

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНЫХ ДОЗ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИНТЕРВЕНЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ У ДЕТЕЙ

Ю.Н. Капырина¹, А.В. Водоватов^{1,2}, В.Г. Пузырев¹, М.И. Комиссаров³,
И.Ю. Алешин³, И.В. Солдатов⁴, З.А. Лантух⁴, Е.С. Юн⁵, С.А. Рыжов^{4,6,7}

¹ Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет Минздрава России, Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Роспотребнадзора, Санкт-Петербург

³ Детский клинический центр имени Л.М. Рошала, Москва

⁴ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий ДЗМ, Москва

⁵ Санкт-Петербургский политехнический университет имени Петра Великого, Минобрнауки России, Санкт-Петербург

⁶ Ассоциация медицинских физиков России, Москва

⁷ Национальный медицинский исследовательский центр детской гематологии, онкологии и иммунологии имени Дмитрия Рогачева, Москва, Россия

ASSESSMENT OF EFFECTIVE DOSES DURING INTERVENTIONAL STUDIES OF THE CARDIOVASCULAR SYSTEM IN CHILDREN

Yu.N. Kapyrina¹, A.V. Vodovatov^{1,2}, V.G. Puzyrev¹, M.I. Komissarov³, I.Yu. Aleshin³,
I.V. Soldatov⁴, Z.A. Lantukh⁴, Y.S. Yun⁵, S.A. Ryzhov^{4,6,7}

¹ Saint-Petersburg State Pediatric Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

² P.V. Ramzaev Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene, Saint Petersburg, Russia

³ Leonid Roshal Children's Clinical Centre, Moscow, Russia

⁴ Research and Practical Clinical Centre of Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russia

⁵ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

⁶ Association of Medical Physicists of Russia, Moscow, Russia

⁷ Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology, Moscow, Russia

Реферат

Цель: Разработка моделей для оценки эффективных доз при интервенционных исследованиях под рентгеновским контролем на органах сердечно-сосудистой системы у детей разных возрастных категорий.

Материал и методы: Для моделирования облучения и определения эффективных доз использовалось программное обеспечение PCXMC 2.0. Исследование было выполнено на базе отделения рентгенохирургических методов диагностики и лечения Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета у детей с сердечно-сосудистыми заболеваниями в период с 2021 по 2022 г. Для каждого пациента были собраны и проанализированы физико-технические, геометрические и дозиметрические параметры. На основании собранных данных были рассчитаны значения эффективных доз и получены коэффициенты перехода от значений произведения дозы на площадь к эффективной дозе.

Результаты: На основании полученных данных были разработаны однопольные и многопольные модели облучения и рассчитаны значения эффективных доз детей при проведении интервенционных исследований на органах сердечно-сосудистой системы. Для диагностических и терапевтических интервенционных исследований значения эффективных доз находились в диапазоне от 14,8 до 65,5 мЗв. Коэффициенты перехода от значений произведения дозы на площадь к эффективной дозе составили: для возрастной категории 0 лет – 2,05 мЗв/Гр·см², 1 год – 0,80 мЗв/Гр·см², 5 лет – 0,43 мЗв/Гр·см², 10 лет – 0,27 мЗв/Гр·см², 15 лет – 0,18 мЗв/Гр·см². Кроме этого, были разработаны упрощенные модели облучения для каждой возрастной группы детей. Коэффициенты перехода для многопольных моделей значительно выше, чем для упрощенных во всех возрастных группах, что указывает на более точное распределение и учет дозы облучения в многопольных моделях.

Заключение: Несмотря на то, что многопольные модели обладают рядом преимуществ в плане точности и распределения дозы, упрощенные модели также имеют свои плюсы, которые делают их полезными в определенных клинических сценариях. Однопольные модели гораздо проще для расчета и моделирования, требуют меньше вычислительных ресурсов и времени, что ускоряет процесс планирования процедур. Однако в ситуациях, когда процедура нестандартная, пациент имеет анатомические особенности или присутствуют другие специфические условия, упрощенные модели не обеспечивают достаточную точность оценки доз облучения. В таких случаях необходимо использовать многопольные модели, которые позволяют учитывать более сложные геометрии облучения и анатомические особенности пациента, обеспечивая более точное распределение дозы и, следовательно, более надежные результаты.

Ключевые слова: интервенционные исследования, рентгеновский контроль, дети, эффективная доза, коэффициенты перехода

Abstract

Purpose: Development of models for assessing effective doses in interventional studies under X-ray control on the cardiovascular system in children of different age categories.

Material and methods: PCXMC 2.0 software was used to simulate radiation exposure and determine effective doses. The study was carried out at the Department of X-ray Surgical Diagnostic and Treatment Methods of the St. Petersburg State Pediatric Medical University for children with cardiovascular diseases in the period from 2021 to 2022. For each patient, physical, technical, geometric and dosimetric parameters were collected and analyzed. PCXMC 2.0 software was used to simulate irradiation and determine effective doses. Based on the collected data, effective dose values were calculated and conversion factors from the dose-area product to the effective dose were obtained.

Results: Based on the obtained data, single-field and multi-field irradiation models were developed and the values of effective doses for children were calculated during interventional studies on the organs of the cardiovascular system. For diagnostic and therapeutic interventional studies, the values of effective doses ranged from 14.8 to 65.5 mSv. The conversion factors from the dose-area product to the effective dose were: for the age category 0 years – 2.05 mSv/Gy·cm², 1 year – 0.80 mSv/Gy·cm², 5 years – 0.43 mSv/Gy·cm², 10 years – 0.27 mSv/Gy·cm², 15 years – 0.18 mSv/Gy·cm². In addition, simplified irradiation models were developed for each age group of children. The conversion factors for multi-field models are significantly higher than for simplified models in all age groups, indicating a more accurate distribution and accounting of radiation dose in multi-field models.

