

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ФАНТОМ ДЛЯ ДОЗИМЕТРИИ КРАСНОГО КОСТНОГО МОЗГА ДЕСЯТИЛЕТНЕГО 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

Остеотропные радионуклиды, в частности $^{89,90}\text{Sr}$, могут попадать в окружающую среду при различных техногенных радиационных инцидентах, откуда с пищей и водой они поступают в организм человека, что приводит к внутреннему облучению красного костного мозга (ККМ). Эти элементы были в составе радиоактивных сбросов в реку Теча в 1950-е гг., и являются основным источником облучения ККМ жителей прибрежных территорий. Оценка доз на ККМ опирается на дозиметрическое моделирование, которое включает разработку трехмерных вычислительных фантомов частей скелета. На основе имитации переноса энергии в этих фантомах оценивают коэффициенты перехода от активности радионуклида в кости к мощности дозы в ККМ. Целью исследования было разработать вычислительный фантом скелета десятилетнего ребенка для оценки доз на ККМ от инкорпорированных бета-излучателей. Для создания фантомов использовали оригинальный SPSPD (от англ. stochastic parametric skeletal dosimetry) подход. Согласно данной методике, участки скелета, содержащие ККМ, разбивались на меньшие сегменты простой геометрической формы, для которых генерировались воксельные фантомы. Параметры для генерации фантомов основаны на опубликованных данных, они включали: линейные размеры костей, толщину кортикального слоя, характеристики костной микроархитектуры, плотность и химический состав моделируемых сред и долю содержания ККМ в костях. Сгенерированный вычислительный фантом участков скелета с активным гемопоэзом десятилетнего ребенка состоит из 38 фантомов-сегментов. Линейные размеры сегментов были 3–88 мм, толщина кортикального слоя — 0,2–2,2 мм.

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 интерпретация данных, написание 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: 20.05.2024 **Статья принята к печати:** 21.06.2024 **Опубликована онлайн:** 29.06.2024

DOI: 10.47183/mes.2024.032

COMPUTATIONAL PHANTOM FOR THE DOSIMETRY OF THE RED BONE MARROW OF A 10-YEAR-OLD CHILD 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

Bone-seeking radionuclides, in particular $^{89,90}\text{Sr}$, could get into the environment in the course of various anthropogenic radiation incidents. From there they enter a human body with food and water. This leads to red bone marrow (RBM) internal exposure. These elements were present in the composition of radioactive releases into the Techa River in 1950s, and are the major source of RBM exposure for the residents of the riverside settlements. RBM dose estimation relies on dosimetric modeling which comprises the development of 3D computational phantoms of the skeleton parts. By imitating the energy transfer in these phantoms, the conversion coefficients from the radionuclide activity in a bone to the dose rate in RBM are evaluated. The given study is yet another step in the research aimed at the elaboration of a set of computational phantoms of the skeleton for people of various age. The objective is to develop a computational phantom of a skeleton of a 10-year-old child to estimate dose to RBM due to incorporated beta-emitters. Original SPSPD (stochastic parametric skeletal dosimetry) approach was used to create the phantoms. According to this method the skeleton sites containing RBM were divided into smaller segment of simple geometric shape, for which voxel phantoms were generated. The parameters for phantom generation were based on published research data. They included: linear dimensions of bones, thickness of the cortical layer, characteristics/properties of the bone micro-architecture, density and chemical composition of the modelled media and the percentage of RBM content in bones. Generated computational phantom of the skeleton sites with active hematopoiesis of a 10-year-old child consists of 38 phantom-segments. Linear dimensions of the segments were from 3 to 88 mm, cortical layer thickness: 0.2–2.2 mm.

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

Funding: the study was performed within the framework of the Federal Target Program "Ensuring Nuclear and Radiation Safety for 2016–2020 and 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 drafting and revising. Tolstykh EI — study methodology elaboration, manuscript revising and approval; Shishkina EA — study design and concept development, manuscript revising and approval.

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

Received: 20.05.2024 **Accepted:** 21.06.2024 **Published online:** 29.06.2024

DOI: 10.47183/mes.2024.032

Внутреннее облучение красного костного мозга (ККМ) остеотропными радионуклидами может приводить к серьезным медицинским последствиям для организма. Наиболее опасными и распространенными остеотропными

радионуклидами являются $^{89,90}\text{Sr}$. Эти элементы присутствовали в составе глобальных выпадений в результате испытаний ядерного оружия, а также поступали во внешнюю среду в результате других радиационных

инцидентов [1]. В частности, изотопы стронция присутствовали в составе радиоактивных сбросов в реку Теча в 1950-е гг., что привело к их накоплению в организме жителей прибрежных территорий [2–5]. Именно $^{89,90}\text{Sr}$ были основными источниками облучения ККМ для лиц в составе когорты реки Теча. Оценка доз этих радионуклидов является сложной задачей, которая включает в себя биокинетическое моделирование метаболизма радионуклида с целью оценки его концентрации в кости (ткани-источнике) [6], а также дозиметрическое моделирование, которое позволяет оценить коэффициенты перехода (DF) от активности радионуклида в кости к мощности поглощенной дозы в ККМ. Дозиметрические модели имитируют взаимное расположение ткани-источника и ткани-мишени. В настоящее время в качестве таких моделей используют вычислительные фантомы — трехмерные модели скелета и ККМ, внутри которых проводят имитацию переноса излучений. Современные фантомы скелета для оценки доз ККМ основаны на анализе изображений компьютерной томографии (КТ) скелета ограниченного числа умерших людей [7–13]. Ограниченное количество биопсийного материала не позволяет оценить неопределенности, связанные с изменчивостью размеров и микроархитектуры скелета внутри популяции. В качестве альтернативы в ФГБУН УНПЦ РМ был разработан оригинальный параметрический метод стохастического моделирования костных структур — SPSPD-моделирование (от англ. *stochastic parametric skeletal dosimetry*) [14, 15]. В рамках этого подхода предлагается использовать в качестве параметров модели многочисленные опубликованные результаты морфометрических и гистоморфометрических исследований костей. Большая статистика опубликованных измерений позволяет оценить неопределенности, связанные с индивидуальной вариабельностью параметров скелета. Общий SPSPD-фантом скелета представляет собой совокупность небольших фантомов-сегментов. Они представляют собой виртуальные модели простой геометрической формы, заполненные внутри трабекулярной костью с ККМ, расположенным в промежутках между трабекулами (костными тяжами). Часть поверхностей фантома покрыта слоем сплошной кортикальной кости. Таким образом SPSPD-фантомы имеют в своем составе две ткани-источника облучения: трабекулярную и кортикальную кость и одну ткань-детектор — ККМ.

