

<https://doi.org/10.47183/mes.2025-396>

УДК 614.876



ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ФАНТОМ ДЛЯ ДОЗИМЕТРИИ КРАСНОГО КОСТНОГО МОЗГА ДЛЯ 15-ЛЕТНИХ ЮНОШЕЙ И ДЕВУШЕК

П.А. Шарагин^{1,2}, Е.И. Толстых¹, Е.А. Шишкина^{1,2}¹ Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия² Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

Введение. Вычислительные фантомы широко применяются для оценки доз облучения красного костного мозга от остеотропных радионуклидов. Наиболее распространенными такими радионуклидами являются изотопы стронция. Создание фантомов для ^{89,90}Sr требует аккуратного описания формы, размеров и микроархитектуры костей. На сегодняшний день опубликованы описания фантомов новорожденного, годовалого, 5-летних и 10-летних детей, а также взрослых мужчины и женщины. Данное исследование является продолжением работы по созданию цифровых моделей скелета для людей разного пола и возраста.

Цель. Разработка вычислительных фантомов скелетов 15-летних юношей и девушек для оценки доз в красном костном мозге (ККМ) от инкорпорированных бета-излучающих радионуклидов.

Материалы и методы. Для создания фантомов был использован SPSPD (stochastic parametric skeletal dosimetry) подход. Были выделены участки скелета с активным гемопоэзом, которые были разделены на сегменты. Параметры моделей сегментов были оценены по данным литературы и включали в себя: характеристики микроструктуры кости, толщину слоя кортикальной кости, размеры костей и их участков, а также долю содержания ККМ, химический состав и плотность моделируемых сред. Также были оценены значения вариабельности этих параметров.

Результаты. Разработанные фантомы 15-летних юношей и девушек включают по 46 сегментов; параметры 14 из них различались для юношей и девушек. Размеры фантомов были 3,5–66 мм, а толщина кортикальной кости 0,3–2,3 мм.

Выводы. Фантомы, полученные в рамках данной работы, отражают размеры и структуру участков скелета с активным гемопоэзом 15-летних юношей и девушек, учитывают половые различия, а также имитируют вариабельность характеристик скелета.

Ключевые слова: трабекулярная кость; кортикальная кость; дозиметрия костного мозга; вычислительные фантомы; стронций

Для цитирования: Шарагин П.А., Толстых Е.И., Шишкина Е.А. Вычислительный фантом для дозиметрии красного костного мозга для 15-летних юношей и девушек. *Экстремальная биомедицина*. 2026;28(2):205–214. <https://doi.org/10.47183/mes.2025-396>

Финансирование: работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда по мероприятию «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами» (региональный конкурс) Соглашение № 25-25-20092 поддерживаемое регионом, — программа Челябинской области «Развитие науки в Челябинской области», грант в форме субсидии (Соглашение № 30-2025-003346).

Потенциальный конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

✉ Шарагин Павел Алексеевич sharagin@urcrm.ru

Статья поступила: 08.09.2025 **После доработки:** 21.10.2025 **Принята к публикации:** 14.11.2025 **Online first:** 27.12.2025

COMPUTATIONAL PHANTOM FOR RED BONE MARROW DOSIMETRY IN 15-YEAR-OLD ADOLESCENTS

Pavel A. Sharagin^{1,2}, Evgenia I. Tolstikh¹, Elena A. Shishkina^{1,2}¹ Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics, Ozersk, Russia² Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

Introduction. Computational phantoms are widely used for assessing radiation doses to the red bone marrow (RBM) from bone-seeking radionuclides. Among them, strontium isotopes are the most common. The development of phantoms for ^{89,90}Sr requires accurate description of bone shape, size, and microarchitecture. To date, phantoms for newborns, one-year-old, five-year-old, and 10-year-old children, as well as for adult males and females, have been proposed. This study is a continuation of our work on creating digital skeletal models for humans of different sexes and ages.

Objective. Development of computational phantoms for the skeleton for 15-year-old adolescents with the purpose of assessing doses in RBM from incorporated beta-emitting radionuclides.

Materials and methods. The phantoms were developed using the stochastic parametric skeletal dosimetry (SPSPD) approach. Skeletal regions with active hematopoiesis were identified and segmented. The parameters of the segment models were estimated based on literature data, including bone microstructural characteristics, cortical bone layer thickness, bone and segment dimensions, the fractional content of RBM, and the chemical composition and density of the modeled media. The variability ranges of these parameters were also assessed.

Results. The developed phantoms for 15-year-old male and female adolescents comprise 46 segments each; parameters for 14 of these segments differed between males and females. The phantom dimensions ranged 3.5–66 mm; the cortical bone thickness varied 0.3–2.3 mm.

Conclusions. The phantoms developed in this work reflect the dimensions and structure of skeletal regions with active hematopoiesis in 15-year-old adolescents, account for sexual dimorphism, and simulate the variability of skeletal characteristics.