Conclusion: Although multi-field models have several advantages in terms of accuracy and dose distribution, simplified models also have their own advantages that make them useful in certain clinical scenarios. Simplified models are much simpler to calculate and simulate, require less computational resources and time, which speeds up the procedure planning process. However, in situations where the procedure is non-standard, the patient has special anatomical features, or other specific conditions are present, simplified models do not provide sufficient accuracy in estimating radiation doses. In such cases, it is necessary to use multi-field models that allow for more complex radiation geometries and patient anatomical features, providing more accurate dose distribution and, therefore, more reliable results.

Key words: intervention examinations, X-ray control, children, effective dose, conversion factors

E-mail: mosrg@mail.ru

<https://doi.org/10.52775/1810-200X-2025-108-4-99-111>

Введение

В последнее время наблюдается значительный рост количества интервенционных исследований [1, 2], в связи с развитием новых малоинвазивных методик диагностики и лечения. Ежегодно по всему миру проводят более 17 миллионов интервенционных процедур, охватывающих как диагностические, так и лечебные вмешательства [3].

Современные минимально инвазивные процедуры в интервенционной радиологии проводятся под контролем рентгеновского излучения. Интервенционные процедуры могут быть диагностическими или терапевтическими. К примеру, диагностические процедуры включают ангиографию, при которой с помощью катетера и контрастного вещества визуализируются кровеносные сосуды. Терапевтические процедуры могут включать в себя ангиопластику для расширенияуженных артерий или установки стентов для поддержания проходимости сосудов [4]. Для отслеживания положения катетера в сосудистой системе используются различные методики визуализации, включая рентгеноскопию и рентгенографию [5]. В некоторых случаях интервенционные исследования подразделяются на два этапа. Сначала производится диагностика патологии и определяется степень поражения, затем, чтобы избежать дополнительной нагрузки от повторной операции и для снижения нагрузки на организм, проводится сразу лечебное воздействие. Такие манипуляции снижают риск осложнений и смертности [6–8].

Интервенционные исследования сердечно-сосудистой системы особенно важны для детей с врожденными пороками сердца или другими сердечно-сосудистыми заболеваниями. Эти процедуры позволяют уменьшить риск развития осложнений, минимизировать травматизм и время восстановления после операции по сравнению с традиционными хирургическими методами [9]. Однако такие процедуры также требуют строгого контроля доз облучения для минимизации радиационных рисков для детей.

Рост числа проводимых интервенционных процедур обуславливает необходимость в совершенствовании методов оценки эффективных доз облучения пациентов [10]. Взрослые пациенты, которым проводят интервенционные процедуры на сердце, могут получать радиационные поражения кожи в результате вмешательства [11–13]. Для детей же основной риск связан со значитель-

ным увеличением вероятности развития онкологических заболеваний [14].

Формирование доз облучения детей существенно отличается от такого для взрослых пациентов из-за специфики анатомо-физиологических характеристик детей (вариабельность в росте и массе тела пациентов, различия в плотности и расположении радиочувствительных органов и тканей, различия в радиочувствительности органов и тканей и пр.). Высокая пролиферативная и метаболическая активность детских клеток обусловливает радиочувствительность, в 1,5–2 раза превышающую таковую у взрослых [15].

У детей из-за меньших размеров и пропорций тела органы и ткани расположены и распределены по-другому, чем у взрослых. В раннем возрасте органы находятся ближе друг к другу, что затрудняет возможность исключить их из первичного пучка рентгеновского излучения и защиту от рассеянного излучения.

В действующих отечественных нормативных документах: Нормах радиационной безопасности (НРБ-99/2009) [16], СанПиН 2.6.1.2612-10 (ОСПОРБ-99/2010) [17], – закреплены фундаментальные принципы радиационной защиты пациентов [18]. Однако в этих документах отсутствует конкретная информация о защите детей от медицинского облучения.

Расчет эффективных доз облучения для шести референтных групп, включая детей и взрослых, выполняется в соответствии с методическими указаниями МУ 2.6.1.2944-11 [19] и МУ 2.6.1.3584-19 [20], регламентирующими контроль эффективных доз облучения пациентов при рентгенологических исследованиях в медицинских учреждениях. Исходными данными для расчета являются физические характеристики пучка рентгеновского излучения. Расчет эффективной дозы основан на использовании коэффициентов перехода (КП), устанавливающих соотношение между эффективной дозой и измеренной дозовой характеристикой (произведением дозы на площадь) для выбранной анатомической области при использовании стандартной геометрии облучения пациента.

В методических указаниях МУ 2.6.1.2944-11 о контроле эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований и в МУ 2.6.1.3584-19 представлены только значения коэффициентов перехода от измеренного значения произведения дозы на площадь (ПДП) к эффективной дозе (ЭД) у взрослых пациентов



Рис. 1. Дизайн исследования

при ангиографии и ангиопластике сосудов сердца, а также по областям исследования (голова, шея, грудная клетка, брюшная полость и т.д.). Однако для детей есть коэффициенты перехода только для исследования сосудов сердца, и сопоставлять такие данные сложно из-за разницы в параметрах проведения исследований. Согласно МУ 2.6.1.3387-16 [15] по радиационной защите детей, представлены контрольные значения ПДП для того, чтобы предотвратить отдаленные детерминированные эффекты на поверхности кожи, средние значения коэффициентов перехода для интервенционных исследований общего назначения, а также способы минимизации уровня облучения.

Целью данной работы является разработка моделей для оценки эффективных доз при интервенционных исследованиях на органах сердечно-сосудистой системы у детей разных возрастных категорий.

Материал и методы

Дизайн исследования

Проспективное исследование, дизайн которого представлен на рис. 1.

