

<https://doi.org/10.47183/mes.2025-286>

УДК 614.876



## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ФАНТОМ ДЛЯ ДОЗИМЕТРИИ КРАСНОГО КОСТНОГО МОЗГА ДЛЯ ВЗРОСЛЫХ МУЖЧИНЫ И ЖЕНЩИНЫ

П.А. Шарагин<sup>1</sup>✉, Е.И. Толстых<sup>1</sup>, Е.А. Шишкина<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Уральский научно-практический центр радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства, Челябинск, Россия<sup>2</sup>Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

**Введение.** Оценка доз внутреннего облучения красного костного мозга (ККМ) от остеотропных радионуклидов основана на дозиметрическом моделировании с использованием вычислительных фантомов. Создание таких фантомов для <sup>89,90</sup>Sr требует аккуратного описания формы и размеров костей, а также их микроархитектуры. В настоящее время опубликованы описания фантомов новорожденного, годовалого, 5-летнего и 10-летнего детей. Данное исследование — очередной этап работы по созданию набора вычислительных фантомов скелета для людей разного возраста.

**Цель.** Разработка вычислительных фантомов скелета взрослых мужчины и женщины для оценки доз в ККМ от инкорпорированных бета-излучающих радионуклидов.

**Материалы и методы.** В работе был использован СПСД-метод (stochastic parametric skeletal dosimetry) создания фантомов. Участки скелета с активным гемопоэзом разделяли на сегменты. По литературным данным были оценены параметры моделей сегментов: линейные размеры, толщина кортикального слоя, характеристики костной микроархитектуры, плотность, химический состав и доля содержания ККМ.

**Результаты.** Разработанные фантомы взрослых мужчины и женщины являются составными и включают по 46 сегментов; параметры 21 сегмента не зависели от пола. Размеры фантомов-сегментов были в пределах 4–66 мм, толщина кортикального слоя — в пределах 0,3–2,2 мм. Параметры микроархитектуры костных сегментов представлены в статье.

**Выводы.** Полученные фантомы имитируют микро- и макроархитектуру костной ткани и вместе с наборами дополнительных фантомов отражают популяционную вариабельность отдельных костей скелета, а также учитывают половые различия. Сгенерированные фантомы могут быть использованы для внутренней дозиметрии остеотропных бета-излучателей, в том числе в составе радиофармпрепаратов.

**Ключевые слова:** трабекулярная кость; кортикальная кость; дозиметрия костного мозга; вычислительные фантомы; стронций; вычислительный фантом взрослого

**Для цитирования:** Шарагин П.А., Толстых Е.И., Шишкина Е.А. Вычислительный фантом для дозиметрии красного костного мозга для взрослых мужчины и женщины. *Медицина экстремальных ситуаций.* 2025;27(2):220–228. <https://doi.org/10.47183/mes.2025-286>

**Финансирование:** работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2035 года» (шифр: «Радиометрия-22») и при финансовой поддержке Федерального медико-биологического агентства.

**Потенциальный конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

✉ Шарагин Павел Алексеевич [sharagin@urcrm.ru](mailto:sharagin@urcrm.ru)

Статья поступила: 30.10.2024 После доработки: 07.02.2025 Принята к публикации: 03.03.2025 Online first: 12.04.2025

## COMPUTATIONAL PHANTOM FOR RED BONE MARROW DOSIMETRY IN ADULT MALES AND FEMALES

Pavel A. Sharagin<sup>1</sup>✉, Evgenia I. Tolstykh<sup>1</sup>, Elena A. Shishkina<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Urals Research Center for Radiation Medicine, Chelyabinsk, Russia<sup>2</sup>Chelyabinsk State University, Chelyabinsk Russia

**Introduction.** The dose assessment of internal irradiation of red bone marrow (RBM) by osteotropic radionuclides is based on dosimetric modeling using computational phantoms. Creating such phantoms for <sup>89,90</sup>Sr requires careful description of the shape and size of bones, as well as their microarchitecture. Descriptions of phantoms representing newborn, one-year-old, 5-year-old, and 10-year-old children have been published. Our study continues work on creating a set of computational skeletal phantoms for people of different ages.

**Objective.** Development of computational skeletal phantoms of male and female adults for estimating radiation doses of beta-emitting radionuclides incorporated in RBM.

**Materials and methods.** The stochastic parametric skeletal dosimetry (SPSD) method of creating phantoms was used. The skeletal sections with active hematopoiesis were divided into segments. On the basis of literature data, the parameters of segment models were evaluated: linear dimensions, cortical layer thickness, bone microarchitecture characteristics, density, chemical composition, and RBM proportion.

**Results.** The developed phantoms of male and female adults are composite, including 46 segments each; the parameters of 21 segments were independent of sex. The sizes of segment phantoms range within 4–66 mm; the cortical layer thickness ranges within 0.3–2.2 mm. The parameters of bone segment microarchitecture are presented.

**Conclusions.** The resulting phantoms simulate the micro- and macro-architecture of bone tissue, and, together with sets of additional phantoms, represent the population variability of individual skeletal bones and take sex differences into account. The developed phantoms can be used for internal dosimetry of osteotropic beta-emitters, including as part of radiopharmaceuticals.

**Keywords:** trabecular bone; cortical bone; bone marrow dosimetry; computational phantoms; strontium; computational phantom of an adult

**For citation:** Sharagin P.A., Tolstykh E.I., Shishkina E.A. Computational phantom for red bone marrow dosimetry in adult males and females. *Extreme Medicine.* 2025;27(2):220–228. <https://doi.org/10.47183/mes.2025-286>

**Funding:** the research was carried out under the state assignment (code “Radiometry-22”) and with the financial support of the Federal Medical and Biological Agency of Russia.

**Potential conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

✉ Pavel A. Sharagin [sharagin@urcrm.ru](mailto:sharagin@urcrm.ru)

Received: 30 Oct. 2024 Revised: 7 Feb. 2025 Accepted: 3 Mar. 2025 Online first: 12 Apr. 2025

© П.А. Шарагин, Е.И. Толстых, Е.А. Шишкина, 2025

## ВВЕДЕНИЕ

Изотопы стронция накапливаются в минерализованной костной ткани и локально облучают красный костный мозг (ККМ), что может приводить к увеличению риска развития лейкозов. Изотопы  $^{89,90}\text{Sr}$  были основными источниками облучения ККМ для жителей прибрежных территорий реки Теча, загрязненной радионуклидами в 1950-е годы в результате радиоактивных сбросов производственного объединения «Маяк» [1–4]. Также эти радионуклиды попадали в окружающую среду в составе глобальных выпадений в результате испытаний ядерного оружия. Таким образом, внутренняя дозиметрия ККМ от изотопов стронция является очень важной задачей в рамках исследований, проводимых для облученного населения.