Keywords: trabecular bone; cortical bone; bone marrow dosimetry; computational phantoms; strontium

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

For citation: Sharagin P.A., Tolstykh E.I., Shishkina E.A. Computational phantom for red bone marrow dosimetry in 15-year-old adolescents. *Extreme Medicine*. 2026;28(2):205–214. <https://doi.org/10.47183/mes.2025-396>

Funding: this work was supported by a grant of the Russian Science Foundation entitled “Conducting fundamental scientific research and exploratory scientific research by small individual scientific groups” — Regional Competition (Agreement No. 25-25-20092), supported by the Chelyabinsk Region within the program “Science Development in the Chelyabinsk Region”, grant as a subsidy (Agreement No. 30-2025-003346).

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

✉ Pavel A. Sharagin sharagin@urcrm.ru

Received: 08 Sept. 2025 **Revised:** 21 Oct. 2025 **Accepted:** 14 Nov. 2025 **Online first:** 27 Dec. 2025

ВВЕДЕНИЕ

Оценка доз от инкорпорированных остеотропных радионуклидов играет важную роль в прогнозировании радиогенных рисков для людей, проживающих на загрязненных территориях. Наиболее распространенными такими радионуклидами являются изотопы стронция, которые попадали в окружающую среду в результате как глобального поступления, так и других техногенных радиационных инцидентов. ^{90}Sr является долгоживущим остеотропным бета-излучающим радионуклидом, его накопление в костной ткани приводит к хроническому облучению красного костного мозга, что увеличивает риск развития лейкозов [1–4].

Оценка доз от изотопов стронция включает в себя использование биокинетической и дозиметрической моделей. В Уральском научно-практическом центре радиационной медицины (УНПЦ РМ)¹ ранее была разработана биокинетическая модель, которая имитирует процессы транспорта Sr внутри организма; результатом использования этой модели является удельная активность Sr в костной ткани. Дозиметрическая модель позволяет рассчитать коэффициенты перехода (DF) от удельной активности радионуклида в костной ткани (Бк/г) к мощности поглощенной дозы (Гр/с) в красном костном мозге (ККМ) [5]. Одним из этапов разработки такой модели является создание вычислительных фантомов — трехмерных моделей, имитирующих взаимное расположение и состав сред, в которых в дальнейшем будет производиться симуляция переноса излучений. Разработка таких фантомов для бета-излучателей является сложной задачей, так как они должны адекватно описывать как линейные размеры костей, так и их микроструктуру.

Современные фантомы, используемые для внутренней дозиметрии стронция, основаны на анализе медицинских изображений скелетов людей² [6–10]. В связи с этим такие фантомы имеют существенный недостаток для их применения в когортных исследованиях: из-за ограниченного количества аутопсийного материала не позволяют оценить неопределенности, связанные с изменчивостью размеров и микроархитектуры скелета внутри популяции.

В УНПЦ РМ был разработан альтернативный подход — параметрический метод стохастического моделирования костных структур — SPSPD-моделирование (Stochastic parametric skeletal dosimetry) [11]. В рамках данного метода параметры фантомов оцениваются на основе опубликованных результатов измерений костей, а не по медицинским изображениям. Большое

количество литературных источников позволяет оценить изменчивость характеристик скелета внутри популяции и связанную с ней вариабельность DF.

В предыдущих опубликованных работах были впервые представлены параметры фантомов скелета новорожденного, годовалого, 5-летних и 10-летних детей, а также взрослых мужчины и женщины [12–16]. Участки скелета с активным гемопоэзом 15-летних лиц и взрослых совпадают. Кроме того, многие участки скелета людей в возрасте 15 лет схожи по своей форме и характеристикам микроструктуры с участками скелета взрослых. По этой причине фантомы 15-летних юношей и девушек создавались на основе фантомов для взрослых, т.е. часть параметров фантомов 15-летних принималась равными таковым для взрослых. Как и для взрослых, для 15-летних лиц также важно оценить половые различия. Таким образом, настоящее исследование — это новый этап работы по созданию вычислительных фантомов для различных возрастных групп.

Цель исследования — разработка вычислительных фантомов скелета 15-летних юношей и девушек для оценки доз в ККМ от инкорпорированных бета-излучающих радионуклидов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Этапы создания фантомов не отличались от таковых для прочих возрастных групп [11]. На первом этапе выделяли объекты моделирования — участки скелета с активным гемопоэзом и оценивали массовую долю ККМ в каждом таком участке. Далее по данным литературы оценивали линейные размеры и характеристики микроструктуры костей. После этого каждый моделируемый участок скелета был разделен на меньшие части. Для каждой такой части был сгенерирован вычислительный фантом.

Доля ККМ в различных костях скелета была оценена на основе опубликованных данных [17]. В рамках SPSPD-подхода моделируется не весь скелет, а лишь его участки, содержащие ККМ. Это правило справедливо и для отдельных костей, т.е. моделировались только их участки, содержащие ККМ. В этой связи на основе результатов МРТ-исследований [18–23] было оценено распределение ККМ внутри костей.

