

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНЫХ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ ДЕТЕЙ НА ПЭТ/КТ СКАНЕРАХ С ЦИФРОВЫМИ И АНАЛОГОВЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ

С.А. Рыжов^{1,4,5}, А.А. Волженцев¹, А.А. Шермакова^{1,2}, М.Я. Ядгаров^{1,3},
И.В. Глотова^{1,6}, К.Д. Киселев^{1,6}, Ю.Н. Ликарь¹

¹ Национальный медицинский исследовательский центр детской гематологии, онкологии и иммунологии имени Дмитрия Рогачева Минздрава России, Москва

² Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова Минздрава России, Москва

³ Федеральный научно-клинический центр реаниматологии и реабилитологии, Москва

⁴ Ассоциация медицинских физиков России, Москва,

⁵ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий ДЗМ, Москва

⁶ Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва

COMPARATIVE ANALYSIS OF EFFECTIVE DOSES OF MEDICAL EXPOSURE IN CHILDREN ON PET/CT WITH DIGITAL AND ANALOG DETECTORS

S.A. Ryzhov^{1,4,5}, A.A. Volzhencev¹, A.A. Shermakova^{1,2}, M.Ya. Yadgarov^{1,3}, I.V. Glotova^{1,6},
K.D. Kiselev^{1,6}, Yu.N. Likar¹

¹ Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology, Moscow, Russia

² Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia

³ Federal Research and Clinical Center of Intensive Care Medicine and Rehabilitology, Moscow, Russia

⁴ Association of Medical Physicists of Russia, Moscow, Russia

⁵ Research and Practical Clinical Centre of Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russia

⁶ National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia

Реферат

Цели: Оценить эффективную дозу (ЭД) при выполнении ПЭТ/КТ с ¹⁸F-ФДГ у детей на ПЭТ/КТ-томографах с цифровыми детекторами, определить вклад ПЭТ- и КТ-компонентов в суммарную дозу и сравнить результаты с данными томографов предыдущего поколения.

Материал и методы: Проведено одноцентровое ретроспективное исследование 1899 детей (2793 ПЭТ/КТ-исследования), выполненных в 2024–2025 гг. на двух томографах Discovery MI (General Electric Healthcare, США) с аксиальным полем зрения 20 см. Пациенты распределены на возрастные группы 0–2, 3–7, 8–12 и 13–17 лет. ЭД от ПЭТ-компонента рассчитывали по введенной активности ¹⁸F-ФДГ с использованием возрастных дозовых коэффициентов согласно МУ 2.6.1.3700-21, от КТ-компонента – по DLP и коэффициентам согласно МУ 2.6.1.3584-19.

Результаты: Средняя суммарная ЭД составила 21,7 мЗв (7,1–82,8 мЗв). С увеличением возраста относительный вклад КТ-компонента возрастал с 49,2 до 76,9 %, а ПЭТ-компонента снижался с 50,7 до 23,0 %. Наибольшее влияние на суммарную ЭД оказывало выполнение дополнительных контрастных КТ-серий, которые увеличивали суммарную ЭД на 34–65 %. Положение рук и длина области сканирования не демонстрировали устойчивого влияния на дозу. По сравнению с

ПЭТ/КТ предыдущего поколения отмечено снижение суммарной ЭД во всех возрастных группах на 4,7–10,1 %, преимущественно за счет уменьшения дозы ПЭТ-компонента на 17–21 %.

Заключение: Использование ПЭТ/КТ-томографов с цифровыми детекторами позволяет значительно снизить лучевую нагрузку на детей. Основным резервом дальнейшей оптимизации остается КТ-компонент, прежде всего при проведении исследований с контрастным усилением.

Ключевые слова: ядерная медицина, ПЭТ/КТ, ^{18}F -ФДГ, эффективная доза, детская онкология, радиационная безопасность, оптимизация протоколов

Abstract

Purpose: To assess the effective dose (ED) associated with ^{18}F -FDG PET/CT in pediatric patients undergoing examinations on PET/CT scanners equipped with digital detectors, to quantify the contributions of the PET and CT components to the total dose, and to compare the findings with data obtained from previous-generation PET/CT systems.

Materials and Methods: This single-center retrospective study included 1,899 pediatric patients who underwent 2,793 PET/CT examinations in 2024–2025 on two Discovery MI scanners (General Electric Healthcare, USA) with a 20-cm axial field of view. Patients were stratified into four age groups: 0–2, 3–7, 8–12, and 13–17 years. The ED attributable to the PET component was estimated from the administered ^{18}F -FDG activity using age-specific dose coefficients in accordance with MU 2.6.1.3700-21, while the ED from the CT component was calculated from the dose-length product (DLP) using the corresponding age-specific conversion coefficients specified in MU 2.6.1.3584-19.

Results: The mean total ED was 21.7 mSv (range, 7.1–82.8 mSv). With increasing age, the relative contribution of the CT component increased from 49.2 % to 76.9 %, whereas the contribution of the PET component decreased from 50.7 % to 23.0 %. The strongest effect on total ED was associated with additional contrast-enhanced CT acquisitions, which increased total ED by 34–65 %. Neither patient arm position nor scan length showed a consistent association with ED. Compared with previous-generation PET/CT systems, total ED was reduced by 4.7–10.1 % across the age groups, primarily due to a 17–21 % reduction in the PET component.

Conclusion: The use of PET/CT systems equipped with digital detectors is associated with a reduction in radiation exposure in pediatric patients. Further dose optimization should focus primarily on the CT component, particularly the use of additional contrast-enhanced CT acquisitions.