Эта модель хорошо подходит для внутренней дозиметрии остеотропных бета-излучателей [14, 15]. Адекватность модели подтверждена хорошей сходимостью рассчитанных энергетических зависимостей для SPSPD-фантомов и аналогичных зависимостей, представленных в литературе [14, 16, 17].

В случае облучения населения радионуклиды могут поступать в организм человека разных возрастных групп. Так, в случае радиационного загрязнения реки Течи облучению подверглись лица в диапазоне от новорожденного до людей преклонного возраста [2–4, 18]. С целью оценки доз на ККМ для всех возрастных групп ранее нами были созданы SPSPD-фантомы скелета новорожденного [19], годовалого [20] и пятилетнего ребенка [21].

Цель настоящего исследования — разработка вычислительного фантома скелета десятилетнего ребенка для оценки доз в ККМ от инкорпорированных в кость бета-излучающих радионуклидов. Данное исследование — продолжение работы по созданию набора вычислительных фантомов стандартного человека для различных возрастных групп.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Вычислительный фантом 10-летнего ребенка был сгенерирован в рамках методики SPSPD так же, как и фантомы для младших возрастных групп [14]. Метод включал в себя следующие этапы:

- 1) оценка распределения ККМ внутри скелета, выделение моделируемых участков скелета с активным гемопоэзом (гемопоэтических сайтов);
- 2) оценка линейных размеров и параметров микроархитектуры моделируемых костей по опубликованным данным;
- 3) сегментация гемопоэтических сайтов;
- 4) генерация воксельных фантомов для каждого сегмента.

Для оценки распределения ККМ внутри скелета десятилетнего ребенка использовали данные МКРЗ [13], которые основаны на результатах МРТ-исследований [22].

Суммарно анализ включал результаты 11 927 измерений образцов костей [23, 24]. Для оценки морфометрических параметров фантомов десятилетнего ребенка рассматривали статьи в рецензируемых изданиях, атласы, руководства, монографии и диссертации. Также изучали электронные ресурсы, содержащие коллекции рентгеновских снимков. Для анализа принимали 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 — 8–12 лет.

Данные гистоморфометрии и микро-КТ были использованы для оценки параметров трабекулярной кости ($Tb. Th.$, $Tb. Sp.$, BV/TV) и толщины кортикального слоя. Оценивали следующие характеристики костной микроархитектуры: толщину трабекул ($Tb. Th.$), размер межтрабекулярного пространства ($Tb. Sp.$), долю костной ткани в объеме кости (BV/TV). Рассматривали данные измерений линейных размеров костей скелета с помощью различных техник: микрометров, анатомических боксов, ультразвуковых и рентгенологических исследований, а также КТ.

Кости в составе каждого участка скелета с активным гемопоэзом были разделены на относительно небольшие сегменты, для каждого сегмента будет смоделирован так называемый базовый фантом сегмента кости (БФСК) [25, 26]. Каждый сегмент должен иметь относительно однородную микроархитектуру и толщину кортикального слоя кости. Сегменты должны быть описаны простыми геометрическими формами (цилиндр, прямоугольный параллелепипед и др.) Такое разделение позволило учесть неоднородную микроархитектуру внутри кости. Кроме того, относительно небольшой размер сегментов позволяет генерировать имитирующие их фантомы с достаточно высоким разрешением.

В качестве параметров вычислительных фантомов принимали усредненные значения 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 [23].

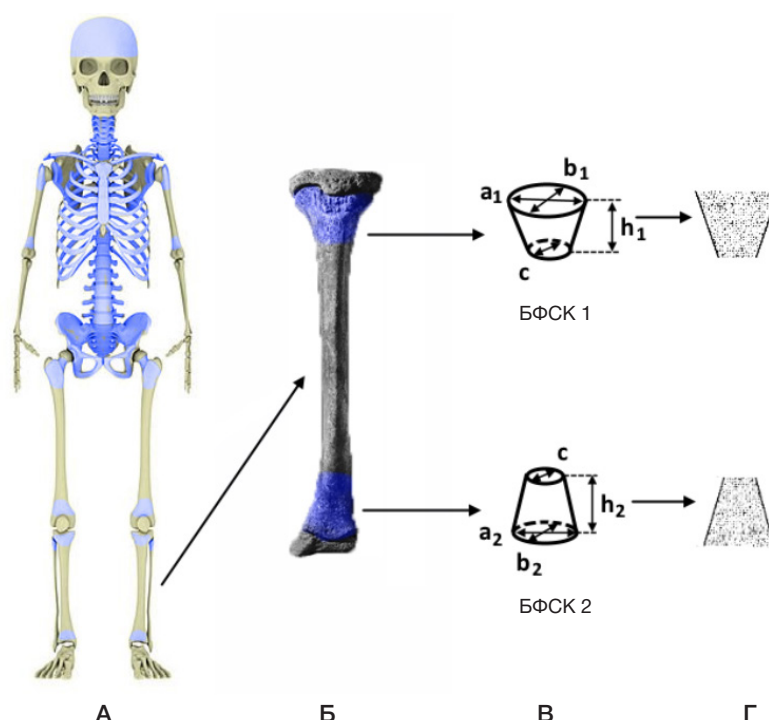


Рис. 1. Гемопоэтические сайты скелета десятилетнего ребенка и их сегментация на примере большеберцовой кости. **А.** Скелет десятилетнего ребенка (синим цветом выделены моделируемые участки скелета с активным гемопоэзом). **Б.** Большеберцовая кость (синим цветом выделены моделируемые участки скелета с активным гемопоэзом). **В.** Схема разделения кости на БФСК и их линейные параметры. **Г.** БФСК большеберцовой кости в воксельном представлении в разрезе (черным цветом показаны воксели, имитирующие кость, белым — ККМ)

Линейные размеры и параметры костной микроархитектуры, определяющие геометрию тканей источников и мишеней в составе БФСК, были определены отдельно для каждого сегмента. Помимо этих параметров, на основе опубликованных данных [27, 28] были определены химический состав и плотность моделируемых сред, которые были применены для всех БФСК десятилетнего ребенка.