Параметры фантомов 15-летних юношей и девушек, как и параметры фантомов прочих возрастных групп, включали усредненные значения параметров микроструктуры кости: трабекулярную толщину (Tb , Th),

¹ В настоящее время — Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики.

² 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.

среднее расстояние между трабекулами (*Tb. Sp.*), отношение объема костной ткани к объему кости (*BV/TV*) [24]. Размеры костей и их участков и толщина слоя кортикальной кости (*Ct. Th.*) также являлись параметрами фантомов. Все эти параметры оценивались нами на основе результатов измерений с использованием гистоморфометрии и микроКТ (компьютерная микротомография), опубликованных в литературных источниках.

Данные литературы собирали и анализировали согласно описанной ранее методике [24]. Параметры фантомов взрослых мужчины и женщины [16] использовались для тех участков скелета, для которых не было найдено опубликованных данных. Для анализа принимали результаты измерений костей европеоидов и монголоидов, т.к. эти этнические группы характерны для Уральского региона в возрасте 13–17 лет.

Для оценки параметров микроархитектуры использовали результаты исследований, полученные с использованием гистоморфометрии и микроКТ (компьютерная микротомография). Для оценки толщины кортикального слоя кости принимали опубликованные результаты измерений с использованием КТ, микроКТ, а также микрометров. Линейные размеры костей оценены на основе опубликованных результатов измерений с применением анатомических боксов, ультразвуковых и рентгенологических исследований, а также компьютерной томографии (КТ).

При отсутствии половых 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 разных полов были смоделированы отдельно.

Каждый участок скелета с активным гемопоэзом был разделен на меньшие части — сегменты. Все сегменты имеют однородные костную микроархитектуру и толщину кортикального слоя и описываются простыми геометрическими формами [25]. Для каждого сегмента был смоделирован базовый фантом сегмента кости (БФСК). Разделение на сегменты проводилось таким образом, чтобы каждый сегмент имел однородную микроархитектуру, однородную толщину кортикального слоя. Для БФСК, представляющих собой вытянутые цилиндры или вытянутые либо плоские прямоугольные параллелепипеды, моделировался только участок БФСК, максимальные линейные размеры которого достигают 30 мм. Дальнейшее увеличение наибольшего размера такого БФСК не оказывает влияния на *DF* [26]. Таким образом, сегментация позволяет учесть неоднородную микроархитектуру внутри кости и толщину кортикального слоя, а также уменьшить размер фантомов, благодаря чему можно увеличить их разрешение, что улучшает точность моделирования.

Плотность и химический состав моделируемых сред (минерализованной кости и костного мозга (КМ)) были одинаковы для всех БФСК и оценивались на основе литературных источников [27, 28].

Генерирование БФСК проводилось в программе *Trabecula*, разработанной в нашей лаборатории [29]. БФСК состоит из трех сред: костного мозга (КМ) — ткани-мишени, а также кортикальной (КК) и трабекулярной (ТК) кости — двух отдельных тканей-источников.

Трабекулярная кость была смоделирована в виде трехмерной сети костных тяжей — трабекул, взаимное расположение и толщина которых случайно выбраны внутри границ варибельности параметров микроархитектуры кости, оцененной на основе опубликованных данных [30–34]. Костный мозг расположен в пространствах между трабекулами, а КК покрывает ТК снаружи сплошным слоем с заданной толщиной. Размер вокселя для каждого БФСК подбирался таким образом, чтобы он не превышал 70% *Tb. Th.* и был в пределах 50–140 мкм [29]. Объемы сред, составляющих фантом, рассчитывались в программе *Trabecula*.

Фантомы, созданные в рамках *SPSD*-подхода, позволяют оценить неопределенности *DF*, связанные с изменчивостью характеристик скелета внутри популяции. Для этого были смоделированы наборы дополнительных фантомов (ДФСК) для каждого БФСК. В то время как БФСК моделировался со средними значениями параметров, значения параметров ДФСК были случайно разыграны в границах минимальных и максимальных измеренных значений их варибельности. Метод оценки неопределенностей был подробно описан ранее [35].

Участки скелета с активным гемопоэзом подростка в возрасте 15 лет, сегментация кости и срезы отдельных сегментов на примере ключицы представлены на рисунке.

Набор участков скелета с активным гемопоэзом для 15-летних лиц не отличался от такового для взрослого, однако есть различия в распределении ККМ между этими участками, что продемонстрировано в таблице 1.

Как показано в таблице 1, скелет 15-летних лиц включает 12 участков скелета с активным гемопоэзом с массовой долей ККМ в пределах от 1,0 до 18,6%. Половые различия в распределении ККМ внутри скелета отсутствуют.

Элементный состав моделируемых сред равен таковому для взрослых [16] и был оценен по опубликованным данным [28].