Оценка доз облучения ККМ от  $^{89,90}\text{Sr}$  для населения прибрежных территорий реки Теча включает в себя использование биокинетической и дозиметрической моделей. Разработанная в Уральском научно-практическом центре радиационной медицины (УНПЦ РМ) биокинетическая модель для изотопов стронция имитирует процессы обмена и транспорта этих радионуклидов в организме человека и позволяет оценивать их удельные активности в костной ткани (Бк/г). Дозиметрическая модель разрабатывается для оценки коэффициентов перехода от удельной активности радионуклида в костной ткани к мощности поглощенной дозы в ККМ (Гр/с) [4]. Дозиметрическое моделирование включает использование вычислительных фантомов-моделей, имитирующих геометрию и химический состав сред, в которых происходит симуляция переноса излучений, т.е. кости и ККМ [5]. Создание таких фантомов для бета-излучателей является сложной задачей, так как они должны адекватно описывать как линейные размеры костей, так и их микроструктуру.

Новейшие вычислительные фантомы основаны на анализе изображений компьютерной томографии (КТ) скелетов умерших людей [5–10]<sup>1</sup>. Такие фантомы сложны в исполнении и из-за ограниченного количества аутопсийного материала не позволяют оценить неопределенности, связанные с изменчивостью размеров и микроархитектуры скелета внутри популяции [11]. В качестве альтернативы в ФГБУН УНПЦ РМ был разработан оригинальный параметрический метод стохастического моделирования костных структур — SPSD-моделирование (Stochastic parametric skeletal dosimetry) [11], который предназначен для внутренней дозиметрии  $^{89,90}\text{Sr}$ . Параметры SPSD-фантомов основаны на большом количестве опубликованных результатов измерений костей. Это позволяет оценивать изменчивость характеристик скелета внутри популяции и связанную с ней вариабельность DF, что крайне важно в рамках дозиметрической поддержки исследований облученного населения прибрежных территорий реки Теча. Адекватность модели подтверждена хорошей сходимостью рассчитанных энергетических зависимостей для SPSD-фантомов и аналогичных зависимостей, представленных в литературе [11–13].

В предыдущих опубликованных работах были впервые представлены параметры фантомов скелета новорожденного, годовалого, 5-летнего и 10-летнего детей [14–17]. Так как форма скелета, а также многие характеристики моделируемых участков скелета 15-летнего ребенка схожи с таковыми для взрослого, скелет которого

описан наиболее подробно и полно, было принято решение сначала смоделировать скелет взрослого и в дальнейшем моделировать скелет 15-летнего ребенка на его основе. Стоит отметить, что для взрослых важно оценить половые различия характеристик скелета, используемых для дозиметрического моделирования.

Таким образом, настоящее исследование — это новый этап работы по созданию вычислительных фантомов для различных возрастных групп.

Цель исследования — разработка вычислительных фантомов скелета взрослых мужчины и женщины для оценки доз в ККМ от инкорпорированных бета-излучающих радионуклидов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Этапы создания вычислительных фантомов взрослых не отличались от таковых для младших возрастных групп [11] и включали:

- 1) выделение моделируемых участков скелета с активным гемопоэзом (гемопоэтических сайтов), оценка массовой доли ККМ в них;
- 2) оценку линейных размеров и параметров микроархитектуры моделируемых костей по опубликованным данным;
- 3) сегментацию гемопоэтических сайтов;
- 4) генерацию воксельных фантомов для каждого сегмента.

Для оценки распределения ККМ внутри скелета взрослых и выделения на этой основе основных гемопоэтических сайтов использовали данные ПЭТ [18]. Этот метод более точен, чем МРТ-исследование, результаты которого использовали для анализа распределения ККМ внутри скелета для младших возрастных групп [19]. Гемопоэтические сайты представляют собой целые кости или наборы костей, они могут включать участки без ККМ. Для того чтобы установить факт наличия ККМ в том или ином участке конкретного гемопоэтического сайта, использовали опубликованные данные МРТ-исследований [20–25].

Параметры фантомов включали усредненные значения характеристик костной микроархитектуры, а именно: толщину трабекул (*Tb. Th.*), размер межтрабекулярного пространства (*Tb. Sp.*), долю костной ткани в объеме кости (*BV/TV*) [26], толщину кортикального слоя (*Ct. Th.*) и линейные размеры костей.

Набор опубликованных данных, используемых для оценки параметров фантомов, а также методика их сбора и анализа подробно описаны ранее [26]. Для оценки параметров фантомов взрослых принимали результаты измерений костей, опубликованные в рецензируемых изданиях, атласах, монографиях и диссертациях, а также использовали электронные ресурсы, содержащие коллекции рентгеновских снимков. Для анализа применяли результаты измерений людей/образцов, определенных авторами как здоровые и не имеющие заболеваний, приводящих к деформации кости. Если опубликованные данные были недоступны, то для получения характеристик конкретного участка скелета были использованы измерения костей из анатомических коллекций Южно-Уральского гуманитарного педагогического университета и Южно-Уральского медицинского университета. Эти кости были без повреждений и не были разделены

<sup>1</sup> Pafundi D. Image-based skeletal tissues and electron dosimetry models for the ICRP reference pediatric age series. Dissertation for the degree of doctor of the philosophy. University of Florida; 2009.

на группы в соответствии с полом. Измерения проводились сотрудниками биофизической лаборатории УНПЦ РМ с использованием микрометров (REXANT МК 12-9110-2, Китай).

В анализе были использованы данные измерений костей у людей, относящихся к этническим группам, характерным для Уральского региона: европеоидной и монголоидной в возрасте от 20 до 50 лет для женщин и от 20 до 60 лет для мужчин.