Для каждого сегмента скелета был сгенерирован БФСК в воксельной форме, для этого использовали оригинальную программу Trabecula [29]. Каждый воксель в составе БФСК имитирует либо минерализованную кость, либо костный мозг (КМ), в зависимости от положения центра вокселя в фантоме.

Трабекулярную и кортикальную кости (ТК и КК соответственно) рассматривали в качестве тканей-источников, а в качестве ткани-детектора — костный мозг (КМ). КМ был равномерно распределен между трабекулами

внутри БФСК. Размер вокселя выбирали индивидуально для каждого фантома, он не превышал 70% от толщины трабекулы и варьировал от 50 до 200 мкм [29, 30]. Объемы моделируемых сред были автоматически рассчитаны в программе Trabecula для каждого БФСК.

Гемопоэтические сайты десятилетнего ребенка, процесс сегментации, а также смоделированные БФСК представлены на рис. 1 на примере большеберцовой кости.

SPSD-методика позволяет имитировать популяционную вариабельность размеров и характеристик микроструктуры для каждого БФСК. С этой целью для каждого БФСК, сгенерированного со средними значениями параметров, было создано 12 дополнительных фантомов сегментов кости (ДФСК) с параметрами микро- и макроструктуры кости, случайно разыгранными в пределах их индивидуальной вариабельности (в границах минимальных и максимальных измеренных значений).

Таблица 1. Массовая доля ККМ (% от общей массы ККМ в скелете) в основных гемопоэтических сайтах скелета ребенка в возрасте 10 лет [13, 22]

№	Гемопоэтический сайт	Массовая доля ККМ, %
1	Бедро	15,7
2	Плечо	4,1
3	Крестец	6,8
4	Берцовые кости	5,6
5	Тазовые кости	15,8
6	Череп	12,8
7	Ключица	0,9
8	Лопатка	2,9
9	Грудина	1,8
10	Рёбра	11
11	Шейные позвонки	2,7
12	Грудные позвонки	11
13	Поясничные позвонки	8,5

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

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

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Участки скелета с активным гемопоэзом ребенка в возрасте 10 лет и массовая доля ККМ в них были определены согласно данным МКРЗ [22] (табл. 1).

Скелет десятилетнего ребенка включает в себя 13 гемопоэтических сайтов (табл. 1). Массовая доля ККМ в них от общего содержания в скелете варьирует от 0,9 до 18,1%. Было также определено распределение ККМ внутри каждого гемопоэтического сайта согласно опубликованным данным МРТ [31–36].

Химический состав моделируемых сред был получен на основе данных МКРЗ для взрослых [25] (табл. 2).

Плотность минерализованной костной ткани оценена на основе результатов измерений плотности кортикальной кости детей в возрасте 10 лет и равна 1,85 г/см³ [26]. Плотность ККМ принимали равной плотности воды (1 г/см³) [25].

Характеристики микроструктуры кости были оценены на основе опубликованных данных, их анализ и расчет средне-популяционных значений подробно описаны ранее [23]. В табл. 3 приведены значения параметров микроархитектуры БФСК десятилетнего ребенка.

Линейные размеры и значения толщин кортикального слоя, принятые для БФСК десятилетнего ребенка, представлены в табл. 4.

Фантом гемопоэтических сайтов скелета десятилетнего ребенка состоит из 38 БФСК (табл. 4). Количество БФСК в

составе гемопоэтического сайта определялось его формой и варьировало от одного (ребра) до девяти (кости таза).

Большая часть БФСК десятилетнего ребенка представляет собой цилиндры и прямоугольные параллелепипеды, линейные размеры которых были в пределах 3–88 мм. Минимальное значение *Ct. Th.* было определено для БФСК позвонков (0,2 мм) и более чем в десять раз отличалось от максимального значения, принятого для проксимального конца бедренной кости (2,2 мм). Параметры микроархитектуры кости также варьировали в широких пределах. Значение *BV/TV* в БФСК варьирует от 14 до 52%, *Tb. Th.* — от 0,12 до 0,29 мм, *Tb. Sp.* — от 0,46 до 1 мм (табл. 3).

Индивидуальная вариабельность линейных размеров БФСК в среднем равна 12%, наибольшее значение вариабельности оценено для подвздошной кости (30%), а наименьшее — для латерального края лопатки (3%). Вариабельность толщины кортикального слоя кости была в пределах от 7% (шейные позвонки) до 62% (грудина) и в среднем равна 24%. Вариабельность параметров микроструктуры достигала 6–42% и в среднем составила 19%. Полученные значения вариабельности параметров фантомов были использованы для моделирования ДФСК. Объемы ДФСК могут отличаться от объема БФСК более чем в 3 раза как в большую, так и в меньшую сторону. Расчет *DF* для БФСК и ДФСК позволит оценить популяционную вариабельность *DF* как среднееквадратическое отклонение

Таблица 3. Параметры микроархитектуры, принятые для БФСК десятилетнего ребенка [11, 34–56] (в скобках дан коэффициент вариации (CV), %)