Опубликованные результаты измерений плотности кортикального слоя кости 15-летних лиц [27] были использованы в настоящем исследовании в качестве плотности КК и ТК (1,85 г/см³). Плотность ККМ принималась равной 1,0 г/см³ [28].

Не было обнаружено значимых половых различий характеристик костной микроархитектуры [26], поэтому данные мужского и женского пола были объединены. В таблице 2 приведены значения параметров микроархитектуры БФСК 15-летних юношей и девушек.

Значения варибельности параметров микроархитектуры внутри кости использовались для возмущения характеристик модели трехмерной сети трабекул, что увеличивало ее реалистичность. Для 15-летних подростков не было найдено таких значений варибельности, поэтому эти значения принимались такими же, как для взрослых [36].

Линейные размеры и толщина кортикального слоя, принятые для БФСК 15-летних юношей и девушек, представлены в таблице 3. Источники данных, использованные для получения этих параметров, представлены в опубликованной работе [24].

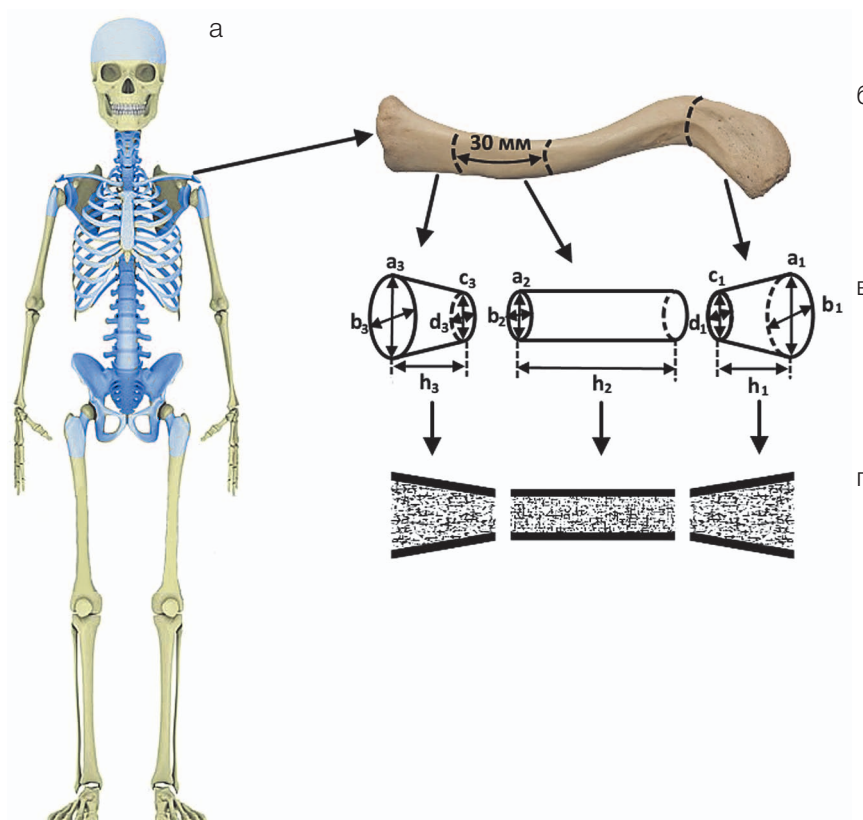


Рисунок подготовлен авторами

Рис. Участки скелета с активным гемопоэзом для подростка мужского пола в возрасте 15 лет и их сегментация на примере ключицы: а — скелет 15-летнего (синим цветом выделены моделируемые участки скелета с активным гемопоэзом); б — ключица (пунктирными линиями выделены сегменты кости); в — схема разделения кости на базовые фантомы сегмента кости (БФСК) и их линейные параметры; г — БФСК ключицы кости в воксельном представлении в разрезе (черным цветом показаны воксели, имитирующие минерализованную кость, белым — костный мозг)

Таблица 1. Массовые доли красного костного мозга (ККМ) (% от общей массы ККМ в скелете) в основных гемопоэтических сайтах скелета 15-летних лиц

Гемопоэтический сайт	Массовая доля ККМ, %	
	15-летние лица	Взрослые
Бедро	15,7	5,9
Плечо	3,8	3,6
Крестец	8,5	7,4
Тазовые кости	18,6	23,2
Череп	10,2	6,2
Ключица	1,0	0,8
Лопатка	3,3	4,7
Рёбра	13,7	9,8
Грудина	1,8	1,8
Шейные позвонки	3,3	3,5
Грудные позвонки	11,0	17,5
Поясничные позвонки	10,6	15,5

Таблица подготовлена авторами по данным [19]

Таблица 2. Параметры микроархитектуры кости, принятые для базовых фантомов сегмента кости (БФСК) 15-летних юношей и девушек