Данные собирались, при наблюдении за выполнением процедур на базе отделения рентгенохирургических методов диагностики и лечения Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета для пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями в возрасте от 7 дней до 16 лет.

1. Проводилось анкетирование пациентов на предмет антропометрических и клинически важных параметров: дата рождения, масса тела, рост, дата исследования, диагноз, тип процедуры. Все данные собирались авторами вручную во время проведения исследований с использованием специально разработанных анкет (рис. 2).
2. По этапам рентгеноскопии и рентгенографии, полям облучения и для каждой рентгеновой трубки были собраны следующие

необходимые параметры проведения исследования:

- ✓ общие сведения о пациенте: дата рождения, антропометрические данные (вес, рост), дата исследования, диагноз, тип процедуры;
- ✓ измеряемые физико-технические параметры интервенционного исследования: толщину и материал дополнительного фильтра (мм Al, мм Cu), значение напряжения на рентгеновской трубке (кВ), общее произведение дозы на площадь ($\text{Гр} \times \text{см}^2$);
- ✓ геометрия облучения пациента: положение рентгеновской трубки по отношению к пациенту (под столом, над столом); проекция облучения (угол наклона рентгеновской трубки), размеры поля облучения (см); область исследования (грудная клетка, череп, и т. п.), расстояние от фокуса рентгеновской трубки до приемника изображения (см).

Для каждого рентгеновского излучателя следующие данные регистрировались отдельно. В том случае, если две рентгеновские трубы использовались одновременно, произведение дозы на площадь между трубками разделялось в равных пропорциях.

3. Для моделирования облучения и определения эффективных доз использовалось программное обеспечение РСХМС 2.0 [21] с использованием методики, описанной авторами в [22, 23].

Модели строились по данным 23 пациентов, которым были проведены интервенционные исследования, приведены в табл. 1.

Критерии соответствия

В исследование вошли все пациенты, которым были выполнены интервенционные исследования сердца в период с августа 2021 г. по август 2022 г.

Описание медицинского вмешательства

Пациентам с врожденными пороками сердца и нарушениями в работе магистральных сосудов сердца в целях диагностики проводилось ангиокардиография и зондирование камер сердца. Для терапевтических целей было

ФИО/идентификатор пациента/пол – ФИО, муж. Вес/рост – 5200 г. Возраст/дата рождения – 05.12.2021 Диагноз – ВПС: Дефект межжелудочковой перегородки Наименование процедуры – зондирование сердца Дата проведения исследования: 14.02.2022							
Этап процедуры	ПДП, мГр*см ²	Среднее напряжение на трубке, кВ	Диаметр трубки на применение, см	Угол наклона трубки	Трубка	РИП	Прочее
	1	356	67	48	0		117/130
	2	522	69	27	0		108
	2	550	69/79	27/25	0/90	/	108/126
	2	574	69	27	0		108
	2	750	69/79	27/25	0/90	/	108/126
	2	2735	80/80	27/25	0/90	/	108/126
	2	2860	70	27	0		108
	2	5467	80/80	27/25	0/90	/	108/126
	2	5523	71	27	0		108

ПДП: 5523 мГр*см²
Время процедуры: 0:03:41



Рис. 2. Пример заполненной анкеты и отображение полей облучения пациента

Общие сведения о пациентах
Таблица 1

Возрастная категория	№ пациента	Пол	Возраст	Масса тела, кг	Рост, см	ИМТ, кг/м ²
0	1	муж	5 мес.	5	60	13,9
	2	муж	5 мес. 27 д.	6,5	69	13,7
	3	муж	7 дней	3,45	50	13,8
	4	муж	1 мес. 16 д.	–	–	–
	5	муж	22 дня	4	60	11,1
	6	муж	12 дней	3,5	–	–
	7	жен	21 день	4,4	51	16,9
	8	муж	1 мес. 20 д.	6	–	–
	Среднее ± СКО		2,2 мес.	4,7 ± 1,2	58,0 ± 7,8	13,9 ± 2,1
1	9	муж	8 мес. 9 д.	5,2	–	–
	10	муж	6 мес.	8	70	16,3
	11	муж	7 мес. 10 д.	6,8	67	15,1
	12	жен	7 мес. 5 д.	5	–	–
	13	муж	6 мес. 8 д.	9,7	65	23,0
	14	муж	11 мес. 9 д.	7,9	72	15,2
	Среднее ± СКО		7,9 мес.	7,1 ± 1,8	68,5 ± 3,1	17,4 ± 3,7
5	15	жен	2 года 2 мес.	11	84	15,6
	16	муж	4 года 7 мес.	15,3	100	15,3
	17	жен	2 года 4 мес.	7,2	72	13,9
	18	муж	5 лет 1 мес.	16	107	14,0
	19	муж	5 лет	16	103	15,1
	Среднее ± СКО		3,9 лет	13,1 ± 3,9	93,2 ± 14,7	14,8 ± 0,8
	20	муж	7 лет 1 мес.	41	138	21,5
10	21	жен	8 лет 11 мес.	24	116	17,8
	Среднее ± СКО		8,1 лет	32,5 ± 12,0	127,0 ± 15,6	19,7 ± 2,6
	22	жен	16 лет 1 мес.	65	175	21,2
15	23	муж	15 лет 9 мес.	50	–	–
	Среднее ± СКО		15,9 лет	57,5 ± 10,6	175 ± 0	21,2 ± 0

Таблица 2

Основные параметры проведения исследований различных возрастных групп

Параметр *	Возрастные группы пациентов				
	0	1	5	10	15
Напряжение, кВ	71	69	67	75	87
Размер поля, см×см	11×8 – 30×32	10×14 – 30×30	18×15 – 30×42	23×25 – 25×30	23×23 – 30×35
Расстояние источник–приемник, см	114	113	114	115	120
Время облучения, с	1851	1847	1253	1961	698
ПДП, Гр×см ²	Рентгеноскопия	20,4	39,4	29,1	196,2
	Рентгенография	10,8	25,4	6,8	28,4
	За все исследование	31,2	64,8	35,9	224,5
Поглощенная доза в коже, мГр	400,1	547,3	299,8	1353,0	76,0

* Данные представлены в виде среднего значения для каждой возрастной категории

совмещено проведение зондирования камер сердца с баллонной пластикой, ангиокардиография со стентированием шунта, эмболизация открытого артериального протока. Также один из пациентов поступил с острым неуточненным перикардитом, оперативная помощь заключалась в перикардиоцентезе и дренировании перикарда.

