

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

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

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

² Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

Облучение ККМ (красного костного мозга) остеотропными радионуклидами может приводить к серьезным медицинским последствиям. В частности, увеличение риска развития лейкозов у людей, подвергшихся радиационному воздействию в результате загрязнения реки Течи в 1950-е гг., связано с облучением ККМ от ^{89,90}Sr. Совершенствование методов внутренней дозиметрии ККМ включает разработку вычислительных фантомов, которые представляют собой трехмерные модели участков скелета. Моделирование переноса излучений внутри таких фантомов позволяет оценить коэффициенты перехода от активности радионуклида в кости к мощности дозы в ККМ. Настоящая статья — продолжение работы по созданию набора вычислительных фантомов скелета для людей разного возраста. Цель: разработать вычислительный фантом скелета пятилетнего ребенка для внутренней дозиметрии ККМ от инкорпорированных бета-излучателей. Фантомы участков скелета с активным гемопоэзом создавали с использованием оригинальной методики SPSPD (stochastic parametric skeletal dosimetry). В рамках этой методики каждый такой участок представлял собой набор меньших фантомов простой геометрической формы. Распределение ККМ в скелете, размеры костей, характеристики костной микроархитектуры, а также плотность и химический состав моделируемых сред (ККМ, кость) определяли на основе опубликованных данных. В результате был сгенерирован вычислительный фантом основных участков скелета с активным гемопоэзом для пятилетнего ребенка, включающий 43 фантома участков костей. Линейные размеры фантомов были в пределах от 3 мм до 75 мм. Параметры микроархитектуры варьировали в широких пределах: отношение BV/TV — от 13% до 52%, $Tb. Th.$ — от 0,09 мм до 0,29 мм, $Tb. Sp.$ — от 0,48 мм до 0,98 мм.

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

Финансирование: работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы «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 интерпретация 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: 23.10.2023 **Статья принята к печати:** 05.12.2023 **Опубликована онлайн:** 31.12.2023

DOI: 10.47183/mes.2023.061

COMPUTATIONAL PHANTOM FOR A 5-YEAR OLD CHILD RED BONE MARROW DOSIMETRY DUE TO INCORPORATED BETA EMITTERS

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

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

² Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

The red bone marrow (RBM) exposure due to bone-seeking radionuclides can lead to grave medical consequences. In particular, the increased risk of leukemia in people exposed due to contamination of the Techa River in 1950s is associated with the RBM exposure due to ^{89,90}Sr. Improvement of the internal RBM dosimetry methods includes the development of computational phantoms that represent 3D models of the skeletal sites. Modeling radiation transport within such phantoms enables estimation of conversion factors from the radionuclide activity in the bone to the RBM dose rate. This paper is an extension study focused on generating a set of computational phantoms representing skeletons of individuals of different ages. The aim was to develop a computational phantom representing a 5-year-old child for internal RBM dosimetry from incorporated beta emitters. The phantoms of the skeletal sites with active hematopoiesis were created using the original Stochastic Parametric Skeletal Dosimetry (SPSPD) method. With this method, every such site represented a set of smaller phantoms of simple geometric shape. RBM distribution across the skeleton, bone size, characteristics of bone micro-architecture, as well as density and chemical composition of the simulated media (RBM, bone) were determined based on the published data. As a result, a computational phantom of the major skeletal sites with active hematopoiesis representing a 5-year-old child was generated that included 43 phantoms of bone fragments. Linear dimensions of phantoms were within 3–75 mm. Micro-architecture parameters varied greatly: BV/TV ratio —13–52%, $Tb. Th.$ — 0.09–0.29 mm, $Tb. Sp.$ —0.48–0.98 mm.

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

Funding: the study was performed within the framework of the Federal Targeted Program "Ensuring Nuclear and Radiation Safety for 2016–2020 and for the Period up to 2035" and supported by the Federal Medical Biological Agency of Russia.

Author contribution: Sharagin PA — data acquisition, analysis and interpretation, manuscript writing and editing; Tolstykh EI — developing the research method; Shishkina EA — developing the concept, manuscript editing.

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

Received: 23.10.2023 **Accepted:** 05.12.2023 **Published online:** 31.12.2023

DOI: 10.47183/mes.2023.061

При попадании в организм остеотропные радионуклиды накапливаются в минерализованной костной ткани и локально облучают красный костный мозг (ККМ), что может приводить к серьезным медицинским последствиям. Так, например,

увеличение риска развития лейкозов и возникновение хронического лучевого синдрома у лиц в составе когорты реки Течи, загрязненной радионуклидами в 1950-е гг., во многом связывают с попаданием изотопов стронция

($^{89,90}\text{Sr}$) в организм [1–4]. Именно изотопы стронция были основными источниками внутреннего облучения ККМ для этих людей. Таким образом, совершенствование методов дозиметрии остеотропных радионуклидов может помочь подготовиться к потенциальным экстремальным ситуациям, связанным с радиоактивным загрязнением внешней среды, и представляет собой важную задачу радиобиологии и радиационной защиты. Для оценок доз на ККМ используют биокинетические и дозиметрические модели. Биокинетические — чтобы оценить удельную активность радионуклида в ткани-источнике (кости). Такие модели имитируют процессы обмена внутри организма, позволяя оценить долю поступившего радионуклида в различных органах, в частности, в костях скелета, в зависимости от его количества и времени после поступления [5]. Для расчета дозы на ККМ используют коэффициенты перехода (DF) от удельной активности радионуклида в ткани-источнике (скелете) к мощности поглощенной дозы в ткани-мишени (ККМ). DF — результат дозиметрического моделирования. Для имитации геометрии облучения используют вычислительные дозиметрические фантомы скелета, представляющие собой суррогат реальных тканей организма и репрезентативно описывающие взаимное расположение тканей-источников (кости) и мишеней (ККМ), в которых проводят имитацию переноса излучений. Существующие сегодня вычислительные фантомы для дозиметрии ККМ основаны на анализе ограниченного количества посмертных изображений компьютерной томографии (КТ) костей [6–12]. Использование таких фантомов не позволяет учесть индивидуальную вариабельность размеров костей и их микроструктуры и связанные с этим неопределенности оценок DFs. В качестве альтернативы в ФГБУН УНПЦ РМ был разработан оригинальный параметрический метод стохастического моделирования костных структур — SPSPD-моделирование (Stochastic parametric skeletal dosimetry) [13, 14]. Параметры SPSPD-фантомов основаны на многочисленных опубликованных результатах измерений реальных костей людей различного возраста. Большая статистика в используемых публикациях позволяет оценить неопределенности, связанные с индивидуальной вариабельностью параметров скелета. Фантом представляет собой виртуальную модель простой геометрической формы. Внутри вычислительный фантом кости заполнен спонгиозой (совокупностью трабекулярной кости и ККМ), а снаружи покрыт плотным слоем кортикальной кости. ККМ, трабекулярная и кортикальная кость моделировали как отдельные среды в составе фантома. Такая комплексная модель — упрощенное представление реальной кости, хорошо подходящее для внутренней дозиметрии остеотропных бета-излучателей [13, 14]. Адекватность модели продемонстрирована в опубликованных численных экспериментах [13, 15, 16], в результате которых были получены энергетические зависимости для SPSPD-фантомов, сопоставленные с опубликованными данными.

В случае загрязнения окружающей среды остеотропными радионуклидами возможно их попадание в организм человека различного возраста. В частности, в случае радиационного загрязнения реки Течи облучению подверглись лица в возрасте от новорожденного до взрослого [1–3, 17]. Поэтому важно разработать фантомы для различных возрастных групп. В рамках SPSPD-подхода нами уже были созданы вычислительные фантомы скелета для новорожденного [18] и годовалого ребенка [19].