Гемопозитический сайт	<i>BV/TV</i> , %	<i>Tb. Th.</i> , мм	<i>Tb. Sp.</i> , мм
Бедро (шейка)	35 (23–43)	0,24 (22)	0,54 (14)
Бедро (область бугорков)	26 (17–32)	0,24 (22)	0,54 (14)
Плечевая кость	22 (11–32)	0,21 (13)	0,58 (32)
Рёбра	12 (5–25)	0,14 (12)	0,82 (11)
Подвздошная кость	25 (20–29)	0,16 (10)	0,46 (0,07)
Седялищная кость и лобковая кость	25 (20–29)	0,16 (10)	0,75 (9)
Череп	52 (41–65)	0,29 (32)	0,57 (35)
Ключица (центральная часть)	15 (10–20)	0,2 (32)	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)	0,14 (14)	0,15 (10)
Грудные позвонки	14 (7–19)	0,12 (17)	0,6 (15)
Поясничные позвонки + крестец	14 (7–19)	0,12 (17)	0,6 (15)

Таблица подготовлена авторами по собственным данным [25]

Примечание: в скобках дан коэффициент вариации (CV) в %, для *BV/TV* дан диапазон возможных значений.

Таблица 3. Размеры и толщина слоя кортикальной кости для базовых фантомов сегмента кости (БФСК) 15-летних юношей и девушек

Гемопозитический сайт	Сегмент	Форма ¹	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>
Бедро	Проксимальный конец (шейка)	ц	м	29,6 (5)	36 (14)	32 (13)	–	–	1,9 (19)
			ж	30,5 (5)	29,4 (14)	23,9 (13)	–	–	1,9 (19)
	Проксимальный конец (область бугорков)	дц	м	41 (4)	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)	19,4 (4)	19,4 (4)	1,1 (16)
			ж	24,9 (12)	51,3 (5)	51,3 (5)	19,4 (4)	19,4 (4)	1,1 (16)
Рёбра	Рёбра ⁴ 1–2	п	м+ж	17 (12)	30	7 (14)	–	–	0,7 (38)
	Рёбра ⁴ 11–12	п	м+ж	11 (18)	30	6 (17)	–	–	0,7 (38)
	Рёбра ⁴ 3, 4, 9, 10	п	м+ж	13 (8)	30	7 (14)	–	–	1,2 (38)
	Рёбра ⁴ 5, 6, 7, 8	п	м+ж	14 (14)	30	8 (13)	–	–	0,7 (38)
Крестец	Тело 1	п	м	30 (7)	40 (11)	24,5 (10)	–	–	1,2 (35)
			ж	30 (9)	37,8 (11)	22,2 (12)	–	–	1,2 (35)
	Тело 2–3	п	м	46 (8)	28,7 (11)	15 (9)	–	–	1,2 (35)
			ж	45,2 (15)	28 (11)	13,8 (13)	–	–	1,2 (35)

Гемопозитиче- ский сайт	Сегмент	Форма ¹	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	Тело 4–5	п	м	36 (9)	28 (11)	8 (13)	–	–	1,2 (35)
			ж	35 (14)	28 (11)	8,5 (12)	–	–	1,2 (35)
	Ножка 1	ц	м+ж	13,9 (14)	23,7 (15)	15,3 (11)	–	–	1,2 (35)
	Ножка 2	ц	м+ж	14,2 (14)	25 (11)	13,6 (17)	–	–	1,2 (35)
	Ножка 3	ц	м+ж	13,9 (14)	18,3 (11)	13,2 (14)	–	–	1,2 (35)
	Ножка 4	ц	м+ж	13,9 (14)	14,5 (11)	11,2 (18)	–	–	1,2 (35)
	Крыло 1	п	м	30 (13)	20 (10)	42 (13)	–	–	1,2 (35)
			ж	30 (9)	21 (15)	38,6 (8)	–	–	1,2 (35)
	Крыло 2	п	м	26 (15)	23 (17)	25 (8)	–	–	1,2 (35)
ж			26 (9)	23 (17)	22,7 (13)	–	–	1,2 (35)	
Крыло 3–4	пр	м+ж	19 (16)	18 (9)	38,5 (15)	38,5 (15)	–	1,2 (35)	
Тазовые кости	Крыло под- вздошной кости	п	м+ж	9,5 (31)	30	30	–	–	1 (30)
	Гребень под- вздошной кости	п	м	11 (15)	30	13 (9)	–	–	1 (30)
			ж	11 (15)	30 ⁶	13 (9)	–	–	1 (30)
	Задняя часть подвздошной кости	п	м+ж	19 (16)	30	30	–	–	1 (30)
	Верхняя ветвь седалищной кости	ц	м+ж	30 ⁶	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) ⁴ 1,5 (12) ⁴
			ж	31 (13)	14 (7)	33 (18)	–	–	0,7 (30) ⁴ 1,5 (12) ⁴
Верхняя ветвь лобковой кости (верхняя часть)	п	м	51,2 (8)	14,5 (20)	16 (20)	–	–	0,7 (30) ⁴ 1,5 (12) ⁴	
		ж	83 (7)	11 (18)	16 (20)	–	–	0,7 (30) ⁴ 1,5 (12) ⁴	
Вертлужная впадина	т	м+ж	29 (10)	26 (10)	21 (20)	–	–	0,5 (30) ⁵ 3,6 (30) ⁵	
Череп	Плоские кости свода ⁴	п	м+ж	5,2 (12)	30 ⁶	30 ⁶	–	–	1,3 (33) ³ 1,5 (22) ³
Ключица	Акромиальный конец	ц	м	19,8 (5)	22 (9)	12 (29)	12 (17)	12 (8)	0,8 (26)
			ж	20,7 (9)	21 (6)	10 (32)	10 (9)	10 (10)	0,8 (26)
	Тело	дц	м	30	12 (17)	12 (8)	–	–	1,8 (2)
			ж	30	10 (9)	10 (10)	–	–	1,8 (2)

