. 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; 11: 435–46.
 47. Svadovsky VS. Age-related bone remodeling. Moscow, 1961.
 48. 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.
 49. Beresheim AC, Pfeiffer S, Grynaps M. Ontogenetic changes to bone microstructure in an archaeologically derived sample of human ribs. *J Anat*. 2019. DOI: 10.1111/joa.13116
 50. Pfeiffer S. Cortical Bone Histology in Juveniles. Available from: https://www.researchgate.net/publication/303179375_Cortical_bone_histology_in_Juveniles
 51. Hresko AM, Hinchliff 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>.
 52. Kuznecov LE. *Perelomy tazy u detej: morfologiya, biomexanika, diagnostika*. M.: Folium, 1994. Russian.
 53. Mavrych V, Bolgova O, Ganguly P, Kashchenko S. Age-related changes of lumbar vertebral body morphometry. *Austin J Anat*. 2014; 1 (3): 7.
 54. Dimeglio A, Bonnel F, Canavese F. The Growing Spine. In: Jean Marc Vital, Derek Thomas Cawley, editors. *Spinal Anatomy. Modern Concepts*. Springer, 2020; p. 25–52.
 55. Andronovskiy A. *Anatomy rebenka*. Buharest: Meridian, 1970.
 56. 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.
 57. 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.
 58. Lopez-Costas O, Rissech C, Trancho G, Turbón D. Postnatal ontogenesis of the tibia. Implications for age and sex estimation. *Forensic Sci Int*. 2012; 214 (1–3): 207.e1–11. DOI: 10.1016/j.forsci.2011.07.038. Epub 2011 Aug 20. PubMed PMID: 21862250.
 59. Blake KAS. An investigation of sex determination from the subadult pelvis: a morphometric analysis. Doctoral Dissertation, University of Pittsburgh. 2011.
 60. 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.
 61. 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.
 62. Corron L, Marchal F, Condemni 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.
 63. Parfitt AM, Travers R, Rauch F, Glorieux FH. Structural and cellular changes during bone growth in healthy children. *Bone*. 2000; 27 (4): 487–94. PMID: 11033443.
 64. 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.
 65. 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.
 66. Margulies S, Coats B. Experimental injury biomechanics of the pediatric head and brain. Chapter 4. In: Crandall JR, Myers BS, Meaney DF, Schmidtke SZ, editors. *Pediatric Injury Biomechanics* Springer Science + Business Media New York. 2013; p. 157–190.
 67. 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 May 18; 10 (5): e0127322. DOI: 10.1371/journal.pone.0127322. eCollection 2015.
 68. 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.
 69. 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.
 70. Bleuz MM, Wheeler SM, Williams LJ, Dupras TL. Growth of the pectoral girdle in a sample of juveniles from the kellis 2 cemetery, Dakhleh Oasis, Egypt. *Am J Hum Biol*. 2016; 28 (5): 636–45.
 71. Black SM, Scheuer JL. Age changes in the clavicle: from the early neonatal period to skeletal maturity. *International Journal of Osteoarchaeology*. 1996; 6: 425–34.
 72. 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.
 73. Vallois HV. L'omoplate humaine. *Bulletin de la Société d'Anthropologie de Paris*. 1946; 7: 16–99.
 74. 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.
 75. Rissech C, Black S. Scapular development from neonatal period to skeletal maturity. A preliminary study. *Int J Osteoarchaeol*. 2007; 17: 451–64.
 76. Cardoso HFV, Spake L, Humphrey LT. Age estimation of immature human skeletal remains from the dimensions of the girdle bones in the postnatal period. *Am J Phys Anthropol*. 2017; 163 (4): 772–83. DOI: 10.1002/ajpa.23248. Epub 2017 May 24. PubMed PMID: 28542741.
 77. Badr El Dine F, Hassan H. Ontogenetic study of the scapula among some Egyptians: Forensic implications in age and sex estimation using Multidetector Computed Tomography, *Egyptian Journal of Forensic Sciences*. 2015; 6 (2): 56–77.

78. Kneissel M, Roschger P, Steiner W, Schamall D, Kalchhauser 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.
79. Johnson KT, Al-Holou WN, Anderson RC, Wilson TJ, Karnati T, Ibrahim M, et al. Morphometric analysis of the developing pediatric cervical spine. *J Neurosurg Pediatr.* 2016; 18 (3): 377–89. DOI: 10.3171/2016.3. PEDS1612. Epub 2016 May 27. PubMed PMID: 27231821.
80. Comeau A. Age-related changes in geometric characteristics of the pediatric thoracic cage and comparison of thorax shape with a pediatric CPR Manikin. PhD thesis. 2010.