Цель настоящего исследования — разработка вычислительного фантома скелета пятилетнего ребенка

для оценки доз в ККМ от инкорпорированных в кости бета-излучающих радионуклидов. Данное исследование представляет собой очередной этап работы по созданию набора вычислительных фантомов стандартного человека для различных возрастных групп.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Создание фантомов осуществляли с помощью оригинальной SPSPD-методики, которую ранее использовали для создания фантомов новорожденного [17] и годовалого [18].

В рамках методологии SPSPD моделировали только участки костей, содержащие ККМ, т. е. участки скелета с активным гемопоэзом (гемопоэтические сайты), определенные согласно опубликованным данным о распределении ККМ внутри скелета [20].

SPSPD-фантом гемопоэтических сайтов скелета состоит из набора меньших фантомов — базовых фантомов сегментов кости (БФСК) простой геометрической формы, с гомогенной микроархитектурой костной ткани и толщиной кортикального слоя, описывающих отдельные участки костей скелета. Такая сегментация упрощает процесс моделирования, а также позволяет оценить неоднородность костной микроархитектуры внутри отдельно взятого гемопоэтического сайта. Параметры БФСК основаны на данных литературы. Процесс сегментации подробно описан в ранних работах [13, 21].

Параметры фантомов включали химический состав и плотность минерализованной костной ткани и костного мозга (моделируемые среды), а также геометрию тканей источников и мишеней в составе моделируемого участка кости.

Химический состав и плотность моделируемых сред определены согласно опубликованным данным, и их применяли для всех фантомов пятилетнего ребенка [22, 23].

Для описания взаимного расположения и геометрии тканей внутри кости оценивали линейные размеры, толщину кортикального слоя (*Ct. Th.*) и характеристики микроархитектуры для каждого моделируемого участка кости.

Для оценки морфометрических параметров фантомов пятилетнего ребенка рассматривали статьи в рецензируемых изданиях, атласы, руководства, монографии и диссертации. Изучали также электронные ресурсы, содержащие коллекции рентгеновских снимков. Для анализа собирали результаты измерений людей/образцов, определенных авторами 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 трех до семи лет.

В рамках данной работы по данным литературы оценивали следующие характеристики костной микроархитектуры: толщину трабекул (*Tb. Th.*), размер межтрабекулярного пространства (*Tb. Sp.*), долю костной ткани в объеме спонгиозы (*BV/TV*). В рассмотрение принимали данные измерений линейных размеров костей скелета с помощью различных техник: микрометров, анатомических боксов, ультразвуковых и рентгенологических исследований, а также компьютерной томографии (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 вычислительных фантомов принимали усредненные значения характеристик костей. Если были доступны опубликованные данные

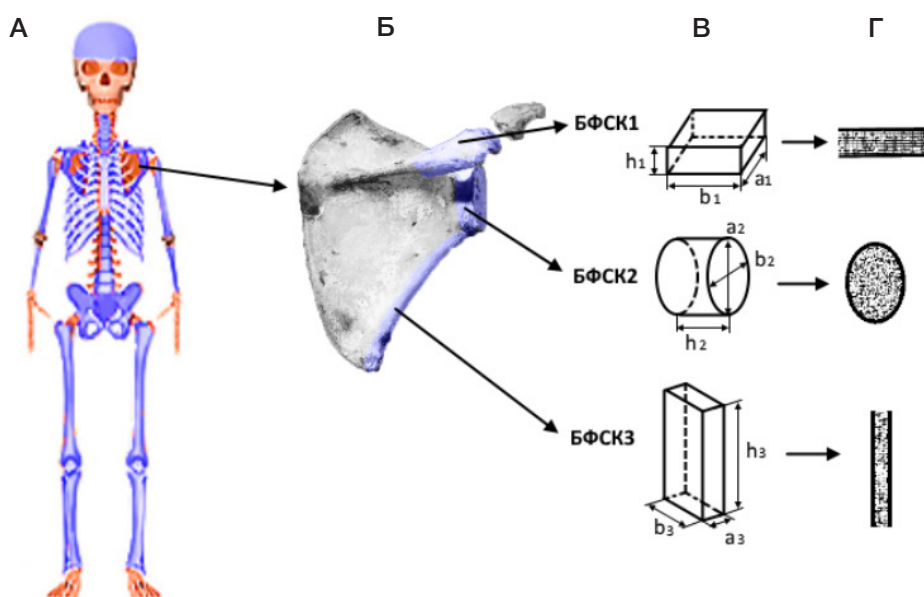


Рис. Сегментация гемопоэтического сайта скелета пятилетнего ребенка на примере лопатки. **А.** Скелет пятилетнего ребенка (синим цветом выделены участки скелета с активным гемопоэзом). **Б.** Лопатка. **В.** Схема разделения кости на БФСК и их размерные характеристики. **Г.** БФСК лопатки в воксельном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

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 (WN), который учитывал количество (N) исследуемых субъектов: $WN = 1$, если $N \geq 25$; $WN = N/25$, если $N < 25$. Методы отбора и анализа литературных данных подробно описаны ранее [24–26].

Для каждого сегмента в оригинальной программе Trabecula был сгенерирован БФСК в воксельной форме [27]. Воксели в составе БФСК имитируют либо минерализованную кость, либо костный мозг (КМ), в зависимости от положения центра вокселя в фантоме.

В качестве тканей источников рассматривали трабекулярную (ТК) и кортикальную (КК) кость, а костный мозг (КМ) — в качестве ткани-детектора. КМ был равномерно распределен между трабекулами внутри БФСК. Размер вокселя выбирался индивидуально для каждого фантома, не превышал 70% от толщины трабекулы и в смоделированных фантомах варьировал от 50 до 200 мкм [27, 28]. Объемы тканей-источников и ткани-

детектора были автоматически рассчитаны в программе Trabecula для каждого БФСК.

Гемопоэтические сайты пятилетнего ребенка, процесс сегментации, а также смоделированные БФСК представлены на рисунке на примере лопатки.

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

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основные гемопоэтические сайты скелета ребенка в возрасте 5 лет и массовая доля ККМ в них были определены согласно данным МРТ-исследований (табл. 1) [20].

Скелет пятилетнего ребенка включает в себя 14 гемопоэтических сайтов для моделирования (табл. 1). Доля

Таблица 1. Массовая доля ККМ (% от общей массы ККМ в скелете) в основных гемопоэтических сайтах скелета ребенка в возрасте 5 лет

№	Гемопоэтический сайт	Массовая доля ККМ, %
1	Бедро	13,5
2	Плечо	4,8
3	Крестец	5,7
4	Берцовые кости	9,3
5	Тазовые кости	13,5
6	Череп	18
7	Ключица	0,9
8	Лопатка	2,8
9	Грудина	1,7
10	Рёбра	9
11	Лучевая и локтевая кость	2,1
12	Шейные позвонки	2,3
13	Грудные позвонки	9,2
14	Поясничные позвонки	7

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	–

ККМ от общего содержания в скелете в них варьирует от 0,9% до 18,1%. Распределение ККМ внутри каждого гемопозитического сайта также было определено согласно опубликованным данным МРТ [29–33].

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

Плотность минерализованной костной ткани оценена на основе результатов измерений плотности кортикальной кости детей в возрасте 5 лет и равна 1,80 г/см³ [23]. Плотность красного костного мозга принимали равной плотности воды (1 г/см³) [22].

Параметры спонгиозы были оценены на основе опубликованных данных, их анализ и расчет среднепопуляционных значений параметров спонгиозы подробно описаны [26]. Значения параметров микроархитектуры БФСК пятилетнего ребенка представлены в табл. 3.