Гемопозитический сайт	Сегмент	Форма ¹	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>
Ключица	Грудинный конец	дц	м	19,8 (5)	26 (15)	24 (13)	12 (17)	12 (8)	0,8 (26)
			ж	20,7 (9)	24 (16)	21 (14)	10 (9)	10 (10)	0,8 (26)
Лопатка	Гленоид	ц	м+ж	16,9 (8)	30,7 (11)	22,3 (18)	–	–	0,9 (28)
	Акромион	п	м+ж	8,8 (18)	32,4 (4)	25,2 (4)	–	–	0,8 (13)
	Латеральный край	п	м+ж	30	3,5 (3)	10 (12)	–	–	0,8 (13)
Грудина	Тело	п	м+ж	10,6 (14)	30	30	–	–	0,9 (44)
Шейные позвонки	Тело позвонка 3–7	ц	м+ж	11,9 (11)	15,2 (8)	19 (14)	–	–	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+ж	18,6 (16)	28,7 (19)	24,9 (20)	–	–	0,4 (25)
	Дужка + нижн. суставной отросток	п	м+ж	32 (12)	10,2 (14)	4,2 (13)	–	–	1,3 (16)
	Остистый отросток	п	м+ж	9,3 (18)	33 (18)	4,9 (18)	–	–	0,4 (25)
	Верхний суставной отросток	п	м+ж	11,4 (12)	11,3 (14)	4,4 (11)	–	–	1,3 (16)
	Поперечный отросток	п	м+ж	9,9 (18)	14,8 (18)	8,6 (19)	–	–	0,4 (25)
Поясничные позвонки	Тело позвонка	ц	м+ж	24,7 (12)	31,5 (8)	44,5 (9)	–	–	0,4 (25)
	Дужка + нижн. суставной отросток	п	м+ж	20,4 (10)	12,7 (13)	4,1 (13)	–	–	1,0 (34)
	Остистый отросток	п	м+ж	24 (10)	31 (10)	5,6 (10)	–	–	0,4 (25)
	Верхний суставной отросток	п	м+ж	14 (14)	15 (13)	12 (17)	–	–	1,0 (34)
	Поперечный отросток	п	м+ж	10,7 (10)	20,5 (11)	5,6 (10)	–	- ⁶	0,4 (25)

Таблица подготовлена авторами по собственным данным [25, 36]

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

В отличие от параметров микроструктуры кости линейные размеры ряда костей зависят от пола, поэтому их размеры были оценены отдельно для юношей и девушек.

SPSD-фантомы скелета 15-летних юношей и девушек состоят из 46 БФСК, из которых 14 сегментов специфичны для лиц мужского пола, еще 14 — для женского, а 32 сегмента моделировались одинаково для обоих полов, что показано в таблице 3.

Крестец был наиболее сегментированным участком скелета с активным гемопоэзом. В его составе было 10 БФСК, в то же время для моделирования плечевой кости и черепа использовали по одному БФСК.

Базовые фантомы сегментов костей 15-летнего подростка в большинстве случаев имеют форму цилиндров или прямоугольных параллелепипедов. Их размеры были от 3,5 до 66 мм. Половые различия характерны для многих БФСК, наибольшие различия свойственны нижней части верхней ветви лобковой кости — 66%. Слой кортикальной кости смоделированных фантомов был в пределах от 0,3 мм (тела шейных позвонков) до 2,3 мм (проксимальный конец бедренной кости). BV/TV варьировал в пределах от 12 до 52%, толщина трабекул была от 0,1 до 0,29 мм, а размер межтрабекулярного пространства — от 0,45 до 1,4 мм (табл. 4).