Характеристики костной микроархитектуры, необходимые для SPSPD-моделирования, включали: толщину трабекул (*Tb. Th.*), размер межтрабекулярного пространства (*Tb. Sp.*), долю костной ткани в объеме кости (*BV/TV*) [26]. Для их оценки использовали результаты исследований, полученные с помощью гистоморфометрии и микроКТ (компьютерная микротомография). Для оценки толщины кортикального слоя кости принимали опубликованные результаты измерений с использованием КТ, микро-КТ, а также микрометров. Линейные размеры костей оценены на основе опубликованных результатов измерений с использованием анатомических боксов, ультразвуковых и рентгенологических исследований, а также компьютерной томографии (КТ).

При отсутствии гендерных различий исследуемых характеристик кости наборы данных для обоих полов были объединены. В этом случае участок кости моделировали независимо от пола. В других случаях фантомы для мужчин и для женщин были смоделированы отдельно.

Участки скелета с активным гемопоэзом были разделены на сегменты меньшего размера. Каждый сегмент имеет однородную микроархитектуру и толщину кортикального слоя кости, а также описывается простой геометрической формой. Для каждого такого участка был смоделирован базовый фантом сегмента кости (БФСК) [27]. Такая сегментация позволила учесть неоднородную микроархитектуру внутри кости и толщину кортикального слоя, а уменьшение размеров фантомов путем их разделения позволяет увеличить их разрешение, что улучшает точность моделирования.

**Таблица 1.** Массовая доля ККМ (% от общей массы ККМ в скелете) в основных гемопоэтических сайтах скелета взрослого

№ п/п	Гемопоэтический сайт	Массовая доля ККМ, %
1	Бедро	5,9 ± 2,5
2	Плечо	3,6 ± 1,9
3	Крестец	7,4 ± 1,8
4	Тазовые кости	23,2 ± 3,0
5	Череп	6,2 ± 2,3
6	Ключица	0,8 ± 0,01
7	Лопатка	4,7 ± 0,8
8	Ребра	9,8 ± 1,7
9	Грудина	1,8 ± 0,7
10	Шейные позвонки	3,5 ± 1,0
11	Грудные позвонки	17,5 ± 2,4
12	Поясничные позвонки	15,5 ± 2,5

Таблица подготовлена авторами по данным [18]

**Примечание:** данные представлены в виде среднего значения (*M*) и стандартного отклонения (*σ*); в источнике [18] дана суммарная доля ККМ в ключицах, лопатках и ребрах, равная 15,3 ± 2,6%; доля ККМ в каждом из этих участков рассчитана пропорционально суммарным объемам БФСК (рассчитывались автоматически в программе «Trabecula»), составляющих каждый гемопоэтический сайт.

Линейные размеры и параметры костной микроархитектуры были определены отдельно для каждого сегмента как усредненные значения характеристик костей [26].

Плотность и химический состав моделируемых сред (минерализованной кости и костного мозга) были одинаковы для всех БФСК и оценивались на основе литературных источников [28, 29].

Генерирование БФСК проводили в программе Trabecula [30]. БФСК состоит из кубов-вокселей, которые, в зависимости от своего положения, имитируют одну из моделируемых сред.

Важно отметить, что в рамках дальнейшего дозиметрического моделирования трабекулярная (ТК) и кортикальная кость (КК) рассматривались как отдельные ткани-источники, несмотря на то что в составе БФСК они смоделированы вокселями, имитирующими минерализованную костную ткань, а костный мозг рассматривался как единая ткань-мишень [30]. ТК представляет собой трехмерную сеть (костных тяжей) трабекул, толщина и взаимное расположение которых определено случайно в рамках варибельности параметров микроархитектуры внутри моделируемой кости [30], оцененной на основе опубликованных данных [31–35]. Такой способ моделирования трабекул позволил учесть их неоднородность и приблизить модель к структуре реальной кости. КМ заполняет пространство между трабекулами, а КК покрывает БФСК снаружи сплошным слоем толщиной, равной *St. Th.* Воксельное разрешение для каждого БФСК выбрано отдельно, размер вокселя не превышал 70% *Tb. Th.* и был в пределах 50–140 мкм [30]. Объемы ТК, КК и КМ автоматически рассчитывались в программе Trabecula.

На рисунке 1 представлены основные гемопоэтические сайты взрослого человека, разделение кости на сегменты, а также срезы смоделированных БФСК на примере бедренной кости взрослого мужчины.

Возможность оценки неопределенности DF является важным достоинством SPSPD-методики. Для этого для каждого БФСК, сгенерированного со средними значениями параметров, было создано 12 дополнительных фантомов сегментов кости (ДФСК) со случайно выбранными параметрами микро- и макроструктуры кости в пределах их индивидуальной варибельности (в границах минимальных и максимальных измеренных значений). Способ оценки неопределенностей в рамках SPSPD-подхода подробно описан ранее [36].

Гемопоэтические сайты скелета взрослого человека, а также массовая доля ККМ в них были определены согласно результатам ПЭТ [18] и представлены в таблице 1.

Как показано в таблице 1, скелет взрослого включает в себя 12 гемопоэтических сайтов. Массовая доля ККМ в них варьирует от 1,8 до 23,2%. Распределение ККМ внутри каждого гемопоэтического сайта дано согласно опубликованным данным МРТ [20–25]. Половых различий в распределении ККМ обнаружено не было.

На основе данных международной комиссии по радиационной защите [28] для взрослых был получен химический состав моделируемых сред; соответствующие данные представлены в таблице 2.

Плотность минерализованной костной ткани оценена на основе опубликованных результатов измерений плотности кортикальной кости взрослых (вне зависимости от пола) и равна 1,9 г/см<sup>3</sup> [29]. Плотность красного костного мозга принимали равной плотности жировой ткани (0,98 г/см<sup>3</sup>) [28].