Линейные размеры и толщина кортикального слоя, принятые для БФСК пятилетнего ребенка, представлены в табл. 4.

Фантом гемопозитических сайтов скелета пятилетнего ребенка состоит из 43-х БФСК (табл. 4). В зависимости от формы моделируемого гемопозитического сайта, для их описания было использовано разное число БФСК: от 1 (ребра) до 9 (крестец).

Как и для фантомов скелетов других возрастов, большая часть БФСК пятилетнего ребенка представляет собой

цилиндры и прямоугольные параллелепипеды, размеры БФСК были в пределах от 3 мм до 75 мм. Минимальное значение *Ct. Th.* определено для БФСК грудины (0,1 мм), а максимальное — для диафиза бедренной кости (3,7 мм). Параметры спонгиозы варьировали в широких пределах. Отношение *BV/TV* в БФСК варьирует от 13% до 52%, *Tb. Th.* — от 0,09 мм до 0,29 мм, *Tb. Sp.* — от 0,48 мм до 0,98 мм (табл. 3).

Индивидуальная вариабельность размерных параметров БФСК в среднем составила 14%, наибольшее значение вариабельности оценено для ребер (35%), а наименьшее — для дистальной части плечевой кости (3%). Вариабельность толщины кортикального слоя в среднем равна 26%, с максимальным значением 35% — для сегментов крестца и минимальным значением 7% — для тел шейных позвонков. Вариабельность параметров спонгиозы в среднем составила 18% при минимальном значении, равном 2%, и максимальном — 70%.

Значения вариабельности были использованы для моделирования ДФСК. Объемы ДФСК варьируют в широких пределах и могут отличаться от объема БФСК более чем в 3 раза как в меньшую, так и в большую сторону. В дальнейшей работе как для БФСК, так и для ДФСК будут рассчитаны *DF*. Среднеквадратическое отклонение *DF*, рассчитанных для ДФСК, от *DF*, рассчитанных для БФСК, будет характеризовать популяционную вариабельность *DF*.

Таблица 3. Параметры спонгиозы, принятые для БФСК пятилетнего ребенка [11, 34–55] (в скобках дан коэффициент вариации (CV), %)

Гемопозитический сайт	<i>BV/TV</i> , %	<i>Tb. Th.</i> , мм	<i>Tb. Sp.</i> , мм
Бедро (проксимальная часть)	35 (6)	0,24 (22)	0,77 (70)
Бедро (центральная и дистальная части)	26 (6)		
Плечевая кость	22 (7)	0,21 (13)	0,58 (47)
Ребра	20 (6)	0,23 (34)	0,51 (14)
Берцовые кости*	25 (3)	0,13 (13)	0,74 (11)
Тазовые кости	25 (2)	0,15 (11)	0,48 (23)
Череп*	52 (5)	0,29 (31)	0,57 (35)
Ключица*	15 (3) 29 (9)	0,2 (32) 0,15 (13)	0,80 (25)
Локтевая, лучевая кости	16 (5)	0,16 (13)	0,77 (16)
Лопатка*	22 (8)	0,24 (42)	0,96 (23)
Грудина*	15 (27)	0,14 (33)	1,0 (6)
Шейные позвонки	21 (5)	0,14 (14)	0,60 (20)
Грудные позвонки+ поясничные позвонки + крестец	13 (4)	0,09 (40)	0,60 (20)

Примечания: * — параметры спонгиозы рассчитаны по результатам измерений схожих костей или по данным для других возрастов, способ расчета описан ранее [25].

Таблица 4. Линейные размеры и толщина кортикального слоя, принятые для БФСК пятилетнего 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	17 (6)	17 (6)			3,7 (8)	[56–64]
	Проксимальный конец (верхняя часть)	ц	25 (4)	23 (30)	23 (30)			1,3 (14)	
	Проксимальный конец (нижняя часть)	ц	25 (4)	23 (30)	23 (30)			1,2 (14)	
	Дистальный конец	дц	49 (4)	68 (6)	25 (7)	17 (6)	17 (6)	1,1 (7)	
Плечо	Трубка диафиза ⁴	ц	30	15 (3)	15 (3)			2,5 (20)	[56–59, 65]
	Проксимальный конец	дц	20 (4)	32 (5)	32 (5)	15 (5)	15 (5)	0,9 (18)	
	Дистальный конец	дц	27 (4)	46 (7)	15 (3)	15 (3)	15 (3)	0,8 (19)	
Ребра	Ребра ⁴	п	9,4 (32)	30	4,4 (35)			0,5 (33)	[66–68]
Крестец	Тело 1-го позвонка	п	17 (20)	75 (20)	21 (6)			0,7 (35)	[69–72]
	Тело 2-го позвонка	п	16 (20)	60 (20)	15 (10)			0,7 (35)	
	Тело 3-го позвонка	п	14 (20)	52 (20)	11 (10)			0,7 (35)	
	Тело 4-го позвонка	п	10 (20)	45 (20)	6,4 (9)			0,7 (35)	
	Тело 5-го позвонка	п	10 (20)	22 (20)	6,4 (9)			0,7 (35)	
Берцовые	Малая берцовая кость ⁴	ц	30	8,1 (6)	8,1 (6)			1,5 (20)	[56, 73, 74]
	Трубка диафиза б. б. ⁴	ц	30	15(4)	15 (4)			2,9 (17)	[55, 56, 60, 75–77]
	Проксимальный конец б. б.	дц	34 (5)	55 (6)	22 (20)	15 (4)	15 (4)	0,7 (18)	
	Дистальный конец б. б.	дц	34 (5)	24 (22)	24 (23)	15 (4)	15 (4)	0,7 (18)	
Тазовые кости	Подвздошная кость часть 1	п	7,9 (13)	30	30			1,6 (33) 0,8 (20)3	[78–85]
	Подвздошная кость часть 2	п	7,9 (13)	30	30			0,8 (20)	
	Подвздошная кость вертлужная часть	дц	20 (8)	35 (10)	16 (30)	34 (30)	27 (30)	0,8 (20)	
	Вертлужная часть лобковой кости	дц	7,3 (15)	22 (20)	18 (20)	13 (11)	8,8 (20)	0,5 (30)	
	Лобковая кость (верхняя ветвь)	ц	29 (15)	13 (11)	8,8 (20)			0,5 (30)	
	Лобковая кость (нижняя ветвь)	ц	19 (15)	8,8 (20)	8,8 (20)			0,5 (30)	
	Вертлужная часть седалищной кости	п	21 (15)	21 (15)	27 (15)	21 (15)		0,5 (30)	
	Бугристость седалищной кости	ц	25 (15)	18 (15)	14 (15)			0,5 (30)	
	Нижняя ветвь седалищной кости	ц	19 (15)	8,8 (20)	8,8 (20)			0,5 (30)	
Череп	Плоские кости свода ⁴	п	4,2 (26)	30	30			1,1 (26)	[86–88]
Ключица	Тело ⁴	ц	30	8,7 (9)	6,8 (10)			1,1 (9)	[89–92]
	Грудинный конец	дц	12 (13)	18 (10)	16 (9)	8,7 (9)	6,8 (10)	0,5 (10)	
	Акромиальный конец	дц	12 (13)	15 (11)	8,7 (18)	8,7 (9)	6,8 (10)	0,5 (10)	
Локтевая, лучевая	Трубка диафиза ⁴	ц	30	8,3 (25)	8,3 (17)			1,5 (12)	[56, 58, 73]
	Конец	дц	26 (5)	13 (6)	8,3 (5)	8,3 (5)	8,3 (5)	0,5 (29)	
Лопатка	Гленоид	ц	12 (8)	25 (11)	18 (7)			0,9 (28)	[93–96]
	Акромион	п	7,6 (18)	20 (12)	16 (12)			0,8 (13)	
	Латеральный край	п	30	3,2 (6)	10 (12)			0,8 (13)	
Грудина	Грудина	п	6,9 (13)	30	30			0,1 (19)	[37, 97, 98]
Шейные позвонки	Тело позвонка	ц	7,3 (8)	11,3 (12)	18,1 (12)			0,2 (7)	[51, 99–102]
Грудные позвонки	Тело позвонка	ц	12 (17)	17 (17)	21 (20)			0,2 (25)	[51, 100–103, 104]
	Поперечный отросток	п	7,3 (19)	11 (19)	5,3 (19)			0,2 (25)	
	Остистый отросток	п	5,9 (21)	17 (21)	3 (21)			0,2 (25)	
Поясничные позвонки	Тело позвонка	ц	16 (11)	23 (12)	34 (13)			0,2 (25)	[51, 71, 100–103, 105]
	Поперечный отросток	п	6,4 (13)	12 (12)	5 (12)			0,2 (25)	
	Остистый отросток	п	15 (20)	13 (20)	5 (20)			0,2 (25)	