Популяционная вариабельность отдельных линейных размеров фантомов была от 3% (тела шейных позвонков) до 36% (нижняя ветвь лобковой кости), в среднем для всех размеров всех БФСК равна 30%. Наибольшая вариабельность толщины слоя кортикальной кости оценена для грудины — 44%, а наименьшая — для тел шейных позвонков — 3%. В среднем

вариабельность *Ct. Th.* составила 27%. Для параметров микроархитектуры этот показатель составлял 6–42%. Объем сгенерированных ДФСК был в пределах 23–264% от объема БФСК.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для оценки параметров фантомов 15-летних юношей и девушек было использовано порядка ста литературных источников, включающих описание образцов костей (более 5000) от 4592 человек [24]. Для построения этих фантомов всего было оценено 197 параметров, характеризующих линейные размеры, и 138 параметров, характеризующих микроструктуру костей скелета. Как упоминалось ранее, часть параметров фантомов 15-летних юношей и девушек принималась равной таковым для взрослых, а именно: параметры микроархитектуры для ключицы, ребер, лопатки, черепа, шейных позвонков и грудины, линейные размеры шейки бедра, плечевой кости, костей таза и ребер.

В возрасте 15 лет во многих участках скелета завершены процессы окостенения, и эти участки моделировались таким же набором сегментов, что и для взрослых, но с другими параметрами. К ним относятся: бедренная и плечевая кости, кости таза, крестец, ребра и лопатка. С другой стороны, некоторые участки скелета, смоделированные для взрослых, у 15-летних подростков не моделировались, например суставные отростки и дужки грудных и поясничных позвонков. В этой связи фантом скелета 15-летних юношей и девушек состоит из меньшего количества сегментов, чем фантомы взрослых, но большего количества, чем фантомы скелета детей младших возрастных групп.

Таблица 4. Сравнение объемов БФСК для 15-летних лиц и для взрослых мужчины и женщины

БФСК	Моделируемая среда	Объем, см ³			
		Взрослые		15-летние подростки	
		Мужчина	Женщина	Мужчина	Женщина
Шейка бедренной кости	КМ	18,43	10,39	13,6	7,92
	ТК	3,68	2,14	7,38	4,31
	КК	5,94	4,58	5,8	4,62
	Весь БФСК	28,05	17,11	25,35	16,85
Проксимальный конец плечевой кости	КМ	32,26	24,2	23,9	18,36
	ТК	2,02	1,54	6,27	4,82
	КК	3,47	3,14	3,54	2,95
	Весь БФСК	37,75	28,88	33,71	26,13
Тело первого крестцового позвонка	КМ	21,87	18,37	23,07	19,53
	ТК	3,84	3,24	3,55	3,1
	КК	3,70	3,47	2,79	2,55
	Весь БФСК	29,41	25,08	29,41	25,18

Таблица подготовлена авторами по собственным данным [25, 36]

Распределение ККМ для детей в возрасте 15 лет схоже с таковым для взрослых, однако доля ККМ в позвонках у взрослых больше, чем у 15-летних, а доля ККМ в бедренной и плечевой кости, напротив, — меньше.

BV/TV для БФСК 15-летних лиц в среднем составляет 20%, что несколько выше, чем для взрослых (17,3%). Возрастные изменения $Tb. Th.$ незначительны, $Tb. Sp.$ для 15-летних подростков на 18% ниже, чем для взрослых. В таблице 4 приведено сравнение объемов сред в составе БФСК для 15-летних юношей и девушек, а также для взрослых мужчины и женщины.

Из-за меньших линейных размеров общий объем БФСК 15-летних подростков меньше, чем у взрослых, на 21%. Половые различия усредненных значений объемов БФСК составили 11% и для отдельных сегментов достигали 73% (ребра 11–12).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная работа является шестой в рамках серии статей, посвященных параметрам вычисли-

тельных фантомов скелета людей разного возраста и пола. В ней приведено описание SPSPD-фантомов скелета для 15-летних юношей и девушек. Фантомы состоят из 46 БФСК. Для 14 из 46 сегментов были учтены половые различия линейных размеров.

На основе оценки вариабельности параметров для каждого базового фантома сегмента кости было сгенерировано по 12 ДФСК. DF, рассчитанные для ДФСК, будут использованы для оценки их популяционной вариабельности.

Сгенерированные фантомы могут применяться 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}Sr , ^{32}P , ^{186}Re , ^{188}Re , $^{117\text{m}}\text{Sn}$.

Дальнейшие исследования будут посвящены расчету DF, а также вычислительным фантомам для внутренней дозиметрии остеотропных радионуклидов во внутриутробном периоде.