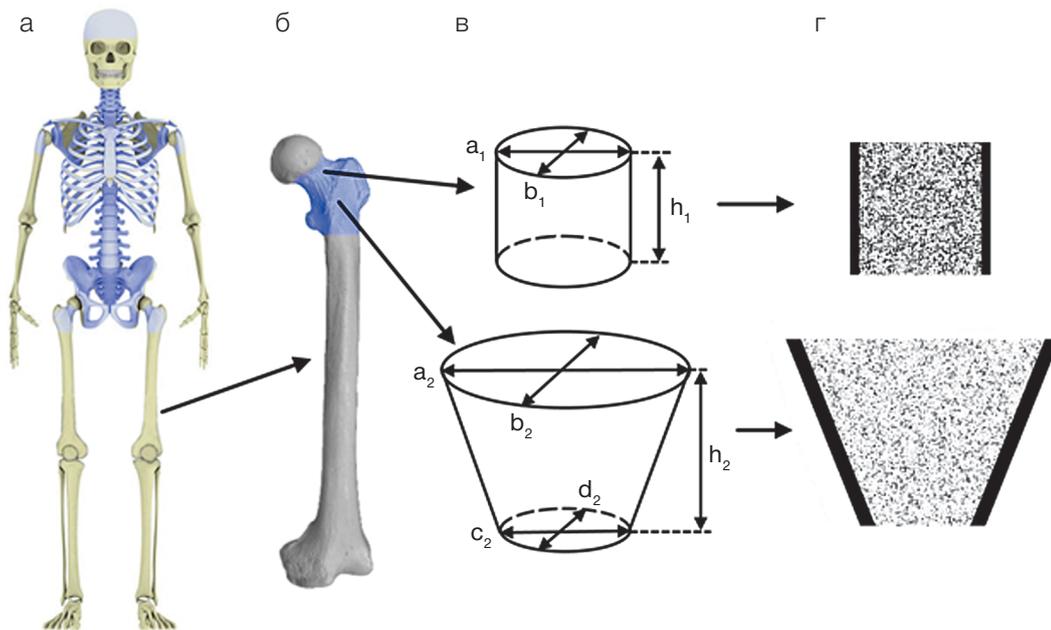


Рисунок подготовлен авторами

**Рис. 1.** Гемопоэтические сайты скелета взрослого человека и их сегментация на примере бедренной кости взрослого мужчины: а — скелет взрослого мужчины (синим цветом выделены моделируемые участки скелета с активным гемопоэзом); б — бедренная кость (синим цветом выделены моделируемые участки скелета с активным гемопоэзом); в — схема разделения кости на БФСК и их линейные параметры; г — БФСК бедренной кости в воксельном представлении в разрезе (черным цветом показаны воксели, имитирующие минерализованную кость, белым — КМ)

В результате анализа опубликованных данных не было обнаружено значимых половых различий характеристик костной микроархитектуры [26], поэтому данные мужчин и женщин были объединены. В таблице 3 приведены значения параметров микроархитектуры БФСК взрослых мужчины и женщины.

Для создания реалистичной модели трехмерной сети трабекул необходимо оценить значения вариабельности характеристик микроархитектуры внутри кости. Для этой характеристики нами были найдены опубликованные данные только для костей таза, позвоночника и черепа. Усредненное значение вариабельности среди указанных участков использовано для генерирования остальных фантомов. Значения вариабельности внутри кости, принятые для различных участков скелета взрослого, представлены в таблице 4.

В таблице 5 представлены линейные размеры и толщина кортикального слоя, принятые для БФСК взрослых мужчины и женщины. Ознакомиться с источниками данных, на которых основаны приведенные параметры, можно в опубликованной работе [26].

В отличие от параметров микроструктуры кости для ряда костей взрослого имеются значимые половые различия линейных размеров; для этих участков размеры оценены отдельно для мужчин и отдельно для женщин.

SPSD-фантомы скелета взрослых мужчины и женщины являются сборными и состоят из 71 БФСК, из которых 25 сегментов специфичны для мужчины, еще 25 — для женщины, а 21 сегмент моделировался одинаково для обоих полов, что показано в таблице 5.

Наибольшее количество фантомов в составе одного гемопоэтического сайта определено для крестца — 10, в то время как череп и плечевая кость содержат в своем составе по одному БФСК.

Как и для фантомов младших возрастных групп [14–17], большая часть БФСК взрослого представляет собой цилиндры и прямоугольные параллелепипеды,

линейные размеры которых были в пределах от 4 до 66 мм. Наибольшие половые различия линейных размеров наблюдались для нижней части верхней ветви лобковой кости (область лобкового симфиза) и составили 66%. Наименьшее значение толщины кортикального слоя было определено для БФСК шейных позвонков (0,3 мм) и более чем в семь раз отличалось от максимального значения, принятого для проксимального конца бедренной кости (2,2 мм). Параметры микроархитектуры БФСК также варьировали в широких пределах. Значение  $BV/TV$  — от 6 до 52%,  $Tb. Th.$  — от 0,1 до 0,29 мм,  $Tb. Sp.$  — от 0,5 до 2,37 мм (табл. 3).

Популяционная вариабельность линейных размеров БФСК в среднем равна 12%, наибольшее значение вариабельности оценено для нижней ветви лобковой кости (36%), а наименьшее — для тел шейных позвонков (3%). Вариабельность толщины кортикального слоя кости была в пределах от 2% (шейные позвонки) до 50% (поясничные позвонки) и в среднем равна 20%. Вариабельность

**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	0

Таблица подготовлена авторами по данным [28]

Таблица 3. Параметры микроархитектуры кости, принятые для БФСК взрослого

Гемопозитический сайт	BV/TV, % <sup>1</sup>	Tb. Th., мм <sup>2</sup>	Tb. Sp., мм <sup>2</sup>
Бедро (шейка)	17 (14–22)	0,19 (19)	0,78 (13)
Бедро (область бугорков)	11 (8–13)	0,136 (65)	0,99 (20)
Плечевая кость	6 (1–13)	0,1 (18)	2,37 (25)
Ребра	12 (5–25)	0,14 (12)	0,82 (11)
Подвздошная кость	19 (11–25)	0,13 (15)	0,6 (20)
Седялищная кость и лобковая кость (нижняя часть)	25 (23–27)	0,3 (7)	1,0 (40)
Лобковая кость (верхняя часть)	17 (12–23)	0,29 (10)	1,0 (12)
Череп	52 (41–65)	0,29 (32)	0,57 (35)
Ключица (центральная часть)	13 (8–18)	0,19 (13)	0,8 (25)
Ключица (концевые сегменты)	29 (15–46)	0,14 (31)	0,8 (25)
Лопатка	22 (9–47)	0,24 (42)	0,96 (23)
Грудина	15 (8–22)	0,15 (29)	1,4 (9)
Шейные позвонки	21 (16–28)	0,15 (14)	0,5 (10)
Грудные позвонки	15 (11–28)	0,1 (15)	0,6 (15)
Поясничные позвонки + крестец	16 (11–28)	0,15 (15)	0,6 (15)

Таблица подготовлена авторами по данным [26]

**Примечание:** <sup>1</sup> в скобках дан диапазон возможных значений; <sup>2</sup> в скобках приведен коэффициент вариации (CV) в %.