Примечания: ¹ — форму фантома обозначали следующим образом: ц — цилиндр, дц — деформированный цилиндр, п — прямоугольный параллелепипед, э — эллипсоид; ² — размеры БФСК обозначали следующим образом: *h* — высота; *a* — большая ось (ц), большая ось для большого основания (дц) или сторона *a* (п); *b* — малая ось (ц), малая ось для большого основания (дц) или сторона *b* (п); *c* — большая ось для меньшего основания (дц); *d* — малая ось для меньшего основания (дц); ³ — толщину кортикального слоя принимали разной для внутренней (медиальной) и внешней (ягодичной) поверхностей данного сегмента подвздошной кости; ⁴ — 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 целиком [14, 21].

Таблица 5. Сравнение объемов БФСР годовалого и пятилетнего ребенка

БФСР	Моделируемая среда	Объем моделируемой структуры, см ³		
		1 год	5 лет	1 год / 5 лет
Дистальный конец бедренной кости	КМ	6,53	22,9	3,51
	ТК	1,88	7,56	4,02
	КК	1,41	5,21	3,7
	Весь БФСР	9,82	35,67	3,63
Ключица, грудинный конец	КМ	0,35	0,89	2,54
	ТК	0,14	0,36	2,57
	КК	0,09	0,22	2,44
	Весь БФСР	0,58	1,47	2,53
Тело поясничного позвонка	КМ	1,32	8,51	6,45
	ТК	0,2	1,34	6,7
	КК	–	0,3	–
	Весь БФСР	1,52	10,15	6,68
Тело шейного позвонка	КМ	0,45	0,89	1,98
	ТК	0,11	0,24	2,18
	КК	–	0,05	–
	Весь БФСР	0,56	1,18	2,11

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для новорожденного было проведено сравнение результатов моделирования с массами реальных костей с целью подтверждения правильности методологического подхода. Нами не было найдено результатов измерений масс или объемов сырых костей пятилетнего ребенка, поэтому у нас нет возможности сравнить результаты моделирования и реальные кости. Существующие сегодня вычислительные фантомы получены путем сканирования аутопсийного материала и не являются параметрическими, поэтому нет возможности сравнить параметры этих фантомов с параметрами SPSPD-фантомов. Для большинства костей также не представляется возможным сравнить характеристики фантомов, полученные в результате их генерирования (массы моделируемых сред), с опубликованными массами фантомов, так как в рамках SPSPD-подхода моделируются только участки скелета с активным гемопоэзом, а не весь скелет целиком. Было проведено сравнение масс SPSPD-фантомов (как суммы масс всех сегментов в составе фантома) с опубликованными данными для костей, которые моделируются целиком: костей таза и ключицы пятилетнего ребенка [7, 12]. В результате сравнения разница между массами фантомов, представленных в литературе, и SPSPD-фантомов не превышала 20%.

Имеет смысл оценить возрастную динамику характеристик фантомов: новорожденного, годовалого и пятилетнего. Фантом скелета пятилетнего ребенка состоит из большего количества БФСР, чем фантомы скелета для младших возрастных групп. Это связано с процессами минерализации хрящевых участков, которые интенсивно идут в первые 5 лет жизни, в частности, к 5 годам значительной минерализации подвергаются отростки позвонков и грудина. Помимо этого, в данном возрасте еще не завершен процесс замещения ККМ жировой тканью в диафизах трубчатых костей, поэтому для данных участков были смоделированы БФСР. К 5 годам значительно изменяется распределение ККМ внутри скелета. Так, в этом возрасте существенно

уменьшается массовая доля ККМ в черепе по сравнению с годовалым ребенком: с 28,7% до 18,1%, при этом увеличивается доля ККМ в остальных участках скелета. Параметры микроструктуры БФСР изменяются слабо. Толщина кортикального слоя существенно увеличивается за этот период, и к 5 годам все моделируемые участки скелета покрыты кортикальным слоем, в отличие от фантомов для новорожденного и годовалого. В период от года до пяти лет происходит значительное увеличение размеров всех участков скелета. Сравнение объемов фантомов участков скелета годовалого и пятилетнего ребенка на примере дистального участка бедренной кости, ключицы, тел шейного и поясничного позвонков представлено в табл. 5.

Как показано в табл. 5, объемы моделируемых сред пятилетнего ребенка во многом превышают таковые для годовалого. Увеличение объемов тканей источников за этот период составляет 3,26 и 2,78 раза для ТК и КК соответственно. Объем КК увеличился в 3,03 раза. Общий объем БФСР для ребенка в возрасте 5 лет в среднем больше объема фантома годовалого ребенка в 2,8 раза.

Мы ожидаем, что такие возрастные изменения окажут существенное влияние на средний по скелету DF и, как следствие, на мощность дозы. Наибольшее влияние на DF для стронция, инкорпорированного в трабекулярной кости, может оказать увеличение линейных размеров БФСР. В предыдущих исследованиях было показано, что, чем больше размеры БФСР, тем выше вероятность поглощения энергии от инкорпорированного радионуклида внутри фантома, а не за его пределами [15, 16]. Для стронция в кортикальной кости характерна обратная закономерность: с увеличением размеров фантома вероятность переноса энергии от источника, инкорпорированного в наружном кортикальном слое, к мишени (ККМ) уменьшается. Таким образом, с увеличением размеров БФСР можно ожидать роста DF для ^{89,90}Sr в трабекулярной кости и уменьшения DF для Sr в кортикальной кости.

Представленные параметры (табл. 3, 4) фантомов могут быть введены в программу Trabecula для генерирования воксельных фантомов, моделирование переноса излучения

в которых позволит оценить DF для остеотропных бета-излучателей, что даст возможность определить мощность поглощенной дозы в ККМ.

ВЫВОДЫ

В результате данного исследования были разработаны вычислительные фантомы основных участков скелета с активным гемопоэзом для ребенка в возрасте 5 лет. Разработку данных фантомов проводили по той же методологии, что и для новорожденного и годовалого ребенка. Смоделированные фантомы имитируют структуру костной ткани, а их наборы — популяционную вариативность размеров структур отдельных костей. Представленный фантом для пятилетнего ребенка

в дальнейшем будет использован для расчетов DF для $^{89,90}\text{Sr}$, 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. В качестве направления дальнейшей работы мы также планируем создать SPSPD-фантомы скелета для других возрастных групп: 10 лет, 15 лет и взрослых. SPSPD-фантомы могут быть использованы для дозиметрии инкорпорированных остеотропных бета-излучателей у населения, при попадании радионуклидов в окружающую среду, а также для дозиметрии других остеотропных бета-излучателей, в том числе применяемых в радионуклидной терапии, таких как ^{89}Sr , ^{32}P , ^{186}Re , ^{188}Re , ^{117}mSn .