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. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2013;52(1):47–57. <https://doi.org/10.1007/s00411-012-0438-5>
- Аклев А.В. Хронический лучевой синдром у жителей прибрежных сел реки Теча. Челябинск: Книга; 2012. Akleyev AV. *Chronic radiation syndrome among residents of the Techa River riverside villages*. Chelyabinsk: Book; 2012 (In Russ.).
- 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. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017;173(1–3):26–31. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncw316>
- 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>
- 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>
- O'Reilly SE, DeWeese LS, Maynard MR, Rajon DA, Wayson MB, Marshall EL, et al. An image-based skeletal dosimetry model for the ICRP reference adult female—internal electron sources. *Physics in Medicine and Biology*. 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 Physics*. 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. *Journal of Nuclear Medicine*. 2005;46(2):344–53.
- 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. *Physics in Medicine and Biology*. 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. *Annals of the ICRP*. 2020;49(1):5–297.
- 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>
- Шарагин ПА, Шишкина ЕА, Толстых ЕИ. Вычислительный фантом для дозиметрии красного костного мозга новорожденного ребенка от инкорпорированных бета-излучателей. *Медицина экстремальных ситуаций*. 2022;24(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;24(4):74–82 (In Russ.). <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;25(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;25(3):44–55 (In Russ.). <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;25(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;25(4):86–97 (In Russ.). <https://doi.org/10.47183/mes.2023.061>
- Шарагин ПА, Толстых ЕИ, Шишкина ЕА. Вычислительный фантом для дозиметрии красного костного мозга десятилетнего ребенка от инкорпорированных бета-излучателей. *Медицина экстремальных ситуаций*. 2024;26(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;26(2):38–48 (In Russ.). <https://doi.org/10.47183/mes.2024.032>
16. Шарагин ПА, Толстых ЕИ, Шишкина ЕА. Вычислительный фантом для дозиметрии красного костного мозга для взрослых мужчины и женщины. *Медицина экстремальных ситуаций*. 2025;27(2):220–8. Sharagin PA, Tolstykh EI, Shishkina EA. Computational phantom for red bone marrow dosimetry in adult males and females. *Extreme Medicine*. 2025;27(2):220–8 (In Russ.). <https://doi.org/10.47183/mes.2025-286>
 17. Cristy M. Active bone marrow distribution as a function of age in humans. *Physics in Medicine and Biology*. 1981;26(3):389–400. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/26/3/003>
 18. Robinson RA. Chemical analysis and electron microscopy of bone. *Bone as a tissue*. New York: McGraw-Hill; 1960.
 19. Vogler JB. 3rd, Murphy WA. Bone marrow imaging. *Radiology*. 1988;168(3):679–93. <https://doi.org/10.1148/radiology.168.3.3043546>
 20. 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>
 21. Vande Berg BC, Malghem J, Lecouvet FE, Maldague B. Magnetic resonance imaging of normal bone marrow. *European Radiology*. 1998;8(8):1327–34. <https://doi.org/10.1007/s003300050547>
 22. 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. *Pediatric Radiology*. 1995;25(8):596–606. <https://doi.org/10.1007/bf02011826>
 23. 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. *Pediatric Radiology*. 1995;25(8):588–95. <https://doi.org/10.1007/bf02011825>
 24. Tolstykh EI, Sharagin PA, Shishkina EA, Volchkova AYU, Smith MA, Napier BA. Stochastic parametric skeletal dosimetry model for human: anatomical-morphological basis and parameter evaluation. *PLOS One*. 2025;20(7):e0327156. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0327156>
 25. Sharagin PA, Shishkina EA, Tolstykh EI, Volchkova AYU, Smith MA, Degteva MO. *Segmentation of hematopoietic sites of human skeleton for calculations of dose to active marrow exposed to bone-seeking radionuclides. 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>
 26. Шишкина ЕА, Шарагин ПА, Волчкова АЮ. Аналитическое описание дозообразования в костном мозге от ⁹⁰Sr, инкорпорированного в кальцифицированных тканях. *Вопросы радиационной безопасности*. 2021;3:72–82. Shishkina EA, Sharagin PA, Volchkova AYU. Analytical Description of the Dose Formation in Bone Marrow due to ⁹⁰Sr Incorporated in Calcified Tissues. *Radiation Safety Issues*. 2021;3:72–82 (In Russ.). EDN: LYGTKD
 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. [https://doi.org/10.1016/S0146-6453\(03\)00002-2](https://doi.org/10.1016/S0146-6453(03)00002-2)
 28. Woodard HQ, White DR. The composition of body tissues. *British Journal of Radiology*. 1986;59:1209–18. <https://doi.org/10.1259/0007-1285-59-708-1209>
 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 Physics*. 2020;118(1):53–9. <https://doi.org/10.1097/hp.0000000000001127>
 30. 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)
 31. 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>
 32. 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>
 33. 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>
 34. 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>
 35. Shishkina EA, Sharagin PA, Tolstykh EI, Smith MA, Napier BA, Degteva MO. Uncertainty of stochastic parametric approach to bone marrow dosimetry of ^{89,90}Sr. *Heliyon*. 2024;10(4):e26275. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26275>
 36. Sharagin PA, Shishkina EA, Tolstykh EI, Smith MA, Napier BA. Stochastic parametric skeletal dosimetry model for humans: Pediatric and adult computational skeleton phantoms for internal bone marrow dosimetry. *PLOS One*. 2025;20(7):e0327479. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0327479>

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, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1457-4916>

Толстых Евгения Игоревна, д-р биол. наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4958-3214>

Шишкина Елена Анатольевна, д-р биол. наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4464-0889>