Таблица 4. Вариабельность параметров микроархитектуры внутри кости

Гемопозитический сайт	Tb. Th.	Tb. Sp.	Источник данных
Тазовые кости	10	10	[25]
Позвонки и крестец	48	43	[26]
Череп	8	15	[27–29]
Прочие кости (среднее значение)	22	23	[26–30]

Таблица подготовлена авторами по данным [25–30]

**Примечание:** данные представлены в %.

Таблица 5. Линейные размеры и толщина кортикального слоя, принятые для БФСК взрослого

Гемопозитический сайт	Сегмент	Форма <sup>1</sup>	Пол	Параметры фантома, мм (в скобках дан CV, %) <sup>2</sup>					
				h	a	b	c	d	Ст. Th.
Бедро	Проксимальный конец (шейка)	ц	м	30 (13)	36 (6)	32 (4)			1,9 (5)
			ж	31 (14)	29,4 (10)	23,9 (9)			1,9 (5)
	Проксимальный конец (область бугорков)	дц	м	43 (26)	66 (6)	44 (6)	30 (7)	30 (7)	2,3 (15)
			ж	34,5 (5)	58 (7)	39 (7)	27 (6)	27 (6)	2,3 (15)
Плечо	Проксимальный конец	дц	м	28 (12)	56 (5)	56 (5)	25 (15)	25 (15)	1,1 (18)
			ж	24,9 (10)	51,3 (6)	51,3 (6)	23,9 (11)	23,9 (11)	1,1 (18)
Ребра	Ребра <sup>4</sup> 1–2	п	м	17 (12)	30 <sup>6</sup>	7 (14)			0,7 (38)
			ж	14 (11)	30 <sup>6</sup>	5,5 (15)			0,7 (38)
	Ребра <sup>4</sup> 11–12	п	м	11 (18)	30 <sup>6</sup>	6 (17)			0,7 (38)
			ж	9,5 (11)	30 <sup>6</sup>	4 (25)			0,7 (38)
	Ребра <sup>4</sup> 3, 4, 9, 10	п	м	13 (8)	30 <sup>6</sup>	7 (14)			0,7 (38)
			ж	11,3 (11)	30 <sup>6</sup>	6 (14)			0,7 (38)
Ребра <sup>4</sup> 5, 6, 7, 8	п	м	14 (14)	30 <sup>6</sup>	8 (13)			0,7 (38)	
		ж	12,5 (11)	30 <sup>6</sup>	6,8 (13)			0,7 (38)	
Крестец	Тело 1	п	м	30 (7)	40 (11)	24,5 (10)			1,5 (8)
			ж	30 (9)	37,8 (11)	22,2 (12)			1,5 (8)
	Тело 2–3	п	м	46 (8)	28,7 (11)	15 (9)			1,5 (8)
			ж	45,2 (15)	28 (11)	13,8 (13)			1,5 (8)
	Тело 4–5	п	м	36 (9)	28 (11)	8,5 (13)			1,5 (8)
			ж	35 (14)	28 (11)	8,5 (12)			1,5 (8)

Продолжение таблицы 5

Гемопозитический сайт	Сегмент	Форма <sup>1</sup>	Пол	Параметры фантома, мм (в скобках дан CV, %)²					
				<i>h</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>Ct. Th.</i>
Крестец	Ножка 1	ц	м + ж	13,9 (14)	23,7 (15)	15,3 (11)			1,5 (8)
	Ножка 2	ц	м + ж	14,2 (14)	25,0 (11)	13,6 (17)			1,5 (8)
	Ножка 3	ц	м + ж	13,9 (14)	18,3 (11)	13,2 (14)			1,5 (8)
	Ножка 4	ц	м + ж	13,9 (14)	14,5 (11)	11,2 (18)			1,5 (8)
	Крыло 1	п	м	30 (13)	20 (10)	42 (13)			1,5 (8)
			ж	30 (9)	21 (15)	38,6 (8)			1,5 (8)
	Крыло 2	п	м	26 (15)	23 (17)	25 (8)			1,5 (8)
ж			26 (9)	23 (17)	22,7 (13)			1,5 (8)	
Крыло 3–4	пр	м + ж	19 (16)	18 (9)	38,5 (15)	38,5 (15)		1,5 (8)	
Тазовые кости	Крыло подвздошной кости	п	м + ж	9,5 (31)	30 <sup>6</sup>	30 <sup>6</sup>			1 (30)
	Гребень подвздошной кости	п	м	11 (15)	30 <sup>6</sup>	13 (9)			1 (30)
			ж	11 (15)	30 <sup>6</sup>	13 (9)			1 (30)
	Задняя часть подвздошной кости	п	м + ж	19 (16)	30 <sup>6</sup>	30 <sup>6</sup>			1 (30)
	Верхняя часть седалищной кости	ц	м + ж	30 <sup>6</sup>	34 (9)	25 (8)			0,5 (30)
	Нижняя ветвь лобковой кости	дц	м + ж	47 (17)	16 (25)	22 (23)	26 (23)	14 (36)	0,5 (30)
	Верхняя ветвь лобковой кости (нижняя часть)	п	м	32 (19)	15 (20)	29 (20)			0,7 (30) <sup>4</sup> 1,5 (12) <sup>4</sup>
			ж	19 (13)	11 (7)	33 (18)			0,7 (30) <sup>4</sup> 1,5 (12) <sup>4</sup>
	Верхняя ветвь лобковой кости (верхняя часть)	п	м	51,2 (8)	14,5 (20)	16 (20)			0,7 (30) <sup>4</sup> 1,5 (12) <sup>4</sup>
			ж	55,8 (77)	11 (18)	13 (20)			0,7 (30) <sup>4</sup> 1,5 (12) <sup>4</sup>
Вертлужная впадина	т	м + ж	29 (10)	26 (10)	21 (20)			0,5 (30) <sup>5</sup> 3,6 (30) <sup>5</sup>	
Череп	Плоские кости свода <sup>4</sup>	п	м + ж	5,2 (12)	30 <sup>6</sup>	30 <sup>6</sup>			1,3 (33) <sup>3</sup> 1,5 (22) <sup>3</sup>
Ключица	Акромиальная часть тела	ц	м	56 (7)	26 (15)	24 (12)	12 (5)	12 (8)	0,8 (2)
			ж	51,5 (6)	24 (16)	21 (14)	10 (10)	10 (9)	0,8 (2)
	Концы	дц	м	20	26 (15)	24 (12)			0,6 (19)
			ж	20	24 (16)	21 (14)			0,6 (19)
	Грудинная часть тела	дц	м	56 (7)	22 (14)	12 (5)	12 (9)	12 (8)	0,8 (2)
ж			51,5 (6)	21 (14)	12 (10)	10 (10)	10 (9)	0,8 (2)	
Лопатка	Гленоид	ц	м + ж	8,8 (18)	48 (11)	26 (11)			0,8 (13)
	Акромион	п	м + ж	20 (9)	36 (9)	26 (10)			0,9 (28)
	Латеральный край	п	м + ж	30 <sup>6</sup>	5 (10)	10 (13)			0,8 (13)
Грудина	Тело	п	м	1 (10)	30 <sup>6</sup>	30 <sup>6</sup>			1,1 (42)
			ж	9 (10)	30 <sup>6</sup>	30 <sup>6</sup>			1,1 (42)
	Рукоятка	п	м	1,3 (16)	30 <sup>6</sup>	30 <sup>6</sup>			1,45 (22)
			ж	1,1 (16)	30 <sup>6</sup>	30 <sup>6</sup>			1,45 (22)
Шейные позвонки	Тело позвонка 3–7	ц	м	13 (16)	19 (14)	16 (12)			0,3 (7)
			ж	12 (6)	16 (6)	15 (8)			0,3 (7)
	Тело позвонка 2	п	м + ж	19,2 (13)	14,3 (10)	17,5 (3)			0,3 (7)
Боковая масса позвонка 1	п	м + ж	15 (13)	11,4 (9)	10,5 (9)			0,3 (7)	
Грудные позвонки	Тело позвонка	ц	м	27 (7)	33 (9)	28 (11)			1,3 (16)
			ж	22 (6)	29 (6)	26 (8)			1,3 (16)
	Дужка + нижний суставной отросток	п	м + ж	32 (12)	10,2 (14)	4,2 (13)			1,3 (16)
	Остистый отросток	п	м + ж	10,3 (15)	50 (4)	5,1 (20)			1,3 (16)
	Верхний суставной отросток	п	м + ж	11,4 (12)	11,3 (14)	4,4 (11)			1,3 (16)
Поперечный отросток	п	м + ж	12 (9)	18 (11)	10,6 (13)			1,3 (16)	