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. PMID: 30703313.
2. Krestinina LY, Epifanova SB, Silkin SS, Mikryukova LD, Degteva MO, Shagina NB, Akleyev AV. 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.
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. 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): 8794–824.
8. 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.
9. 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.
10. Pafundi D. Image-based skeletal tissues and electron dosimetry models for the ICRP reference pediatric age series [dissertation]. Gainesville: University of Florida, 2009.
11. 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.
12. Bolch WE, Eckerman K, Endo A, et al. ICRP Publication 143: Paediatric Reference Computational Phantoms. *Ann ICRP*. 2020; 49 (1): 5–297. DOI: 10.1177/0146645320915031.
13. Degteva MO, Tolstykh EI, Shishkina EA, Sharagin PA, Zalyapin VI, Volchkova AY, et al. Stochastic parametric skeletal dosimetry model for humans: General approach and application to active marrow exposure from bone-seeking beta-particle emitters. *PLoS ONE*. 2021; 16 (10): e0257605. DOI: 10.1371/journal.pone.0257605.
14. Дёгтева М. О., Шишкина Е. А., Толстых Е. И., Заляпин 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): 66–75. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-66-75.
15. Volchkova AY, Sharagin PA, Shishkina EA. Internal bone marrow dosimetry: the effect of the exposure due to ^{90}Sr incorporated in the adjacent bone segments. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software*. 2022; 15 (4): 44–58. DOI: 10.14529/mmp220404.
16. Шишкина Е. А., Шарагин П. А., Волчкова А. Ю. Аналитическое описание дозообразования в костном мозге от ^{90}Sr , инкорпорированного в кальцифицированных тканях. *Вопросы радиационной безопасности*. 2021; 3: 72–82.
17. Силкин С. С., Крестинина Л. Ю., Старцев Н. В., Аклеев А. В. Уральская когорта аварийно-облученного населения. *Медицина экстремальных ситуаций*. 2019; 21 (3): 393–402.
18. 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.
19. Шарагин П. А., Шишкина Е. А., Толстых Е. И. Вычислительный фантом для дозиметрии красного костного мозга годовалого ребенка от инкорпорированных бета-излучателей. *Медицина экстремальных ситуаций*. 2023; 3: 44–55. DOI: 10.47183/mes.2023.030.
20. Cristy M. Active bone marrow distribution as a function of age in humans. *Phys Med Biol*. 1981; 26 (3): 389–400.
21. Sharagin PA, Shishkina EA, Tolstykh EI, Volchkova AY, 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.
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. Woodard HQ and White DR. The composition of body tissues. *Br. J. Radiol*. 1986; 59: 1209–18.
24. 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»; 23–24 сентября 2021 г., Гомель, Беларусь. *Современные проблемы радиобиологии – 2021*. 2021; 200–4.
25. Толстых Е. И., Шарагин П. А., Шишкина Е. А., Дегтева М. О. Формирование доз облучения красного костного мозга

- человека от $^{89,90}\text{Sr}$, оценка параметров трабекулярной кости для дозиметрического моделирования. В сборнике: Материалы международной научной конференции «Современные проблемы радиобиологии»; 23–24 сентября 2021 г., Гомель, Беларусь. Современные проблемы радиобиологии — 2021. 2021; 176–9.
26. 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 имени А. И. Бурназяна. 2022; 3: 25–40.
 27. 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): 53–9. DOI: 10.1097/HP.0000000000001127.
 28. 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.
 29. 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.
 30. Vogler JB 3rd, Murphy WA. Bone marrow imaging. *Radiology.* 1988; 168 (3): 679–93.
 31. Vande Berg BC, Malghem J, Lecouvet FE, Maldague B. Magnetic resonance imaging of the normal bone marrow. *Skeletal Radiology.* 1998; 27: 471–83.
 32. Vande Berg BC, Malghem J, Lecouvet FE, Maldague B. Magnetic resonance imaging of normal bone marrow. *Eur Radiol.* 1998; 8 (8): 1327–34.
 33. 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.
 34. 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.
 35. 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.
 36. Ryan TM, Krovitz GE. Trabecular bone ontogeny in the human proximal femur. *J Hum Evol.* 2006; 51 (6): 591–602.
 37. Cunningham C, Scheuer L, Black S. *Developmental Juvenile Osteology.* 2nd ed. Elsevier Academic Press, 2016; p. 630.
 38. Ryan TM, Raichlen DA, Gosman JH. Structural and mechanical changes in trabecular bone during early development in the human femur and humerus. Chapter 12. In: Percival CJ, Richtsmeier JT, editors. *Building Bones: Bone Formation and Development in Anthropology.* Cambridge University Press, 2017; p. 281–302.
 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. Volpato V. Bone endostructure morphogenesis of the human ilium. *C. R. Palevol* 7. 2008; 463–71. DOI: 10.1016/j.crpv.2008.06.001.
 41. 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.
 42. Gao S, Ren L, Qui R, Wu Z, Li C, Li J. Electron absorbed fractions in an image-based microscopic skeletal dosimetry model of chinese adult male. *Radiat Prot Dosimetry.* 2017; 175 (4): 450–9.
 43. Pafundi D. Image-based skeletal tissues and electron dosimetry models for the ICRP reference pediatric age series [dissertation]. Gainesville: University of Florida, 2009.
 44. Milenković P. Age Estimation Based on Analyses of Sternal End of Clavicle and the First Costal Cartilage Doctoral Dissertation [dissertation]. Belgrade: University Of Belgrade School of Medicine, 2013.
 45. Kirmani S, Christen D, van Lenthe GH, Fischer PR, Buxsein ML, McCready LK, et al. Bone structure at the distal radius during adolescent growth. *J Bone Miner Res.* 2009; 24 (6): 1033–42. DOI: 10.1359/jbmr.081255.
 46. Mitchell DM, Caksa S, Yuan A, Buxsein ML, Misra M, Burnett-Bowie SM. Trabecular bone morphology correlates with skeletal maturity and body composition in healthy adolescent girls. *J Clin Endocrinol Metab.* 2018; 103 (1): 336–45. DOI: 10.1210/je.2017-01785.
 47. Li X, Williams P, Curry EJ, Choi D, Craig EV, Warren RF, et al. Trabecular bone microarchitecture and characteristics in different regions of the glenoid. *Orthopedics.* 2015; 38 (3): 163–8.
 48. Knowles NK, G Langohr GD, Faieghi M, Nelson A, Ferreira LM. Development of a validated glenoid trabecular density-modulus relationship. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2019; 90: 140–5. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2018.10.013.
 49. Jun BJ, Vasanji A, Ricchetti ET, Rodriguez E, Subhas N, Li ZM, Iannotti JP. Quantification of regional variations in glenoid trabecular bone architecture and mineralization using clinical computed tomography images. *J Orthop Res.* 2018; 36 (1): 85–96. DOI: 10.1002/jor.23620.
 50. Frich LH, Odgaard A, Dalstra M. Glenoid bone architecture J Shoulder Elbow Surg. 1998; 7 (4): 356–61.
 51. Kneissel M, Roschger P, Steiner W, et al. Cancellous bone structure in the growing and aging lumbar spine in a historic Nubian population. *Calcif Tissue Int.* 1997; 61 (2): 95–100. DOI: 10.1007/s002239900302.
 52. Arbabi A. A quantitative analysis of the structure of human sternum. *J Med Phys.* 2009; 34 (2): 80–6.
 53. Bartl R, Frisch B. *Biopsy of bone in internal medicine — an atlas and sourcebook.* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993; p. 250.
 54. Baur-Melnyk A. *Magnetic Resonance Imaging of the Bone Marrow.* Springer Science & Business Media, 2012; p. 371.
 55. 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.
 56. Maresh MM. Measurements from roentgenograms. In: McCammon RW, editor. *Human Growth and Development.* Springfield, IL: Charles C. Thomas, 1970; p. 157–200.
 57. Singh SP, Malhotra P, Sidhu LS, Singh PP. Skeletal frame size of spital children. *Journal of Human Ecology.* 2007; 21 (3): 227–30.
 58. Živicnjak M, Smolej Narancić N, Szivovica L, Franke D, Hrenović J, Bisof V, et al. Gender-specific growth patterns of transversal body dimensions in Croatian children and youth (2 to 18 years of age). *Coll Antropol.* 2008; 32 (2): 419–31. PubMed PMID: 18756891.
 59. Свадовский Б. С. Возрастная перестройка костной ткани. О росте и развитии диафизов плечевой и бедренной костей. М.: Изд-во акад. пед. наук РСФСР, 1961; 110 с.
 60. 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.
 61. Dhavale N, Halcrow SE, Buckley HR, Tayles N, Donnett 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. ISSN 2352-4009.
 62. Djurić M, Milovanović P, Djonić D, Minić A, Hahn M. Morphological characteristics of the developing proximal femur: a biomechanical perspective. *Srp Arh Celok Lek.* 2012; 140 (11–12): 738–45. PubMed PMID: 23350248.
 63. 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.
 64. Petit MA, McKay HA, MacKelvie KJ, Heinonen A, Khan KM, Beck TJ. A randomized school-based jumping intervention confers site and maturity-specific benefits on bone structural properties in girls: a hip structural analysis study. *J Bone Miner Res.* 2002; 17 (3):