Гемопоэтический сайт	<i>BV/TV</i> , %	<i>Tb. Th.</i> , мм	<i>Tb. Sp.</i> , мм
Бедро (проксимальная часть)	35 (22–53)	0,24 (22)	0,54 (14)
Бедро (дистальная часть)	26 (17–40)		
Плечевая кость	22 (13–37)	0,21 (13)	0,58 (32)
Ребра	20 (10–37)	0,23 (34)	0,5 (14)
Берцовые кости*	25 (20–31)	0,21 (13)	0,74 (11)
Тазовые кости подвздошная кость	25 (20–31)	0,16 (10)	0,46 (15)
Прочие тазовые кости	25 (20–31)	0,16 (10)	0,6 (12)
Череп*	52 (41–65)	0,29 (32)	0,57 (35)
Ключица (центральная часть)	15 (10–23)	0,2 (32)	0,8 (25)
Ключица (концевые сегменты)	29 (15–46)	0,15 (13)	0,8 (25)
Лопатка*	22 (6–38)	0,24 (42)	0,96 (23)
Грудина*	15 (7–23)	0,15 (27)	1,0 (6)
Шейные позвонки	21 (12–35)	0,14 (14)	0,65 (24)
Грудные позвонки + поясничные позвонки + крестец	14 (7–26)	0,12 (17)	0,65 (24)

Примечания: * — параметры микроархитектуры рассчитаны по результатам измерений схожих костей или по данным для других возрастов, способ расчета описан ранее [23].

Таблица 4. Линейные размеры и толщина кортикального слоя, принятые для БФСК десятилетнего 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	Проксимальный конец (верхняя часть)	ц	30	25 (7)	25 (7)			1,8 (17)	[56–64]
	Проксимальный конец (нижняя часть)	ц	30	25 (7)	25 (7)			2,2 (12)	
	Дистальный конец	дц	69 (5)	78 (7)	33 (10)	21 (9)	21 (9)	1,1 (14)	
Плечо	Проксимальный конец	дц	27 (4)	39 (4)	33 (5)	18 (4)	18 (4)	1,1 (16)	[57–61,65]
	Дистальный конец	дц	27 (4)	54 (9)	18 (4)	18 (4)	18 (4)	0,8 (10)	
Ребра	Ребра ⁴	п	10 (16)	30	5 (10)			0,7 (20)	[66, 67]
Крестец	Тело 1-го позвонка	п	22 (20)	88 (20)	26 (10)			0,9 (34)	[68–73]
	Тело 2-го позвонка	п	20 (20)	70 (20)	15 (10)			0,9 (34)	
	Тело 3-го позвонка	п	18 (20)	62 (20)	10 (10)			0,9 (34)	
	Тело 4-го позвонка	п	13 (20)	53 (20)	7,7 (10)			0,9 (34)	
	Тело 5-го позвонка	п	13 (20)	44 (20)	7,7 (10)			0,9 (34)	
Берцовые	Конец малой берцовой кости ⁴	ц	30	11 (6)	11 (6)			1,7 (12)	[58, 70, 72]
	Проксимальный конец б. б.	дц	49 (6)	63 (7)	32 (20)	21 (6)	21 (6)	0,7 (11)	[57, 58, 74–77]
	Дистальный конец б. б.	дц	48 (6)	35 (12)	35 (12)	21 (6)	21 (6)	0,7 (11)	
Тазовые кости	Подвздошная кость часть 1	п	8 (22)	30	30			1,7 (33) 0,9 (19) ³	[78–85]
	Подвздошная кость часть 2	п	8 (22)	30	30			0,9 (19)	
	"Подвздошная кость вертлужная часть"	дц	26 (7)	44 (7)	20 (22)	37 (3)	28 (30)	0,9 (17)	
	Вертлужная часть лобковой кости	дц	9,8 (15)	28 (9)	21 (10)	16 (9)	11 (10)	0,5 (30)	
	Лобковая кость (верхняя ветвь)	ц	39 (15)	16 (9)	11 (10)			0,5 (30)	
	Лобковая кость (нижняя ветвь)	ц	32 (15)	11 (10)	11 (10)			0,5 (30)	
	Вертлужная часть седалищной кости	пр	29 (15)	28 (7)	29 (15)	28 (7)		0,5 (30)	
	Бугристость седалищной кости	ц	34 (15)	19 (15)	19 (15)			0,5 (30)	
	Нижняя ветвь седалищной кости	ц	32 (15)	11 (10)	11 (10)			0,5 (30)	
Череп	Плоские кости свода ⁴	п	4,6 (18)	30	30			1,2 (18)	[86, 87]
Ключица	Тело ⁴	ц	30	11 (12)	8,3 (10)			1,8 (26)	[88–90]
	Грудинный конец	дц	17 (7)	22 (11)	20 (11)	11 (12)	8,3 (10)	0,8 (26)	
	Акромиальный конец	дц	17 (7)	19 (11)	11 (23)	11 (12)	8,3 (10)	0,8 (26)	
Лопатка	Гленоид	ц	15 (5)	28 (5)	20 (7)			0,9 (28)	[91–93]
	Акромион	п	8,2 (18)	27 (8)	21 (8)			0,8 (13)	
	Латеральный край	п	30	3,5 (3)	10 (12)			0,8 (13)	
Грудина	Грудина	п	8,5 (15)	30	30			0,7 (62)	[39, 94, 95]
Шейные позвонки	Тело позвонка	ц	9,4 (12)	14 (7)	19 (13)			0,2 (7)	[79, 96, 97]
Грудные позвонки	Тело позвонка	ц	14 (17)	22 (21)	27 (24)			0,2 (25)	[98–101]
	Поперечный отросток	п	8,6 (21)	13 (21)	7,3 (21)			0,2 (25)	
	Остистый отросток	п	7,2 (21)	25 (21)	4,1 (21)			0,2 (25)	
Поясничные позвонки	Тело позвонка	ц	19 (18)	27 (21)	36 (21)			0,2 (25)	[73, 98, 99, 102]
	Поперечный отросток	п	8,6 (20)	16 (20)	5,2 (20)			0,2 (25)	
	Остистый отросток	п	17 (20)	27 (20)	5,2 (20)			0,2 (25)	

Примечания: ¹ — форму фантома обозначали следующим образом: ц — цилиндр, дц — деформированный цилиндр, п — прямоугольный параллелепипед, э — эллипсоид, пр — призма с треугольным основанием; ² — размеры БФСК обозначали следующим образом: *h* — высота; *a* — большая ось (ц), большая ось для большего основания (дц) или сторона *a* (п); *b* — малая ось (ц), малая ось для большего основания (дц) или сторона *b* (п); *c* — большая ось для меньшего основания (дц); *d* — малая ось для меньшего основания (дц); для призмы (пр): *a*, *b*, *c* — стороны треугольного основания; 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 [15, 24].