Продолжение таблицы 5

Гемопозитический сайт	Сегмент	Форма <sup>1</sup>	Пол	Параметры фантома, мм (в скобках дан CV, %) <sup>2</sup>					
				<i>h</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>Ct. Th.</i>
Поясничные позвонки	Тело позвонка	ц	м	27 (12)	35 (8)	47 (9)			1,3 (34)
			ж	27 (7)	32 (8)	43 (8)			1,3 (34)
	Дужка + нижний суставной отросток	п	м + ж	20,4 (10)	12,7 (13)	4,1 (13)			1,0 (34)
	Остистый отросток	п	м	24 (13)	31 (6)	6 (17)			0,4 (50)
			ж	20 (15)	31 (6)	6 (17)			0,4 (50)
	Верхний суставной отросток	п	м + ж	14 (14)	15 (13)	12 (17)			1,0 (34)
Поперечный отросток	п	м + ж	12 (8)	23 (9)	8 (13)			0,4 (50)	

Таблица подготовлена авторами по данным [13, 28]

**Примечание:** м — мужчина; ж — женщина; м + ж — БФСК моделировался независимо от пола; <sup>1</sup> — форму фантома обозначали следующим образом: ц — цилиндр, дц — деформированный цилиндр, п — прямоугольный параллелепипед, пр — призма с треугольным основанием; т — полый цилиндр; <sup>2</sup> — размеры БФСК обозначали следующим образом: *h* — высота, см; *a* — большая ось (ц), большая ось для большего основания (дц) или сторона *a* (п) или внешний диаметр (т); *b* — малая ось (ц), малая ось для большего основания (дц) или сторона *b* (п) или внутренний диаметр (т); *c* — большая ось для меньшего основания (дц); *d* — малая ось для меньшего основания (дц); для призмы (пр): *a*, *b*, *c* — стороны треугольного основания; <sup>3</sup> — толщину кортикального слоя принимали разной для внутренней и внешней поверхностей черепа; <sup>4</sup> — симфизальная поверхность покрыта более толстым слоем кортикальной кости, остальные поверхности БФСК — более тонким; <sup>5</sup> — большее значение *Ct. Th.* характерно для медиальной стороны вертлужной впадины, меньшее — для прочих сторон БФСК; <sup>6</sup> — БФСК имитировал лишь часть моделируемого сегмента кости в случае, если размеры сегмента кости значительно превышали 30 мм, так как в таких случаях с точки зрения дозиметрии не имеет смысла моделировать весь участок кости целиком.

Таблица 6. Сравнение объемов БФСК десятилетнего ребенка и взрослых мужчины и женщины

БФСК	Моделируемая среда	Объем моделируемой структуры, см <sup>3</sup>		
		10 лет	Взрослые	
			Мужчина	Женщина
Шейка бедренной кости	КМ	6,95	18,43	10,39
	ТК	3,77	3,68	2,14
	КК	3,93	5,94	4,58
	Весь БФСК	14,65	28,05	17,11
Тело поясничного позвонка	КМ	12,42	28,55	23,73
	ТК	1,97	4,96	4,19
	КК	0,38	1,37	1,26
	Весь БФСК	14,77	34,88	29,18
Тело шейного позвонка	КМ	1,43	2,29	1,64
	ТК	0,38	0,6	0,46
	КК	0,07	0,21	0,17
	Весь БФСК	1,88	3,1	2,27

Таблица подготовлена авторами по данным [17]

параметров микроструктуры была в пределах от 7 до 65% и в среднем составила 18%.