- 363–72. PubMed PMID: 11874228.
65. 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.
 66. 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.
 67. Beresheim AC, Pfeiffer S, Grynias M. Ontogenetic changes to bone microstructure in an archaeologically derived sample of human ribs. *J Anat*. 2019; DOI: 10.1111/joa.13116.
 68. Pfeiffer S. Cortical Bone Histology in Juveniles. Available from: https://www.researchgate.net/publication/303179375_Cortical_bone_histology_in_Juveniles.
 69. Hresko AM, Hinchcliff EM, Deckey DG, Hresko MT. Developmental sacral morphology: MR study from infancy to skeletal maturity. *Eur Spine J*. 2020; 29 (5): 1141–6. DOI: 10.1007/s00586-020-06350-6.
 70. Кузнецов Л. Е. Переломы таза у детей (морфология, биомеханика, диагностика). М.: Фолиум, 1994; 192 с.
 71. Mavrych V, Bolgova O, Ganguly P and Kashchenko S. Age-related changes of lumbar vertebral body morphometry. *Austin J Anat*. 2014; 1 (3): 7.
 72. Садофьева В. И. Нормальная рентгеноанатомия костно-суставной системы детей. Ленинград: Медицина, 1990; 216 с.
 73. 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.
 74. White TD, Black MT, Folkens PA. *Human osteology*: 3rd ed. Academic Press, 2011; p. 688.
 75. Gindhart PS. Growth standards for the tibia and radius in children aged one month through eighteen years. *Am J Phys Anthropol*. 1973; 39: 41–8.
 76. 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. PubMed PMID: 21862250.
 77. 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. PubMed PMID: 26300243.
 78. Blake KAS. An investigation of sex determination from the subadult pelvis: A morphometric analysis [dissertation]. Pittsburgh: University of Pittsburgh, 2011.
 79. Cunningham CA, Black SM. Iliac cortical thickness in the neonate — the gradient effect. *J Anat*. 2009a; 215 (3): 364–70. DOI: 10.1111/j.1469-7580.2009.01112.x.
 80. Cunningham CA, Black SM. Anticipating bipedalism: trabecular organization in the newborn ilium. *J Anat*. 2009b; 214 (6): 817–29. DOI: 10.1111/j.1469-7580.2009.01073.x.
 81. Rissech C, García M, Malgosa A. Sex and age diagnosis by ischium morphometric analysis. *Forensic Science International*. 2003; 135: 188–96.
 82. Rissech C, Malgosa A. Pubis growth study: Applicability in sexual and age diagnostic. *Forensic Science International*. 2007; 173: 137–45.
 83. 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.
 84. 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.
 85. 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.
 86. 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.
 87. Margulies S, Coats B. Experimental injury biomechanics of the pediatric head and brain. Chapter 4. In: Crandall J, Myers B, Meaney D, et al, editors. *Pediatric Injury Biomechanics*. New York: Springer Science+Business Media, 2013; p. 157–190.
 88. 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). DOI: 10.1371/journal.pone.0127322.
 89. Bleuze 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.
 90. 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.
 91. 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.
 92. Corron L. Juvenile age estimation in physical anthropology: A critical review of existing methods and the application of two standardised methodological approaches. *Biological anthropology [dissertation]*. Marseille: Aix-Marseille Université, 2016.
 93. Vallois HV. L'omoplate humaine. *Bulletin de la Société d'Anthropologie de Paris*. 1946; 7: 16–99.
 94. 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.
 95. 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.
 96. Rissech C, Black S. Scapular development from neonatal period to skeletal maturity. A preliminary study. *Int J Osteoarchaeol*. 2007; 17: 451–64.
 97. Bayarogullari H, Yengil E, Davran R, Ađlagül E, Karazincir S, Balci A. Evaluation of the postnatal development of the sternum and sternal variations using multidetector CT. *Diagn Interv Radiol*. 2014; 20 (1): 82–9.
 98. Riach IC. Ossification in the sternum as a means of assessing skeletal age. *J Clin Pathol*. 1967; 20 (4): 589–90.
 99. 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. PubMed PMID: 27231821.
 100. Caldas Md P, Ambrosano GM, Haiter Neto F. New formula to objectively evaluate skeletal maturation using lateral cephalometric radiographs. *Braz Oral Res*. 2007; 21 (4): 330–5. PubMed PMID: 18060260.
 101. Peters JR, Chandrasekaran C, Robinson LF, Servaes SE, Campbell RM Jr, Balasubramanian S. Age- and gender-related changes in pediatric thoracic vertebral morphology. *Spine J*. 2015; 15 (5): 1000–20. DOI: 10.1016/j.spinee.2015.01.016.
 102. Peters JR, Servaes SE, Cahill PJ, Balasubramanian S. Morphology and growth of the pediatric lumbar vertebrae. *Spine J*. 2021; 21 (4): 682–97. DOI: 10.1016/j.spinee.2020.10.029.
 103. Newman SL, Gowland RL. The use of non-adult vertebral dimensions as indicators of growth disruption and non-specific health stress in skeletal populations. *American journal of physical anthropology*. 2015; 158 (1): 155–64.
 104. Comeau A. Age-related changes in geometric characteristics of the pediatric thoracic cage and comparison of thorax shape with a Pediatric CPR Manikin [dissertation]. Philadelphia: Drexel University, 2010.
 105. Knirsch W, Kurtz C, Häfner N, Langer M, Kecioglu D. Normal values of the sagittal diameter of the lumbar spine (vertebral body and dural sac) in children measured by MRI. *Pediatr Radiol*. 2005; 35: 419–24. DOI: 10.1007/s00247-004-1382-6.