Интервенционные исследования сосудов сердца проводились на кардиоваскулярной системе визуализации The Philips Allura Xper с общей фильтрацией 2,5 мм Al, производитель - Philips Medical Systems, Нидерланды, 2010 г.

Этическая экспертиза

Данное исследование утверждённого локальным этическим комитетом при Санкт-Петербургском государственном педиатрическом университете, протокол №52/06 от 20.03.2025 г.

Статистический анализ

Статистический анализ данных проводился с использованием программного пакета Statistica 10.

Результаты

Объекты исследования

Объектами исследования являлись пациенты детского возраста, распределенные по группам: 0, 1, 5, 10 и 15 лет. Возрастные группы соответствовали следующим периодам: 0 лет (0–6 месяцев), 1 год (6 месяцев – 2 года), 5 лет (2–7 лет), 10 лет (7–12 лет) и 15 лет (12–17 лет) [21].

Основные результаты исследования

Параметры проведения интервенционных процедур и дозы облучения, полученные детьми разных возрастных групп в ходе интервенционных исследований представлены в табл. 2.

Данные сгруппированы по возрастным категориям: 0, 1, 5, 10 и 15 лет. В табл. 3 представлен пример многопольной модели, состоящей из 9 полей облучения, при проведении зондирования камер сердца пациенту в возрасте 21 сут.

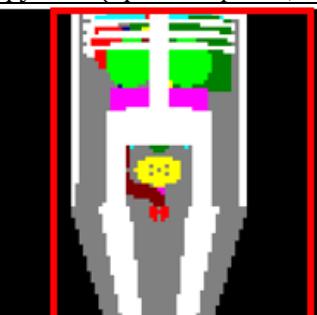
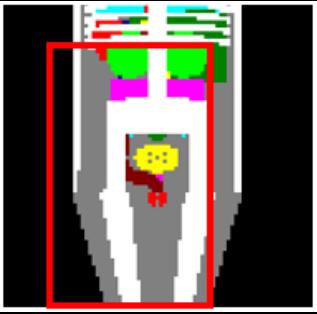
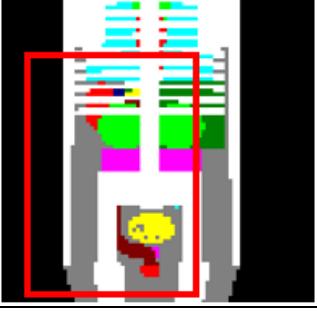
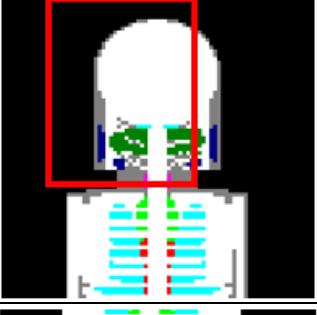
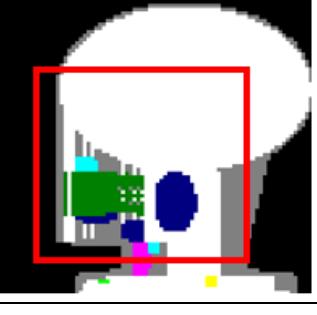
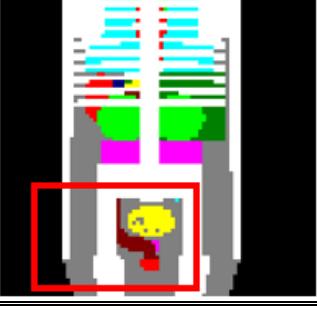
На основании собранных данных были рассчитаны значения эффективных доз и получены коэффициенты перехода от значений ПДП к эффективной дозе. Рассчитанные коэффициенты перехода и значения эффективных доз с использованием весовых коэффициентов органов и тканей из публикаций 60 и 103 МКРЗ указаны в табл. 4.

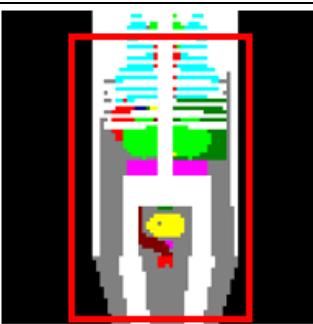
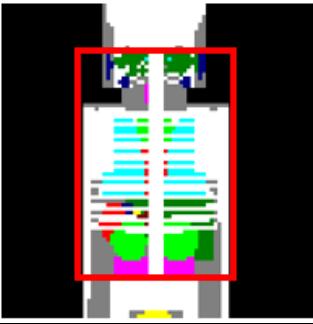
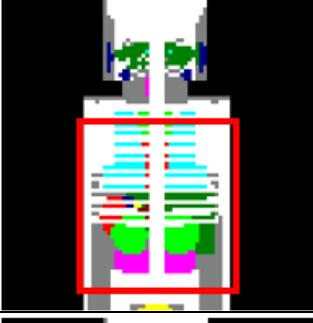
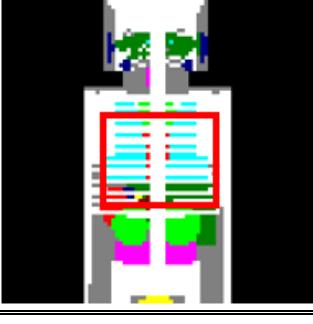
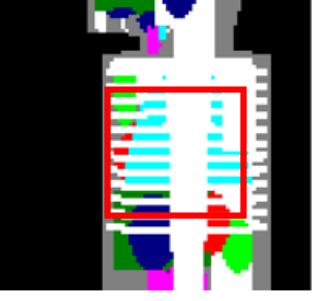
Сравнение эффективных доз и коэффициентов перехода в различных возрастных группах представлены для диагностических и терапевтических интервенционных исследований в табл. 5.