Полученные значения вариабельности параметров фантомов были использованы для генерирования ДФСК. Объем ДФСК был в пределах 23–264% от объема БФСК.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Характеристики фантомов взрослых людей описаны в литературе наиболее подробно и полно, для их оценки было использовано порядка 260 литературных источников, включающих описание 28 000 людей или образцов костей [26]. Процессы окостенения в скелете взрослого человека завершены, как и превращение костного мозга в желтый. Участки скелета, которые в детском возрасте имели малый размер и/или не окостенели и по этим причинам не моделировались, были смоделированы для взрослых. Поэтому фантом скелета взрослого человека содержит в своем составе большее количество БФСК, чем фантомы младших возрастных групп [14–17]. Распределение ККМ для взрослых существенно отлича-

ется от такового для детей: доля ККМ в черепе составляет 6,2%, что в 2 раза ниже, чем для 10-летних детей [17], наибольшая доля ККМ во взрослом возрасте характерна для костей таза и позвоночника. *BV/TV* для БФСК взрослых в среднем в полтора раза меньше, чем для БФСК 10-летнего ребенка. *Tb. Th.* с возрастом практически не меняется, а *Tb. Sp.* в среднем увеличился на 15% по сравнению с 10-летним. В таблице 6 приведено сравнение объемов сред в составе БФСК для десятилетнего ребенка с объемами для взрослых мужчины и женщины.

Общий объем фантомов взрослых больше, чем у 10-летнего, в среднем на 17% при гораздо более существенном увеличении размеров скелета. Такие малые различия объемов связаны с прекращением гемопоза в участках скелета, моделируемых сравнительно большими фантомами, а также более подробной сегментацией скелета и, как следствие, большим количеством небольших по размеру БФСК. Тем не менее для БФСК, которые моделируются одинаково для 10-летних и для взрослых, заметен существенный рост объемов сред с возрастом, что показано в таблице 6. Для таких БФСК объемы сред

увеличились в среднем в 2 раза. Половые различия объемов сред в составе фантомов, моделируемых для взрослых, для отдельных БФСК достигали 62% (верхняя ветвь седалищной кости), а в среднем составили 8 %.

Для взрослых были найдены опубликованные данные по соотношению масс частей поясничного позвонка [37]. Согласно этим данным масса тела поясничного позвонка составляет  $65,3 \pm 4,0\%$  от массы всего позвонка. В рамках SPSPD не моделировали ножки позвонка, так как они содержат небольшое количество ККМ, тем не менее масса БФСК тела составляет  $70,0 \pm 5,0\%$  от суммы масс всех БФСК, имитирующих поясничный позвонки, что очень близко к опубликованным результатам измерений реальных костей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе впервые было представлено описание SPSPD-фантомов скелета для взрослых мужчины и женщины. Каждый фантом скелета состоит из 46 базовых фантомов-сегментов и включает: проксимальные части бедра и плеча, крестец, ребра тазовые кости, череп, ключицы, лопатки, грудину, а также позвонки шейного,

грудного и поясничного отделов. При этом половые различия линейных размеров были характерны для 25 из 46 сегментов. Параметры микроархитектуры и кортикальная толщина не отличались у женских и мужских фантомов сегментов. На основе оценки вариабельности параметров фантомов-сегментов для каждого базового фантома-сегмента кости было сгенерировано по 12 ДФСК. DF, рассчитанные для ДФСК, будут использованы для оценки популяционной вариабельности DF.

Представленные фантомы взрослых будут использованы для расчета коэффициентов перехода  $^{89,90}\text{Sr}$ , что позволит усовершенствовать дозовые оценки для жителей Уральского региона. Данная работа является пятой в серии статей, посвященных параметрам вычислительных фантомов скелета людей разного возраста и пола. В качестве направления дальнейшего исследования мы планируем создать SPSPD-фантомы скелета для лиц мужского и женского пола в возрасте 15 лет. Сгенерированные фантомы могут быть использованы для внутренней дозиметрии остеотропных бета-излучателей у населения, а также для дозиметрии других бета-излучающих радионуклидов, в том числе применяемых в радионуклидной терапии, таких как  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{186}\text{Re}$ ,  $^{188}\text{Re}$ ,  $^{117\text{m}}\text{Sn}$ .

## Литература / References

- 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. <https://doi.org/10.1007/s00411-012-0438-5>
- Аклеев АВ. Хронический лучевой синдром у жителей прибрежных сел реки Теча. Челябинск: Книга; 2012. Akleev AV. Hronicheskiy luchevoiy sindrom u zhitel'ey pribrezhnykh sel reki Techa. Chelyabinsk: Kniga; 2012 (In Russ.). EDN: QMDBZR
- 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. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncw316>
- Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Shagina NB, Volchkova AY, et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D Code for Reconstruction of Deterministic Estimates of Dose From Environmental Exposures. *Health physics*. 2019;117(4):378–87. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001067>
- 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. <https://doi.org/10.1259/0007-1285-51-608-622>
- 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. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/61/24/8794>
- 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. <https://doi.org/10.1097/00004032-200005000-00003>
- 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
- 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. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/56/8/001>
- Bolch WE, Eckerman K, Endo A, Hunt JGS, Jokisch DW, Kim CH, et al. ICRP Publication 143: Paediatric Reference Computational Phantoms. *Ann ICRP*. 2020;49(1):5–297. <https://doi.org/10.1177/0146645320915031>
- 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. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257605>
- Volchkova AY, Sharagin PA, Shishkina EA. Internal bone marrow dosimetry: the effect of the exposure due to  $^{90}\text{Sr}$  incorporated in the adjacent bone segments. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software*. 2022;15(4):44–58. <https://doi.org/10.14529/mmp220404>
- Шишкина ЕА, Шарагин ПА, Волчкова АЮ. Аналитическое описание дозообразования в костном мозге от  $^{90}\text{Sr}$ , инкорпорированного в кальцифицированных тканях. *Вопросы радиационной безопасности*. 2021;3:72–82. Shishkina EA, Sharagin PA, Volchkova AY. Analytical Description of the Dose Formation in Bone Marrow due to  $^{90}\text{Sr}$  Incorporated in Calcified Tissues. *Radiation Safety Issues*. 2021;3:72–82 (In Russ.). EDN: LYGTKD
- Шарагин ПА, Шишкина ЕА, Толстых ЕИ. Вычислительный фантом для дозиметрии красного костного мозга новорожденного ребенка от инкорпорированных бета-излучателей. *Медицина экстремальных ситуаций*. 2022;4:74–82. 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;3:43–52. <https://doi.org/10.47183/mes.2022.045>
- Шарагин ПА, Шишкина ЕА, Толстых ЕИ. Вычислительный фантом для дозиметрии красного костного мозга годовалого ребенка от инкорпорированных бета-излучателей. *Медицина экстремальных ситуаций*. 2023;3:44–55. 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;3:43–52. <https://doi.org/10.47183/mes.2023.030>
- Шарагин ПА, Толстых ЕИ, Шишкина ЕА. Вычислительный