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.
2. Krestinina LY, Epifanova SB, Silkin SS, Mikryukova LD, Degteva MO, Shagina NB, Akleyev AV. 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.
3. Akleev AV. Hronicheskij luchevoj sindrom u zhitelej pribrezhnyh sel reki Techa. Cheljabinsk: Kniga, 2012; p. 464. 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. 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): 8794–824.
8. 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.
9. 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.
10. Pafundi D. Image-based skeletal tissues and electron dosimetry models for the ICRP reference pediatric age series [dissertation]. Gainesville: University of Florida, 2009.
11. 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.
12. Bolch WE, Eckerman K, Endo A, et al. ICRP Publication 143: Paediatric Reference Computational Phantoms. *Ann ICRP*. 2020; 49 (1): 5–297. DOI: 10.1177/0146645320915031.
13. Degteva MO, Tolstykh EI, Shishkina EA, Sharagin PA, Zalyapin VI, Volchkova AY, et al. Stochastic parametric skeletal dosimetry model for humans: General approach and application to active marrow exposure from bone-seeking beta-particle emitters. *PLoS ONE*. 2021; 16 (10): e0257605. DOI: 10.1371/journal.pone.0257605.
14. Degteva MO, Shishkina EA, Tolstykh EI, Zalyapin VI, Sharagin PA, Smith MA, et al. Methodological approach to development of dosimetric models of the human skeleton for beta-emitting radionuclides. *Radiation Hygiene*. 2019; 12 (2): 66–75. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-66-75. Russian.
15. Volchkova AY, 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. Shishkina EA, Sharagin PA, Volchkova AY. Analytical description of dose forming in bone marrow from 90Sr in calcified tissues. *Issues of Radiation Safety*. 2021; 3: 72–82. Russian.
17. Silkin SS, Krestinina LY, Startsev VN, Akleev AV. Ural cohort of emergency-irradiated population. *Extreme medicine*. 2019; 21 (3): 393–402. Russian.
18. Sharagin PA, Shishkina EA, Tolstykh EI. Computational phantom for red bone marrow dosimetry from incorporated beta emitters in a newborn baby. *Extreme Medicine*. 2022; 4: 74–82. DOI: 10.47183/mes.2022.045. Russian.
19. Sharagin PA, Shishkina EA, Tolstykh EI. Computational red bone marrow dosimetry phantom of a one-year-old child enabling assessment of exposure due to incorporated beta emitters. *Extreme Medicine*. 2023; 3: 44–55. DOI: 10.47183/mes.2023.030. Russian.
20. Cristy M. Active bone marrow distribution as a function of age in humans. *Phys Med Biol*. 1981; 26 (3): 389–400.
21. Sharagin PA, Shishkina EA, Tolstykh EI, Volchkova AY, 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.
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. Woodard HQ and White DR. The composition of body tissues. *Br. J. Ru&ol*. 1986; 59: 1209–18.
24. Sharagin PA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Degteva MO. Dosimetric modeling of bone for bone-seeking beta-emitting radionuclides: size parameters and segmentation. In: *Proceedings of the contemporary issues of radiobiology — 2021 International Scientific Conference*; 2021 Sept 23–24; Gomel, Belarus. 2021; p. 200–4. Russian.
25. Tolstykh EI, Sharagin PA, Shishkina EA, Degteva MO. Dosimetric modeling of red bone marrow exposure from 89,90Sr: resolving age-dependent trabecular bone parameters. In: *Proceedings of the contemporary issues of radiobiology — 2021 International Scientific Conference*; 2021 Sept 23–24; Gomel, Belarus. 2021; p. 176–9. Russian.
26. Tolstykh EI, Sharagin PA, Shishkina EA, Volchkova AY, Degteva MO. Anatomical and morphological basis for dosimetric modeling of the human trabecular bone using a stochastic parametric approach. *Clinical Bulletin of the Burnazyan State Medical Center*. 2022; 3: 25–40. Russian.
27. 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): 53–9. DOI: 10.1097/HP.0000000000001127.
28. 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.
29. 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.
30. Vogler JB 3rd, Murphy WA. Bone marrow imaging. *Radiology*. 1988; 168 (3): 679–93.
31. Vande Berg BC, Malghem J, Lecouvet FE, Maldague B. Magnetic resonance imaging of the normal bone marrow. *Skeletal Radiology*. 1998; 27: 471–83.
32. Vande Berg BC, Malghem J, Lecouvet FE, Maldague B. Magnetic resonance imaging of normal bone marrow. *Eur Radiol*. 1998; 8 (8): 1327–34.
33. 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.
34. 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.
35. 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.
36. Ryan TM, Krovitz GE. Trabecular bone ontogeny in the human proximal femur. *J Hum Evol*. 2006; 51 (6): 591–602.
37. Cunningham C, Scheuer L, Black S. Developmental Juvenile