Эффективные дозы для диагностических исследований значительно снижаются с увеличением возраста. Для терапевтических исследований зависимости дозы от возраста не наблюдается, максимальные значения эффективных доз встречаются в возрастных категориях 10 лет и 0 лет. Терапевтические исследования демонстрируют более стабильные, хотя и высокие, значения доз и коэффициентов перехода по сравнению с диагностическими процедурами. Следует отметить, что взаимосвязь между возрастом пациента и временем облучения пациента, а также поглощенной дозой в коже также отсутствует.

Таблица 3

**Пример многопольной модели зондирования камер сердца для детей
возрастной категории “0 лет”**

Поле	Трубка 1 (прямая проекция)	Трубка 2 (боковая проекция)
Поле 1		Не использовалась
Поле 2		Не использовалась
Поле 3		Не использовалась
Поле 4		
Поле 5		Не использовалась

Поле 6		Не использовалась
Поле 7		Не использовалась
Поле 8		
Поле 9		

Коэффициенты перехода выше для терапевтических исследований по сравнению с диагностическими во всех возрастных группах, и их значение снижается с увеличением возраста детей. Данная закономерность объясняется снижением количества радиочувствительных органов и тканей, которые попадают в область поля облучения.

В табл. 6 проведено сравнение коэффициентов перехода (в мЗв/(Гр×см²)) для оценки эффективной дозы от ПДП в данном исследова-

нии с данными из различных литературных источников.

Коэффициенты перехода, полученные в данном исследовании, находятся в пределах значений, представленных в литературе. Для возрастных групп 0, 1, 5, 10 и 15 лет значения коэффициентов перехода варьируют в зависимости от источника. Например, для новорожденных значения колеблются от 2,05 до 3,7 мЗв/(Гр×см²). Сравнение коэффициентов перехода показывает, что результаты данного исследования согласуются с данными из раз-

Таблица 4

Средние значения эффективных доз и коэффициентов перехода от произведения дозы на площадь к эффективной дозе

Возрастные категории	Эффективная доза МКРЗ 103, мЗв	Коэффиц. перехода МКРЗ 103, мЗв/Гр×см ²	Эффективная доза МКРЗ 60, мЗв	Коэффиц. перехода МКРЗ 60, мЗв/Гр×см ²
0	60,9	2,05	50,2	1,68
1	54,0	0,80	45,7	0,66
5	14,8	0,43	11,8	0,34
10	65,5	0,27	50,7	0,21
15	21,4	0,18	20,1	0,16

Таблица 5

Сравнение эффективных доз и коэффициентов перехода в зависимости от цели проведения интервенционного исследования

Возрастная категория	Эффективная доза МКРЗ 103, мЗв		Коэффиц. перехода МКРЗ 103, мЗв/Гр×см ²	
	Диагностические исследования	Терапевтические исследования	Диагностические исследования	Терапевтические исследования
0	69,2	55,9	1,95	2,11
1	62,8	9,9	0,76	0,98
5	28,2	11,4	0,36	0,44
10	–	65,5	–	0,27
15	0,5	42,3	0,14	0,22

Таблица 6

Сравнение коэффициентов перехода данного исследования с данными литературных источников (КП указаны для различных углов наклона трубки)

Источник	Возрастные группы				
	0	1	5	10	15
Данная работа (PA+LAT)	2,11	0,79	0,44	0,31	0,20
Сарычева [24] (PA+LAT)	2,6	1,1	0,6	0,4	0,2
Onnasch [25] (PA+LAT)	2,72	1,01	0,49	0,29	0,16
Barnaoui [26]	3,5/3,5	1,6/2,6	0,8/13	0,5/0,8	0,3/0,4
Karambatsakidou [27] (PA/PA+LAT)	3,7/3,7	1,9/1,9	1,0/1,0	0,6/0,7	0,4/0,4
Schmidt [22] (PA/LAT)	2,05/2,34	0,82/16	0,42/0,64	0,24/0,38	0,13/0,22
Axelsson [29] (PA/LAT)	–	1,8/1,4	0,9/0,7	–	–
Dragusin [30] (PA/LAT)	3,61/3,31	2,19/2,17	0,91/0,87	0,71/0,65	0,41/0,39
Kawasaki [31] (PA/LAT)	2,34/4,0	1,27/2,7	–	–	–

личных литературных источников. Это подтверждает достоверность результатов и их применимость для оценки доз облучения у детей при интервенционных кардиологических процедурах. Различия в коэффициентах могут быть связаны с методическими особенностями и условиями проведения исследований, что подчеркивает важность стандартизации подходов к оценке доз облучения детей.

На основании полученных данных были рассчитаны упрощенные модели облучения по каждому пациенту. При проведении интервенционных исследований в основном используется от 2 до 9 полей, это объясняется операционным доступом и диагностикой патологии.

Однако основное поле облучения по топографии располагается в области сердца, то есть это область, в которой происходит непосредственное вмешательство или располагается патологический очаг. По нашим данным, это поле, в котором самое высокое значение ПДП. На рис. 3 представлен пример упрощенной модели при проведении зондирования камера сердца.

Табл. 7 представляет собой набор данных, которые показывают значения эффективных доз и соответствующие коэффициенты перехода для различных возрастных категорий при использовании упрощенных моделей.