- фантом для дозиметрии красного костного мозга пятилетнего ребенка от инкорпорированных бета-излучателей. *Медицина экстремальных ситуаций*. 2023;4:86–97. 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. <https://doi.org/10.47183/mes.2023.061>
17. Шарагин ПА, Толстых ЕИ, Шишкина ЕА. Вычислительный фантом для дозиметрии красного костного мозга десятилетнего ребенка от инкорпорированных бета-излучателей. *Медицина экстремальных ситуаций*. 2024;2:38–48. Sharagin PA, Tolstykh EI, Shishkina EA. Computational phantom for the dosimetry of the red bone marrow of a 10-year-old child due to incorporated beta-emitters. *Extreme Medicine*. 2024;2:35–45. <https://doi.org/10.47183/mes.2024.032>
  18. Campbell BA, Callahan J, Bressel M, Simoens N, Everitt S, Hofman MS, et al. Distribution Atlas of Proliferating Bone Marrow in Non-Small Cell Lung Cancer Patients Measured by FLT-PET/CT Imaging, With Potential Applicability in Radiation Therapy Planning. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2015;92(5):1035–43. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2015.04.027>
  19. Cristy M. Active bone marrow distribution as a function of age in humans. *Phys Med Biol*. 1981;26(3):389–400. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/26/3/003>
  20. Robinson RA. Chemical analysis and electron microscopy of bone. *Bone as a tissue*. 1960;186–250.
  21. Vogler JB. 3rd, Murphy WA. Bone marrow imaging. *Radiology*. 1988;1683:679–93. <https://doi.org/10.1148/radiology.168.3.3043546>
  22. Vande Berg BC, Malghem J, Lecouvet FE, Maldague B. Magnetic resonance imaging of the normal bone marrow. *Skeletal Radiology*. 1998;27:471–83. <https://doi.org/10.1007/s002560050423>
  23. Vande Berg BC, Malghem J, Lecouvet FE, Maldague B. Magnetic resonance imaging of normal bone marrow. *Eur Radiol*. 1998;8(8):1327–34. <https://doi.org/10.1007/s003300050547>
  24. 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. <https://doi.org/10.1007/bf02011826>
  25. 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. <https://doi.org/10.1007/bf02011825>
  26. Tolstykh EI, Sharagin PA, Shishkina EA, Volchkova AY, Smith MA, Napier BA. Stochastic parametric skeletal dosimetry model for human: anatomical-morphological basis and parameter evaluation. *PlosOne*. 2024. Submitted.
  27. 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. Conference proceedings of sixth international conference on radiation and applications in various fields of research. Macedonia; 2018. <https://doi.org/10.21175/RadProc.2018.33>
  28. Valentin J. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values. *Annals of the ICRP*. 2002;32(3–4):1–277. [https://doi.org/10.1016/S0146-6453\(03\)00002-2](https://doi.org/10.1016/S0146-6453(03)00002-2)
  29. Woodard HQ, White DR. The composition of body tissues. *Br.J. Ru&ol*. 1986;59:1209–18. <https://doi.org/10.1259/0007-1285-59-708-1209>
  30. 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. <https://doi.org/10.1097/hp.0000000000001127>
  31. Parisien MV, McMahon D, Pushparaj N, Dempster DW. Trabecular architecture in iliac crest bone biopsies: intra-individual variability in structural parameters and changes with age. *Bone*. 1988;9(5):289–95. [https://doi.org/10.1016/8756-3282\(88\)90012-9](https://doi.org/10.1016/8756-3282(88)90012-9)
  32. Hazrati Marangalou J, Ito K, Taddei F, van Rietbergen B. Inter-individual variability of bone density and morphology distribution in the proximal femur and T12 vertebra. *Bone*. 2014;60:213–20. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2013.12.019>
  33. Van Dessel J, Huang Y, Depypere M, Rubira-Bullen I, Maes F, Jacobs R. A comparative evaluation of cone beam CT and micro-CT on trabecular bone structures in the human mandible. *Dento maxillo facial radiology*. 2013;42(8):20130145. <https://doi.org/10.1259/dmfr.20130145>
  34. Fanuscu MI, Chang TL. Three-dimensional morphometric analysis of human cadaver bone: microstructural data from maxilla and mandible. *Clinical oral implants research*. 2004;15(2):213–8. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0501.2004.00969.x>
  35. Ibrahim N, Parsa A, Hassan B, van der Stelt P, Aartman IH, Nambiar P. Influence of object location in different FOVs on trabecular bone microstructure measurements of human mandible: a cone beam CT study. *Dento maxillo facial radiology*. 2014;43(2):20130329. <https://doi.org/10.1259/dmfr.20130329>
  36. Shishkina EA, Sharagin PA, Tolstykh EI, Smith MA, Napier BA, Degteva MO. Uncertainty of stochastic parametric approach to bone marrow dosimetry of <sup>89,90</sup>Sr. *Heliyon*. 2024;10(4):e26275. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26275>
  37. Wang Y, Videman T, Boyd SK, Battie MC. The distribution of bone mass in the lumbar vertebrae: are we measuring the right target? *The spine journal: official journal of the North American Spine Society*. 2015;15(11):2412–6. <https://doi.org/10.1016/j.spinee.2015.06.059>

**Вклад авторов.** Все авторы подтверждают соответствие своего авторства критериям ICMJE. Наибольший вклад распределен следующим образом: 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.

## ОБ АВТОРАХ

**Шарагин Павел Алексеевич**

<https://orcid.org/0000-0002-1457-4916>  
sharagin@urcrm.ru

**Толстых Евгения Игоревна**, д-р. биол. наук

<https://orcid.org/0000-0002-4958-3214>  
evgenia.tolstykh@yandex.ru

**Шишкина Елена Анатольевна**, д-р. биол. наук

<https://orcid.org/0000-0003-4464-0889>  
lena@urcrm.ru