- Osteology. 2nd ed. Elsevier Academic Press, 2016; p. 630.
38. Ryan TM, Raichlen DA, Gosman JH. Structural and mechanical changes in trabecular bone during early development in the human femur and humerus. Chapter 12. In: Percival CJ, Richtsmeier JT, editors. *Building Bones: Bone Formation and Development in Anthropology*. Cambridge University Press, 2017; p. 281–302.
 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. Volpato V. Bone endostructure morphogenesis of the human ilium. *C. R. Palevol*. 2008; 463–71. DOI: 10.1016/j.crpv.2008.06.001.
 41. 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.
 42. Gao S, Ren L, Qui R, Wu Z, Li C, Li J. Electron absorbed fractions in an image-based microscopic skeletal dosimetry model of chinese adult male. *Radiat Prot Dosimetry*. 2017; 175 (4): 450–9.
 43. Pafundi D. Image-based skeletal tissues and electron dosimetry models for the ICRP reference pediatric age series [dissertation]. Gainesville: University of Florida, 2009.
 44. Milenković P. Age Estimation Based on Analyses of Sternal End of Clavicle and the First Costal Cartilage Doctoral Dissertation [dissertation]. Belgrade: University Of Belgrade School of Medicine, 2013.
 45. Kirmani S, Christen D, van Lenthe GH, Fischer PR, Buxsein ML, McCready LK, et al. Bone structure at the distal radius during adolescent growth. *J Bone Miner Res*. 2009; 24 (6): 1033–42. DOI: 10.1359/jbmr.081255.
 46. Mitchell DM, Caksa S, Yuan A, Buxsein ML, Misra M, Burnett-Bowie SM. Trabecular bone morphology correlates with skeletal maturity and body composition in healthy adolescent girls. *J Clin Endocrinol Metab*. 2018; 103 (1): 336–45. DOI: 10.1210/je.2017-01785.
 47. Li X, Williams P, Curry EJ, Choi D, Craig EV, Warren RF, et al. Trabecular bone microarchitecture and characteristics in different regions of the glenoid. *Orthopedics*. 2015; 38 (3): 163–8.
 48. Knowles NK, G Langohr GD, Faieghi M, Nelson A, Ferreira LM. Development of a validated glenoid trabecular density-modulus relationship. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2019; 90: 140–5. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2018.10.013.
 49. Jun BJ, Vasanji A, Ricchetti ET, Rodriguez E, Subhas N, Li ZM, Iannotti JP. Quantification of regional variations in glenoid trabecular bone architecture and mineralization using clinical computed tomography images. *J Orthop Res*. 2018; 36 (1): 85–96. DOI: 10.1002/jor.23620.
 50. Frich LH, Odgaard A, Dalstra M. Glenoid bone architecture *J Shoulder Elbow Surg*. 1998; 7 (4): 356–61.
 51. Kneissel M, Roschger P, Steiner W, et al. Cancellous bone structure in the growing and aging lumbar spine in a historic Nubian population. *Calcif Tissue Int*. 1997; 61 (2): 95–100. DOI: 10.1007/s002239900302.
 52. Arbabi A. A quantitative analysis of the structure of human sternum. *J Med Phys*. 2009; 34 (2): 80–6.
 53. Bartl R, Frisch B. *Biopsy of bone in internal medicine — an atlas and sourcebook*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993; p. 250.
 54. Baur-Melnyk A. *Magnetic Resonance Imaging of the Bone Marrow*. Springer Science & Business Media, 2012; p. 371.
 55. 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.
 56. Maresh MM. Measurements from roentgenograms. In: McCammon RW, editor. *Human Growth and Development*. Springfield, IL: Charles C. Thomas, 1970; p. 157–200.
 57. Singh SP, Malhotra P, Sidhu LS, Singh PP. Skeletal frame size of spitian children. *Journal of Human Ecology*. 2007; 21 (3): 227–30.
 58. Živicnjak M, Smolej Narancić N, Szivovica L, Franke D, Hrenović J, Bisof V, et al. Gender-specific growth patterns of transversal body dimensions in Croatian children and youth (2 to 18 years of age). *Coll Antropol*. 2008; 32 (2): 419–31. PubMed PMID: 18756891.
 59. Svadovskij BS. Vozrastnaja perestrojka kostnoj tkani. O roste i razvitii diafizov plechevoj i bedrennoj kostej. M.: Izd-vo akad. ped. nauk RSFSR, 1961; p. 110. Russian.
 60. 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.
 61. 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. ISSN 2352-409.
 62. Djurić M, Milovanović P, Djonić D, Minić A, Hahn M. Morphological characteristics of the developing proximal femur: a biomechanical perspective. *Srp Arh Celok Lek*. 2012; 140 (11–12): 738–45. PubMed PMID: 23350248.
 63. 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.
 64. Petit MA, McKay HA, Mackelvie KJ, Heinonen A, Khan KM, Beck TJ. A randomized school-based jumping intervention confers site and maturity-specific benefits on bone structural properties in girls: a hip structural analysis study. *J Bone Miner Res*. 2002; 17 (3): 363–72. PubMed PMID: 11874228.
 65. 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.
 66. 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.
 67. 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.
 68. Pfeiffer S. Cortical Bone Histology in Juveniles. Available from: https://www.researchgate.net/publication/303179375_Cortical_bone_histology_in_Juveniles.
 69. Hresko AM, Hinchcliff EM, Deckey DG, Hresko MT. Developmental sacral morphology: MR study from infancy to skeletal maturity. *Eur Spine J*. 2020; 29 (5): 1141–6. DOI: 10.1007/s00586-020-06350-6.
 70. Kuznecov LE. *Perelomy taza u detej (morfologija, biomehanika, diagnostika)*. M.: Folium, 1994; p. 192. Russian.
 71. Mavrych V, Bolgova O, Ganguly P and Kashchenko S. Age-related changes of lumbar vertebral body morphometry. *Austin J Anat*. 2014; 1 (3): 7.
 72. Sadofeva VI. *Normal'naja rentgenoanatomija kostno-sustavnoj sistemy detej*. Leningrad: Medicina, 1990; p. 216. Russian.
 73. 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.
 74. White TD, Black MT, Folkens PA. *Human osteology: 3rd ed*. Academic Press, 2011; p. 688.
 75. Gindhart PS. Growth standards for the tibia and radius in children aged one month through eighteen years. *Am J Phys Anthropol*. 1973; 39: 41–8.
 76. 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. PubMed PMID: 21862250.
 77. 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. PubMed PMID: 26300243.
 78. Blake KAS. An investigation of sex determination from the subadult pelvis: A morphometric analysis [dissertation]. Pittsburgh: University of Pittsburgh, 2011.
 79. Cunningham CA, Black SM. Iliac cortical thickness in the neonate — the gradient effect. *J Anat*. 2009a; 215 (3): 364–70. DOI: 10.1111/j.1469-7580.2009.01112.x.

80. Cunningham CA, Black SM. Anticipating bipedalism: trabecular organization in the newborn ilium. *J Anat.* 2009b; 214 (6): 817–29. DOI: 10.1111/j.1469-7580.2009.01073.x.
81. Rissech C, Garcia M, Malgosa A. Sex and age diagnosis by ischium morphometric analysis. *Forensic Science International.* 2003; 135: 188–96.
82. Rissech C, Malgosa A. Pubis growth study: Applicability in sexual and age diagnostic. *Forensic Science International.* 2007; 173: 137–45.
83. 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.
84. 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.
85. 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.
86. 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.
87. Margulies S, Coats B. Experimental injury biomechanics of the pediatric head and brain. Chapter 4. In: Crandall J, Myers B, Meaney D, et al, editors. *Pediatric Injury Biomechanics.* New York: Springer Science+Business Media, 2013; p. 157–190.
88. 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). DOI: 10.1371/journal.pone.0127322.
89. Bleuze 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.
90. 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.
91. 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.
92. Corron L. Juvenile age estimation in physical anthropology: A critical review of existing methods and the application of two standardised methodological approaches. *Biological anthropology [dissertation].* Marseille: Aix-Marseille Universite, 2016.
93. Vallois HV. L'omoplate humaine. *Bulletin de la Société d'Anthropologie de Paris.* 1946; 7: 16–99.
94. 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.
95. 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.
96. Rissech C, Black S. Scapular development from neonatal period to skeletal maturity. A preliminary study. *Int J Osteoarchaeol.* 2007; 17: 451–64.
97. Bayaroğulları H, Yengil E, Davran R, Ağlagül E, Karazincir S, Balcı A. Evaluation of the postnatal development of the sternum and sternal variations using multidetector CT. *Diagn Interv Radiol.* 2014; 20 (1): 82–9.
98. Riach IC. Ossification in the sternum as a means of assessing skeletal age. *J Clin Pathol.* 1967; 20 (4): 589–90.
99. 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. PubMed PMID: 27231821.
100. Caldas Md P, Ambrosano GM, Haiter Neto F. New formula to objectively evaluate skeletal maturation using lateral cephalometric radiographs. *Braz Oral Res.* 2007; 21 (4): 330–5. PubMed PMID: 18060260.
101. Peters JR, Chandrasekaran C, Robinson LF, Servaes SE, Campbell RM Jr, Balasubramanian S. Age- and gender-related changes in pediatric thoracic vertebral morphology. *Spine J.* 2015; 15 (5): 1000–20. DOI: 10.1016/j.spinee.2015.01.016.
102. Peters JR, Servaes SE, Cahill PJ, Balasubramanian S. Morphology and growth of the pediatric lumbar vertebrae. *Spine J.* 2021; 21 (4): 682–97. DOI: 10.1016/j.spinee.2020.10.029.
103. Newman SL, Gowland RL. The use of non-adult vertebral dimensions as indicators of growth disruption and non-specific health stress in skeletal populations. *American journal of physical anthropology.* 2015; 158 (1): 155–64.
104. Comeau A. Age-related changes in geometric characteristics of the pediatric thoracic cage and comparison of thorax shape with a Pediatric CPR Manikin [dissertation]. Philadelphia: Drexel University, 2010.
105. Knirsch W, Kurtz C, Häfner N, Langer M, Kececioğlu D. Normal values of the sagittal diameter of the lumbar spine (vertebral body and dural sac) in children measured by MRI. *Pediatr Radiol.* 2005; 35: 419–24. DOI: 10.1007/s00247-004-1382-6.