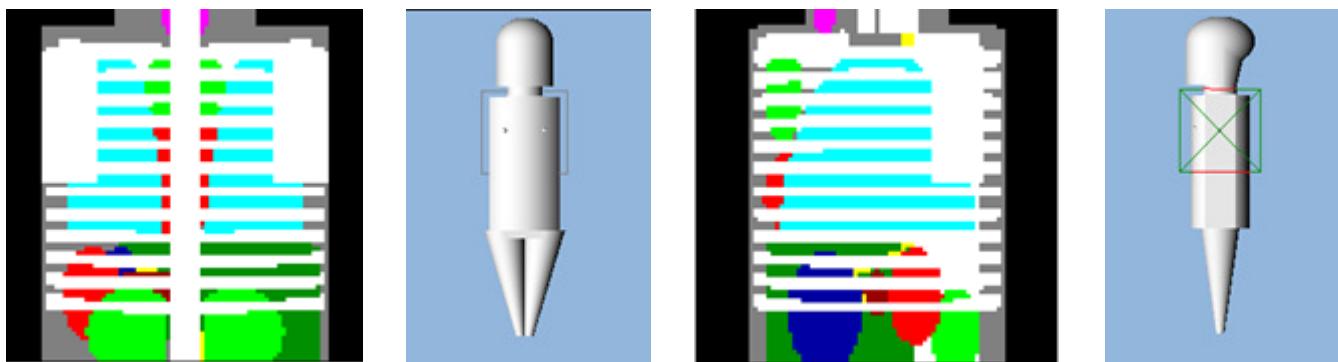


Рис. 3. Упрощенная модель в прямой и боковой проекции

Таблица 7

Эффективные дозы и коэффициенты перехода для упрощенных моделей

Возрастные категории	Эффективная доза МКРЗ 103, мЗв	Коэффиц. перехода МКРЗ 103, мЗв/Гр×см ²	Эффективная доза МКРЗ 60, мЗв	Коэффиц. перехода МКРЗ 60, мЗв/Гр×см ²
0	61,5	2,11	51,4	1,75
1	53,5	0,79	45,3	0,65
5	15,0	0,44	12,1	0,35
10	73,5	0,31	57,0	0,24
15	22,9	0,20	21,2	0,17
Среднее ± СКО	45,3 ± 25,2	0,77 ± 0,8	37,4 ± 19,7	0,63 ± 0,6

Обсуждение

Несмотря на то, что многопольные модели обладают рядом преимуществ в плане точности и распределения дозы, упрощенные модели также имеют свои плюсы, которые делают их полезными в определенных клинических сценариях. Упрощенные модели гораздо проще для расчета и моделирования. Они требуют меньше вычислительных ресурсов и времени, что ускоряет процесс планирования процедур. Благодаря простоте, упрощенные модели могут быть быстрее внедрены в клиническую практику, что особенно полезно в условиях ограниченного времени или в экстренных ситуациях. Их использование подходит для стандартных и типичных процедур, где высокая точность распределения дозы не является критически важной. Это позволяет стандартизировать процедуры и упростить их выполнение.

Однако упрощенные модели имеют свои ограничения. В ситуациях, когда процедура нестандартная, пациент имеет особенные анатомические особенности или присутствуют другие специфические условия, упрощенные модели не обеспечивают достаточную точность оценки доз облучения. В таких случаях необходимо использовать многопольные модели, которые позволяют учитывать более сложные геометрии облучения и анатомические особенности пациента, обеспечивая более точное распределение дозы и, следовательно, более надежные результаты.

Полученные коэффициенты перехода (КП) от произведения дозы на площадь (ПДП) к эффективной дозе для однопольной модели облучения представляют собой компромиссный вариант для использования в клинической практике, если в медицинской организации нет специалиста по радиационной безопасности или медицинского физика, который может работать со специализированным программным обеспечением и моделировать облучение в связи со спецификой проведения интервенционных исследований в каждой конкретной организации. В этом случае персонал медицинской организации, отвечающий за расчет эффективных доз, должен использовать КП для упрощенной однопольной модели облучения. По мнению авторов, этого достаточно для грубой оценки доз, результаты которой в дальнейшем можно использовать, например, для заполнения форм федерального государственного статистического наблюдения ЕСКИД. Разработанные КП будут использованы

при переработке МУ 2.6.1.2944-11 "Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований".

Тем не менее, использование упрощенных КП подразумевает, что эффективная доза линейно растет с увеличением ПДП, что не в полной мере корректно из-за меняющихся проекций и полей облучения. Поэтому для оптимизации радиационной защиты пациентов с целью снижения доз облучения при проведении интервенционных исследований необходимо проводить расчет эффективных доз моделируя режимы и структуру исследований, которые выполняются в медицинской организации. Наличие многопольной модели облучения позволяет с помощью специализированного программного обеспечения (например, PCXMC 2.0) рассчитать КП для различных комбинаций параметров интервенционных исследований, проводимых в медицинской организации. Авторы находятся на этапе разработки отечественного дозового калькулятора, который позволит автоматически рассчитывать эффективные дозы, исходя из используемых параметров проведения интервенционного исследования.

Ограничения исследования

К ограничениям данной работы следует отнести ограниченную выборку пациентов для каждой возрастной категории, что связано с малым вкладом исследований сердца в структуру интервенционных исследований в Санкт-Петербургском государственном педиатрическом медицинском университете. Тем не менее, полученные результаты позволяют обосновать модели облучения детей для расчета эффективных доз и коэффициентов перехода от произведения дозы на площадь к эффективной дозе, что дает возможность в дальнейшем проводить широкомасштабное исследование.