значений DF, рассчитанных для ДФСК, от значений, рассчитанных для БФСК.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Фантом скелета десятилетнего ребенка состоит из меньшего количества БФСК, чем фантом скелета пятилетнего ребенка. Это связано с замещением ККМ желтым костным мозгом в диафизах трубчатых костей, из-за чего данные участки скелета не моделировались.

В 10 лет наибольшая доля ККМ находится в костях таза и бедренных костях, в отличие от младших возрастных групп, где наибольшая доля ККМ была характерна для костей черепа. Также в этом возрасте на сегменты позвонков и крестца приходится 29% от всего ККМ в скелете. Параметры микроструктуры БФСК изменяются слабо по сравнению с фантомом пятилетнего ребенка, есть тенденция к уменьшению BV/TV и Tb.Th. и увеличению Tb.Sp. Толщина кортикального слоя увеличилась за период 5–10 лет на 20% в каждом отдельно взятом

Таблица 5. Сравнение объемов БФСК пятилетнего и десятилетнего ребенка

БФСК	Моделируемая среда	Объем моделируемой структуры, см³		
		5 лет	10 лет	10/5 лет
Дистальный конец бедренной кости	КМ	22,9	49,94	2,18
	ТК	7,56	17,49	2,31
	КК	5,21	8,97	1,72
	Весь БФСК	35,67	76,4	2,14
Ключица, грудинный конец	КМ	0,89	1,8	2,02
	ТК	0,36	0,73	2,03
	КК	0,22	0,58	2,64
	Весь БФСК	1,47	2,53	1,72
Тело поясничного позвонка	КМ	8,51	12,42	1,46
	ТК	1,34	1,97	1,47
	КК	0,3	0,38	1,27
	Весь БФСК	10,15	14,77	1,46
Тело шейного позвонка	КМ	0,89	1,43	1,61
	ТК	0,24	0,38	1,58
	КК	0,05	0,07	1,4
	Весь БФСК	1,18	1,88	1,59

БФСК. Возрастную динамику характеристик фантомов можно продемонстрировать путем сравнения объемов моделируемых сред. В табл. 5 представлено сравнение объемов участков скелета пятилетнего и десятилетнего ребенка на примере дистального участка бедренной кости, ключицы, тел шейного и поясничного позвонков.

Объемы моделируемых сред десятилетнего ребенка превышают таковые для пятилетнего, что отражает рост костей скелета (табл. 5). Объем тканей источников в среднем увеличился в 1,96 раз — для ТК и в 1,48 раз — для КК. Суммарный объем БФСК увеличился в 1,6 раз за период 5–10 лет, за тот же период суммарный объем КК увеличился только в 1,3 раза, что связано с прекращением гемопоэза в частях скелета с большим значением *Ct.Th*. (середина диафизов длинных трубчатых костей). Мы ожидаем, что такая возрастная динамика характеристик фантомов приведет к снижению DF от стронция, инкорпорированного в кортикальной кости.

В ходе дальнейшей работы, параметры фантомов (табл. 3, 4), приведенные в этой статье, будут 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 10 лет. Разработку данных фантомов проводили по методологии SPSPD, как и для фантомов предыдущих возрастных групп. Полученные фантомы имитируют структуру костной ткани, а их наборы отражают популяционную вариабельность размеров структур отдельных костей скелета. Представленный фантом для десятилетнего 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 позволит усовершенствовать дозовые оценки для жителей Уральского региона. В качестве направления дальнейшей работы мы планируем создать SPSPD-фантомы скелета для лиц мужского и женского пола в возрасте 15 лет и для взрослых. Представленные фантомы могут быть использованы для дозиметрии инкорпорированных остеотропных бета-излучателей у населения, при попадании радионуклидов в окружающую среду, а также для дозиметрии других бета-излучающих радионуклидов, в том числе применяемых в радионуклидной терапии, таких как ⁸⁹Sr, ³²P, ¹⁸⁶Re, ¹⁸⁸Re, ^{117m}Sn.

Литература

1. Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes/ United Nations. New York, 2000; 1229 c.

2. 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.

3. 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.

4. Аклев А. В. Хронический лучевой синдром у жителей

прибрежных сел реки Теча. Челябинск: Книга, 2012; 464 с.

5. 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.

6. 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.