Заключение

Исследование посвящено оценке эффективных доз облучения детей при проведении интервенционных исследований сердечно-сосудистой системы. В связи с высокой радиочувствительностью детского организма и распространенностью врожденных пороков сердца, данное направление является актуальным и требует тщательного анализа.

В процессе исследования были изучены особенности проведения интервенционных исследований сердечно-сосудистой системы у детей. Интервенционные исследования являются критически важными для диагностики и лечения врожденных пороков сердца и сосудистых заболеваний. Особое внимание было уделено интервенционным исследованиям, таким как ангиография и катетеризация сердца, которые необходимы для диагностики и лечения сердечно-сосудистых заболеваний у детей. Эти процедуры требуют высокой точности и минимизации радиационного воздействия на пациента.

Были собраны и проанализированы физико-технические, геометрические и дозиметрические параметры, что позволило провести расчет органных и эффективных доз при интервенционных исследованиях сердечно-сосудистой системы у детей. Анализ данных показал, что, благодаря применению специализированного программного обеспечения PCXMC 2.0, удалось точно определить уровни облучения и получить значимые результаты для дальнейшей оптимизации процедур с целью минимизации радиационного риска для детей.

При разработке упрощенных моделей и сравнении их с многопольными моделями, анализ показал, что коэффициенты перехода для многопольных моделей значительно выше во всех возрастных группах. Это указывает на более точное распределение и учет поглощенных доз в радиочувствительных органах и тканях в многопольных моделях, что делает их предпочтительными для клинического использования.

Несмотря на преимущества многопольных моделей в плане точности распределения дозы, упрощенные модели также имеют свои достоинства. Они проще в расчете и моделировании, требуют меньше вычислительных ресурсов и времени, что позволяет оперативно получать приемлемую по точности оценку уровней облучения детей.

Список литературы

1. Bhargavan M. Trends in the utilization of medical procedures that use ionizing radiation. Health Phys. 2008; 95 (5): 612-27. <https://doi.org/10.1097/01.HP.0000327659.42618.c1>.
2. Picano E, Santoro G, Vano E. Sustainability in the cardiac cath lab. Int J Cardiovasc Imaging.

- 2007; 23 (2): 143-7. <https://doi.org/10.1007/s10554-006-9148-x>.
3. Seymour M. Health Impacts of Radiation Exposure During PCI. Cath Lab Digest. 2017; 25: 3.
 4. Lakhan SE, Kaplan A, Laird C, Leiter Y. The interventionalism of medicine: interventional radiology, cardiology, and neuroradiology. Int Arch Med. 2009; 2 (1): 27. <https://doi.org/10.1186/1755-7682-2-27>.
 5. Adam A. The definition of interventional radiology (or, "When is a barium enema an interventional procedure?"). Eur Radiol. 1998; 8 (6): 1014-5.
 6. Линденбратен ЛД. Лучевая диагностика: достижения и проблемы нового времени. Радиология – практика. 2007; (3): 4-15. Lindenbraten LD. Radiation diagnostics: achievements and problems of modern times. Radiology – Practice. 2007; (3): 4-15 (In Russ).
 7. Власова ММ. Лучевая диагностика и лучевая терапия на пороге третьего тысячелетия. СПб.: Норма. 2003: 468 с. Vlasova MM. Radiation diagnostics and radiation therapy on the threshold of the third millennium. St. Petersburg: Norm. 2003: 468 pp. (In Russ).
 8. Портной ЛМ, Тюрин ИЕ, Юрьев АС. Лучевая диагностика в Российской Федерации: современное состояние и перспективы развития. Методическое пособие. М. 2002: 150 с. Portnoy LM, Tyurin IE, Yuriev AS. Radiation diagnostics in the Russian Federation: current state and development prospects. Methodical manual. M. 2002: 150 pp. (In Russ).
 9. Дударев ВС, Анкифеев ВВ. Современная интервенционная радиология. Новости лучевой диагностики. 1997; (1): 26-7. Dudarev VS, Ankifeev VV. Modern interventional radiology. Radiation Diagnostics News. 1997; (1): 26-7 (In Russ).
 10. ICRP Publication 74. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. Annals of the ICRP. 1996; 26 (3-4).
 11. Barnea Y, Amir A, Shafir R, et al. Chronic Radiodermatitis Injury After Cardiac Catheterization. Ann Plast Surg. 2002; 49 (6): 668-72. <https://doi.org/10.1097/00000637-200212000-00018>.
 12. Dehen L, Vilmer C, Humiliire C, et al. Chronic radiodermatitis following cardiac catheterisation: a report of two cases and a brief review of the literature. Heart. 1999; 81 (3): 308-12. <https://doi.org/10.1136/hrt.81.3.308>.
 13. Aerts A, Decraene T, van den Oord JJ, et al. Chronic radiodermatitis following percutaneous coronary interventions: a report of two cases. Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology. 2003; 17 (3): 340-3. <https://doi.org/10.1046/j.1468-3083.2003.00687.x>.
 14. ICRP Publication 85. Avoidance of Radiation Injuries from Medical Interventional Procedures. Annals of the ICRP. 2000; 30 (2).
 15. Методические указания 2.6.1.3387-16. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Радиационная защита детей в лучевой диагностике. Guidelines 2.6.1.3387-16. Ionizing radiation, radiation safety. Radiation protection of children in radiation diagnostics (In Russ).
 16. Санитарные правила и нормативы 2.6.12523-09 Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Sanitary rules and regulations 2.6.12523-09 Radiation safety standards (NRB-99/2009) (In Russ).
 17. Санитарные правила и нормативы 2.6.1.2612-10 Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). Sanitary rules and regulations 2.6.1.2612-10 Basic sanitary rules for radiation safety (OSPORB-99/2010) (In Russ).
 18. CAR Diagnostic Imaging Referral Guidelines. Canadian Association of Radiologists. 2012. <https://car.ca/patient-care/referral-guidelines/> Дата обращения: 27.02.2025.
 19. Методические указания 2.6.1.2944-11 Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований. Guidelines 2.6.1.2944-11 Control of effective doses of radiation to patients during medical X-ray examinations (In Russ).
 20. Методические указания 2.6.1.3584-19 "Изменения в методических указаниях 2.6.1.2944-19 Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований. Guidelines 2.6.1.3584-19 Changes in guidelines 2.6.1.2944-19 "Control of effective doses of radiation to patients during medical X-ray examinations (In Russ).