7. 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.
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; 61 (24): 8794–24. 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. Epub 2011 Mar 22.
13. 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.
14. 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. Available from: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257605>.
15. 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). DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-66-75.
16. 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.
17. Шишкина Е. А., Шарагин П. А., Волчкова А. Ю. Аналитическое описание дозобразования в костном мозге от ^{90}Sr , инкорпорированного в кальцифицированных тканях. *Вопросы радиационной безопасности*. 2021; 3: 72–82.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. Шарагин П. А., Толстых Е. И., Шишкина Е. А. Вычислительный фантом для дозиметрии красного костного мозга пятилетнего ребенка от инкорпорированных бета-излучателей. *Медицина экстремальных ситуаций*. 2023; (4): 86–97. DOI: 10.47183/mes.2023.061.
22. Cristy M. Active bone marrow distribution as a function of age in humans. *Phys Med Biol*. 1981; 26 (3): 389–400. 1981.
23. 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.
24. 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»*. Беларусь, Гомель, 23–24 сентября 2021. 2021; с. 176–179.
25. Шарагин П. А., Толстых Е. И., Шишкина Е. А., Дегтева М. О. Дозиметрическое моделирование кости для остеотропных бета-излучающих радионуклидов: размерные параметры и сегментация. В сборнике: *Материалы международной научной конференции «Современные проблемы радиобиологии»*. Беларусь, Гомель, 23–24 сентября 2021. 2021; с. 200–204.
26. 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. In: *RAD Conference Proceedings*. 2018; (3): 154–58. DOI: 10.21175/RadProc.2018.33.
27. Valentin J. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values. *Annals of the ICRP*. 2002; 32 (3–4): 1–277.
28. Woodard HQ and White DR. The composition of body tissues. *Br J Radiol*. 1986; 59: 1209–18.
29. 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.
30. 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.
31. Robinson RA. Chemical analysis and electron microscopy of bone. In: *Bone as a tissue*, ed. by Rodahl K, Nicholson JT, Brown EM. New York: McGraw-Hill, 1960; p. 186–250.
32. Vogler JB 3rd, Murphy WA. Bone marrow imaging. *Radiology*. 1988; 168 (3): 679–93.
33. Vande Berg BC, Malghem J, Lecouvet FE, Maldague B. Magnetic resonance imaging of the normal bone marrow. *Skeletal Radiology*. 1998; 27: 471–83.
34. Vande Berg BC, Malghem J, Lecouvet FE, Maldague B. Magnetic resonance imaging of normal bone marrow. *Eur Radiol*. 1998; 8 (8): 1327–34.
35. 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.
36. 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.
37. 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.
38. Ryan TM, Krovit GE. Trabecular bone ontogeny in the human proximal femur. *J Hum Evol*. 2006; 51 (6): 591–602.
39. Cunningham C, Scheuer L, Black S. *Developmental Juvenile Osteology*. Second Edition. Elsevier Academic Press. 2016.
40. man 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.
41. Glorieux FH, Travers R, Taylor A, Bowen JR, Rauch F, Norman M, Parfitt AM. Normative data for iliac bone histomorphometry in growing children. *Bone*. 2000; 26 (2): 103–9.
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): 450–59.
43. 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.

44. 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: Building Bones: Bone Formation and Development in Anthropology. Cambridge University Press 2017; 281–302. Available from: <https://doi.org/10.1017/9781316388907.013>.
45. Milenković P. Age Estimation Based on Analyses of Sternal End of Clavicle and the First Costal Cartilage Doctoral Dissertation. University OF Belgrade School of Medicine. Belgrade, 2013.
46. Kimani S, Christen D, van Lenthe GH, Fischer PR, Bouxsein ML, McCready LK, Melton LJ 3rd, Riggs BL, Amin S, Müller R, Khosla S. Bone structure at the distal radius during adolescent growth. *J Bone Miner Res*. 2009; 24 (6): 1033–42. DOI: 10.1359/jbmr.081255.
47. Mitchell DM, Caksa S, Yuan A, Bouxsein 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/clinem.2017-01785.
48. 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): 163–68.
49. 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: 140–45. DOI: 10.1016/j.jmbm.2018.10.013.
50. Jun BJ, Vasani 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.
51. Frich LH, Odgaard A, Dalstra M. Glenoid bone architecture *J Shoulder Elbow Surg*. 1998; 7 (4): 356–61.
52. 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.
53. Arbabi A. A quantitative analysis of the structure of human sternum. *J Med Phys*. 2009; 34 (2): 80–86.
54. Bartl R, Frisch B. Biopsy of bone in internal medicine — an atlas and sourcebook. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. London, 1993.
55. Baur-Melnyk A. Magnetic Resonance Imaging of the Bone Marrow. Springer Science & Business Media, 2012.
56. 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.
57. 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.
58. Maresh MM. Measurements from roentgenograms. In: R.W. McCammon, editor. Human Growth and Development. Springfield, IL: Charles C. Thomas, 1970; 157–200.
59. Singh SP, Malhotra P, Sidhu LS, Singh PP. Skeletal Frame Size of Spitian Children. *Journal of Human Ecology*. 2007; 21 (3): 227–30.
60. Živicnjak M, Smolej Narancić N, Szivovica L, Franke D, Hrenović J, Bisof V, Tomas Z, Skarić-Jurić T. 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.
61. 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.
62. 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.
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. 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.
67. Pfeiffer S. Cortical Bone Histology in Juveniles. Available from: https://www.researchgate.net/publication/303179375_Cortical_bone_histology_in_Juveniles
68. 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>.
69. Кузнецов Л. Е. Переломы таза у детей (морфология, биомеханика, диагностика). Москва: Фолиум, 1994; 192 с.
70. 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.
71. Sadofyeva VI. Normal X-ray anatomy of the bone-joint system of children. Leningrad "Medicine" Leningrad branch 1990. Russian
72. White TD, Black MT, Folken PA. Human osteology: Third edition. Human Osteology: Third Edition. 2011; 1–662.
73. Mavrych V, Bolgova O, Ganguly P and Kashchenko S. Age-Related Changes of Lumbar Vertebral Body Morphometry. *Austin J Anat*. 2014; 1 (3): 7.
74. Kindler JM, Pollock NK, Laing EM, et al. Insulin Resistance and the IGF-I-Cortical Bone Relationship in Children Ages 9 to 13 Years. *J Bone Miner Res*. 2017; 32 (7): 1537–1545. DOI: 10.1002/jbmr.3132.
75. Farr JN, Khosla S. Skeletal changes through the lifespan—from growth to senescence. *Nat Rev Endocrinol*. 2015; 11 (9): 513–21. DOI: 10.1038/nrendo.2015.89. Epub 2015 Jun 2. Review. PubMed PMID: 26032105; PubMed Central PMCID: PMC4822419.
76. 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.
77. 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. PubMed PMID: 21862250.
78. Blake KAS. An investigation of sex determination from the subadult pelvis: A morphometric analysis. Doctoral Dissertation, University of Pittsburgh, 2011.
79. Cunningham CA, Black SM. Iliac cortical thickness in the neonate — the gradient effect. *J Anat*. 2009a Sep; 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 Jun; 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: *Pediatric Injury Biomechanics* Springer Science + Business Media New York. 2013; 157–90.
88. 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
89. 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
90. Corron L. Juvenile age estimation in physical anthropology: A critical review of existing methods and the application of two standardised methodological approaches. *Biological anthropology*. Aix-Marseille Universite. English, 2016.
91. 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.
92. 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.
93. Rissech C, Black S. Scapular development from neonatal period to skeletal maturity. A preliminary study. *Int J Osteoarchaeol*. 2007; 17: 451–64.
94. Bayarogullari H, Yengil E, Davran R, Aglagul 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.
95. Weaver AA, Schoell SL, Nguyen CM, Lynch SK, Stitzel JD. Morphometric analysis of variation in the sternum with sex and age. *J Morphol*. 2014; 275 (11): 1284–99.
96. Johnson KT, Al-Holou WN, Anderson RC, Wilson TJ, Karnati T, 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.
97. Caldas Md P, Ambrosano GM, Haider Neto F. New formula to objectively evaluate skeletal maturation using lateral cephalometric radiographs. *Braz Oral Res*. 2007; 21 (4): 330–5. PubMed PMID: 18060260
98. 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): 1000–1020. DOI: 10.1016/j.spinee.2015.01.016.
99. 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.
100. 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.
101. 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
102. Knirsch W, Kurtz C, Häffner N, Langer M, Kecicioglu 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. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00247-004-1382-6>.

References

1. Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes/ United Nations. New York, 2000; 1229 c.
2. 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.
3. 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.
4. Akleev AV. Hronicheskij luchevoj sindrom u zhitelej pribrezhnyh sel reki Techa. Cheljabinsk: Kniga, 2012; 464 s. Russian.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
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; 61 (24): 8794–24. 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. Epub 2011 Mar 22.
13. 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.
14. 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. Available from: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257605>.
15. Djogteva MO, Shishkina EA, Tolstykh EI, Zalyapin VI, Sharagin PA, Smit MA, i dr. Metodologicheskij podhod k razrabotke dozimetricheskikh modelej skeleta cheloveka dlja beta-izluchajushhih radionuklidov. *Radiacionnaja gigiena*. 2019; 12 (2). DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-66-75. Russian.
16. 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.
17. Shishkina EA, Sharagin PA, Volchkova AY. Analiticheskoe opisanie dozoobrazovaniya v kostnom mozge ot 90Sr, inkorporirovannogo v kal'ficirovannyh tkanjah. *Voprosy radiacionnoj bezopasnosti*. 2021; 3: 72–82. Russian.
18. Silkin SS, Krestinina LY, Starcev NV, Akleev AV. Ural'skaja kogorta avarijno-obluchennogo naselenija. *Medicina jekstremal'nyh situacij*. 2019; 21 (3): 393–402. Russian.
19. 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.
20. 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.
21. Sharagin PA, Tolstykh EI, Shishkina EA. Computational phantom for a 5-year-old child red bone marrow dosimetry due to incorporated beta emitters. *Extreme Medicine*. 2023; (4): 79–90. DOI: 10.47183/mes.2023.061. Russian.
 22. Cristy M. Active bone marrow distribution as a function of age in humans. *Phys Med Biol*. 1981; 26 (3): 389–400. 1981.
 23. Tolstykh EI, Sharagin PA, Shishkina EA, Volchkova AY, Degteva MO. Anatomico-morphological basis for the dosimetric modeling of trabecular bone of the human skeleton. *Klinicheskiy vestnik GNC FMBC im. A. I. Burnazhina*. 2022; 3: 25–40. Russian.
 24. Tolstykh EI, Sharagin PA, Shishkina EA, Degteva MO. Formirovanie doz obлучeniya krasnogo kostnogo mozga cheloveka ot 89,90Sr, ocenka parametrov trabekulyarnoy kosti dlja dozimetricheskogo modelirovaniya. V sbornike: *Materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Sovremennye problemy radiobiologii»*. Belarus', Gomel', 23–24 sentjabrja 2021. 2021; s. 176–179. Russian.
 25. Sharagin PA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Degteva MO. Dozimetriceskoe modelirovanie kosti dlja osteotropnykh beta-izluchajushchih radionuklidov: razmernye parametry i segmentacija. V sbornike: *Materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Sovremennye problemy radiobiologii»*. Belarus', Gomel', 23–24 sentjabrja 2021. 2021; s. 200–204. Russian.
 26. 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. In: *RAD Conference Proceedings*. 2018; (3): 154–58. DOI: 10.21175/RadProc.2018.33.
 27. Valentin J. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values. *Annals of the ICRP*. 2002; 32 (3–4): 1–277.
 28. Woodard HQ and White DR. The composition of body tissues. *Br J Radiol*. 1986; 59: 1209–18.
 29. 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.
 30. Zalyapin VI, Timofeev YS, 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/mmmp180204.
 31. Robinson RA. Chemical analysis and electron microscopy of bone. In: *Bone as a tissue*, ed. by Rodahl K, Nicholson JT, Brown EM. New York: McGraw-Hill, 1960; p. 186–250.
 32. Vogler JB 3rd, Murphy WA. Bone marrow imaging. *Radiology*. 1988; 168 (3): 679–93.
 33. Vande Berg BC, Malghem J, Lecouvet FE, Maldague B. Magnetic resonance imaging of the normal bone marrow. *Skeletal Radiology*. 1998; 27: 471–83.
 34. Vande Berg BC, Malghem J, Lecouvet FE, Maldague B. Magnetic resonance imaging of normal bone marrow. *Eur Radiol*. 1998; 8 (8): 1327–34.
 35. 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.
 36. 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.
 37. 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.
 38. Ryan TM, Krovitz GE. Trabecular bone ontogeny in the human proximal femur. *J Hum Evol*. 2006; 51 (6): 591–602.
 39. Cunningham C, Scheuer L, Black S. *Developmental Juvenile Osteology*. Second Edition. Elsevier Academic Press. 2016.
 40. man 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.
 41. Glorieux FH, Travers R, Taylor A, Bowen JR, Rauch F, Norman M, Parfitt AM. Normative data for iliac bone histomorphometry in growing children. *Bone*. 2000; 26 (2): 103–9.
 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): 450–59.
 43. 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.
 44. 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: *Building Bones: Bone Formation and Development in Anthropology*. Cambridge University Press 2017; 281–302. Available from: <https://doi.org/10.1017/9781316388907.013>.
 45. Milenković P. Age Estimation Based on Analyses of Sternal End of Clavicle and the First Costal Cartilage Doctoral Dissertation. University OF Belgrade School of Medicine. Belgrade, 2013.
 46. Kirmani S, Christen D, van Lenthe GH, Fischer PR, Boussein ML, McCready LK, Melton LJ 3rd, Riggs BL, Amin S, Müller R, Khosla S. Bone structure at the distal radius during adolescent growth. *J Bone Miner Res*. 2009; 24 (6): 1033–42. DOI: 10.1359/jbmr.081255.
 47. Mitchell DM, Caksa S, Yuan A, Boussein 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.