21. Tapiovaara M, Siiskonen T. PCXMC, a Monte Carlo program for calculating patient doses in medical x-ray examinations. Radiation and Nuclear Safety Authority STUK. 2008.
22. Евразийский патент на изобретение № 042819 / 28.03.23. Пузырев ВГ, Водоватов АВ, Капырина ЮН, и др. Способ оценки эффективных доз для рентгенологических исследований с изменяемой геометрией облучения. <https://www.eapatis.com/Data/EATXT/eapo2023/PDF/042819.pdf> Дата обращения: 27.02.2025.
Eurasian Patent for invention No. 042819 / 28.03.23. Puzyrev VG, Vodovatov AV, Kapyrina YUN, and others. A method for evaluating effective doses for X-ray studies with variable geometry of irradiation (In Russ).
23. Капырина ЮН, Водоватов АВ, Пузырев ВГ, и др. Оценка эффективных доз при проведении баллонной пластики пищевода у детей. Радиационная гигиена. 2023; 16 (4): 32-43. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-4-32-43>.
Kapyrina YUN, Vodovatov AV, Puzyrev VG, and others. Evaluation of effective doses during balloon plastic surgery of the esophagus in children. Radiation Hygiene. 2023; 16 (4): 32-43 (In Russ).
24. Сарычева СС. Оценка эффективной дозы у детей в интервенционной кардиологии. Радиационная гигиена. 2017; 10 (2): 16-22. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-2-16-22>.
Sarycheva SS. Evaluation of the effective dose in children in interventional cardiology. Radiation hygiene. 2017; 10 (2): 16-22 (In Russ).
25. Onnasch DGW, Schroeder FK, Fischer G, Kramer HH. Diagnostic reference levels and effective dose in paediatric cardiac catheterization. Br J Radiol. 2007; 80 (951): 177-85. <https://doi.org/10.1259/bjr/19929794>.
26. Barnaoui S, Rehel JL, Baysson H, et al. Local reference levels and organ doses from pediatric cardiac interventional procedures. Pediatr Cardiol. 2014; 35 (6): 1037-45. <https://doi.org/10.1007/s00246-014-0895-5>.
27. Karambatsakidou A, Sahlgren B, Hansson B, et al. Effective dose conversion factors in paediatric interventional cardiology. Br J Radiol. 2009; 82 (981): 748-55. <https://doi.org/10.1259/bjr/57217783>.
28. Schmidt PW, Dance DR, Skinner CL, et al. Conversion factors for the estimation of effective dose in paediatric cardiac angiography. Phys Med Biol. 2000; 45 (10): 3095-107. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/45/10/323>.
29. Axelsson B, Khalil C, Lidegran M, et al. Estimating the effective dose to children undergoing heart investigations – a phantom study. Br J Radiol. 1999; 72 (856): 378-83. <https://doi.org/10.1259/bjr.72.856.10474499>.
30. Dragusin O, Gewillig M, Desmet W, et al. Radiation dose survey in a paediatric cardiac catheterisation laboratory equipped with flat-panel detectors. Radiat Prot Dosimetry. 2008; 129 (1-3): 91-5. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncn035>.
31. Kawasaki T, Fujii K, Akahane K. Estimation of Organ and Effective Doses for Neonate and Infant Diagnostic Cardiac Catheterizations. AJR Am J Roentgenol. 2015; 205 (3): 599-603. <https://doi.org/10.2214/AJR.14.13852>.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Участие авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределен следующим образом: Ю.Н. Капырина – поиск публикаций по теме, анализ литературы, разработка дизайна исследования, обработка полученных результатов, написание текста; А.В. Водоватов – определение основной направленности статьи, экспертная оценка списка литературы, разработка дизайна исследования; В.Г. Пузырев – определение основной направленности статьи, экспертная оценка списка литературы, разработка дизайна исследования, редактирование статьи; М.И. Комиссаров – определение основной направленности статьи, экспертная оценка списка литературы, разработка дизайна исследования, редактирование статьи; И.Ю. Алешин – определение основной направленности статьи, экспертная оценка списка литературы, разработка дизайна исследования, редактирование статьи; И.В. Солдатов – систематизация и финальное редактирование статьи; З.А. Лантух – экспертная оценка списка литературы, систематизация и финальное редактирование статьи, Е.С. Юн – проведение расчетов на основе полученных в исследовании данных.

Поступила: 14.10.2025. Принята к публикации: 15.12.2025.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Financing. The study had no sponsorship.

Contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. Yu.N. Kapyrina – search for relevant publications, literature analysis, research design development, data processing, writing; A.V. Vodovatov – determination of the main focus of the review, expert evaluation of literature review, research design development; V.G. Puzyrev – determination of the main focus of the review, expert evaluation of literature review, research design development, editing of the review; M.I. Komissarov – determination of the main focus of the review, expert evaluation of literature review, research design development, editing of the review; I.Yu. Aleshin – determination of the main focus of the review, expert evaluation of literature review, research design development, editing of the review; I.V. Soldatov – determination of the main focus of the review, expert evaluation of literature review, Z.A. Lantukh – expert evaluation of literature review, systematization and final editing of the review; Ye.S. Yun – performing calculations based on the data obtained in the study.

Article received: 14.10.2025. Accepted for publication: 15.12.2025.