 48. 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): 163–68.
 49. 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: 140–45. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2018.10.013.
 50. Jun BJ, Vasani 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.
 51. Frich LH, Odgaard A, Dalstra M. Glenoid bone architecture J Shoulder Elbow Surg. 1998; 7 (4): 356–61.
 52. 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.
 53. Arbabi A. A quantitative analysis of the structure of human sternum. *J Med Phys*. 2009; 34 (2): 80–86.
 54. Bartl R, Frisch B. *Biopsy of bone in internal medicine — an atlas and sourcebook*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. London, 1993.
 55. Baur-Melnyk A. *Magnetic Resonance Imaging of the Bone Marrow*. Springer Science & Business Media, 2012.
 56. 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.
 57. 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.
 58. Maresh MM. Measurements from roentgenograms. In: R.W. McCammon, editor. *Human Growth and Development*. Springfield, IL: Charles C. Thomas, 1970; 157–200.
 59. Singh SP, Malhotra P, Sidhu LS, Singh PP. Skeletal Frame Size of Spitian Children. *Journal of Human Ecology*. 2007; 21 (3): 227–30.
 60. Zivcinkjak M, Smolej Narancić N, Szircovicza L, Franke D, Hrenović J, Bisof V, Tomas Z, Skarić-Jurić T. 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.
61. Svadovskij BS. Vozrastnaja perestrojka kostnoj tkani. O roste i razvitii diafizov plechevoj i bedrennoj kostej. M.: Izd-vo akad. ped. nauk RSFSR, 1961; 110 s.
 62. 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.
 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. 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.
 67. Pfeiffer S. Cortical Bone Histology in Juveniles. Available from: https://www.researchgate.net/publication/303179375_Cortical_bone_histology_in_Juveniles
 68. 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>.
 69. Kuznecov LE. *Perelomy taza u detej (morfologija, biomehanika, diagnostika).* Moskva: Folium, 1994; 192 s. Russian.
 70. 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.
 71. Sadofyeva VI. Normal X-ray anatomy of the bone-joint system of children. Leningrad "Medicine" Leningrad branch 1990. Russian.
 72. White TD, Black MT, Folkens PA. *Human osteology: Third edition. Human Osteology: Third Edition.* 2011; 1–662.
 73. Mavrych V, Bolgova O, Ganguly P and Kashchenko S. Age-Related Changes of Lumbar Vertebral Body Morphometry. *Austin J Anat.* 2014; 1 (3): 7.
 74. Kindler JM, Pollock NK, Laing EM, et al. Insulin Resistance and the IGF-I-Cortical Bone Relationship in Children Ages 9 to 13 Years. *J Bone Miner Res.* 2017; 32 (7): 1537–1545. DOI: 10.1002/jbmr.3132.
 75. Farr JN, Khosla S. Skeletal changes through the lifespan—from growth to senescence. *Nat Rev Endocrinol.* 2015; 11 (9): 513–21. DOI: 10.1038/nrendo.2015.89. Epub 2015 Jun 2. Review. PubMed PMID: 26032105; PubMed Central PMCID: PMC4822419.
 76. 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.
 77. 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. PubMed PMID: 21862250.
 78. Blake KAS. An investigation of sex determination from the subadult pelvis: A morphometric analysis. Doctoral Dissertation, University of Pittsburgh, 2011.
 79. Cunningham CA, Black SM. Iliac cortical thickness in the neonate — the gradient effect. *J Anat.* 2009a Sep; 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 Jun; 214 (6): 817–29. DOI: 10.1111/j.1469-7580.2009.01073.x.
 81. Rissech C, Garcia M, Malsosa A. Sex and age diagnosis by ischium morphometric analysis. *Forensic Science International.* 2003; 135: 188–96.
 82. Rissech C, Malsosa 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: *Pediatric Injury Biomechanics* Springer Science + Business Media New York. 2013; 157–90.
 88. 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.
 89. 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.
 90. Corron L. Juvenile age estimation in physical anthropology: A critical review of existing methods and the application of two standardised methodological approaches. *Biological anthropology.* Aix-Marseille Universite. English, 2016.
 91. Saunders S, Hoppa R, Southern R. Diaphyseal growth in a nineteenth-century skeletal sample of subadults from St Thomas' Church, Belleville, Ontario. *International Journal of Osteoarcheology.* 1993; 3: 265–81.
 92. 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.
 93. Rissech C, Black S. Scapular development from neonatal period to skeletal maturity. A preliminary study. *Int J Osteoarcheol.* 2007; 17: 451–64.
 94. Bayarogullari H, Yengil E, Davran R, Ađlagul 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.
 95. Weaver AA, Schoell SL, Nguyen CM, Lynch SK, Stitzel JD. Morphometric analysis of variation in the sternum with sex and age. *J Morphol.* 2014; 275 (11): 1284–99.
 96. Johnson KT, Al-Holou WN, Anderson RC, Wilson TJ, Karnati T, 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.
 97. Caldas Md P, Ambrosano GM, Haider Neto F. New formula to objectively evaluate skeletal maturation using lateral cephalometric radiographs. *Braz Oral Res.* 2007; 21 (4): 330–5. PubMed PMID: 18060260.
 98. 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): 1000–1020. DOI: 10.1016/j.spinee.2015.01.016.
 99. 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.
 100. 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.
 101. 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.
 102. 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. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00247-004-1382-6>.