Key words: nuclear medicine, PET/CT, ^{18}F -FDG, effective dose, pediatric oncology, radiation safety, protocol optimization

E-mail: yury.likar@dgoi.ru

<https://doi.org/10.52775/1810-200X-2026-111-3-94-108>

Введение

Ежегодно в Российской Федерации выполняется более 250 тыс. ПЭТ/КТ исследований, из них больше половины проводится в частных медицинских центрах, ежегодный прирост исследований составляет 5,4 % [1], при этом рост коллективной дозы за счет методов ядерной медицины в среднем за год составляет 20 % [2–4]. Это обуславливает актуальность работ по оптимизации лучевой нагрузки. Позитронно-эмиссионная томография, совмещенная с компьютерной томографией с ^{18}F -фтордезоксиглюкозой (ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ) широко применяется в детской онкологии, так как сочетает в себе информацию об анатомической локализации и метаболической активности патологического процесса [5, 6]. В педиатрии

ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ используется при инициальной диагностике (стадировании/рестадировании), для выявления рецидива, оценки эффективности проведенного лечения, а также при планировании лучевой и радионуклидной терапии [7–10]. В ходе лечения большинство детей подвергается повторным исследованиям, количество которых может достигать 4–6 в течение одного года. Это создает существенную лучевую нагрузку, которая достаточно часто может превышать 100 мЗв за весь период лечения. Из общего количества проводимых в нашей стране ПЭТ/КТ исследований детям проводится около 5 %, при этом темпы прироста количества исследований в педиатрии по нашим оценкам составляют 7–10 %.

Детский организм характеризуется более высокой радиочувствительностью по сравне-

нию со взрослыми, что связано с активной клеточной пролиферацией и большей ожидаемой продолжительностью предстоящей жизни [11, 12], и эти факторы, наряду с высокой кумулятивной лучевой нагрузкой, становятся значимыми при оценке рисков радиационного воздействия. Таким образом минимизация эффективной дозы (ЭД) за исследование при безусловном сохранении его диагностического качества является приоритетной задачей в педиатрии. Решение данной проблемы состоит из нескольких взаимосвязанных частей: 1) обоснование показаний к проведению исследований; 2) персонализации протоколов сканирования; 3) индивидуального расчета вводимой активности; 4) выбора анатомической зоны сканирования; 5) обоснованного применения контрастного усиления и оптимизации параметров КТ с одной стороны, а также оптимизации аппаратного парка и внедрение в педиатрической практике наиболее современного оборудования, позволяющего максимально снизить лучевую нагрузку с другой стороны. Использование комплексного подхода может способствовать снижению лучевой нагрузки от исследования без потери его диагностического качества [12–14].

Новым технологическим этапом, открывающим дополнительные возможности для снижения лучевой нагрузки, стало внедрение ПЭТ/КТ-томографов с кремниевыми фотумножителями (SiPM, цифровые детекторы). Ключевое преимущество данной технологии – значительно более высокая чувствительность по сравнению с аналоговыми системами. В теории высокая чувствительность SiPM позволяет значимо снижать вводимую активность радиофармацевтического лекарственного препарата (РФЛП). Конечно, следует учитывать, что в современных ПЭТ/КТ увеличение чувствительности во многом связано не только с типом детекторов, но и их количеством, т.е. с расширением аксиального поля зрения. Кроме того, применение современных алгоритмов реконструкции КТ-изображений потенциально позволяет снизить дозу и от КТ-компонента [15–20]. В ряде работ было показано, что переход на цифровые системы дает возможность либо сократить время сканирования, либо уменьшить активность РФЛП на 30–45 % у взрослых пациентов [18, 21–24]. Однако данные о влиянии этой технологии на эффективную дозу у педиатрических пациентов, особенно в сравнении с предшествующим поколением

оборудования, в литературе практически отсутствуют.

Целью настоящей работы стала ретроспективная количественная оценка ЭД, полученной детьми различных возрастных групп с онкологическими заболеваниями при проведении ПЭТ/КТ с цифровыми детекторами и проверка гипотезы о значимом снижении лучевой нагрузки по сравнению с исследованиями на системах предыдущего поколения.

Материал и методы

Дизайн исследования и критерии отбора пациентов

Проведено ретроспективное одноцентровое наблюдательное исследование на базе НМИЦ ДГОИ им. Дмитрия Рогачева Минздрава России (далее – Центр) по оценке ЭД при выполнении ПЭТ/КТ с цифровыми детекторами. В анализ включены данные всех исследований, отвечающих критериям включения, выполненные у детей с онкологическими заболеваниями в период с января 2024 по декабрь 2025 гг. на двух томографах Discovery MI (General Electric Healthcare, США) с аксиальным полем зрения 20 см. В ходе исследования на оборудовании выполнялись все процедуры гарантии качества в соответствии с требованиями производителя. Дополнительно в полном объеме проводились процедуры контроля качества ПЭТ/КТ-сканеров в соответствии с рекомендациями Международной электротехнической комиссии (IEC 61675-1:2022), Национальной ассоциацией производителей электрооборудования (NEMA NU 2-2024) и Американской ассоциации медицинских физиков (AAPM TG-126) [25, 26]. В целях кросс калибровки сканеров и гармонизации количественных измерений проведен контроль коэффициентов восстановления по используемым протоколам сканирования согласно рекомендациям Европейской ассоциации ядерной медицины по программе EARL 2.0. На обоих аппаратах использовались одинаковые настройки протоколов сканирования. За время исследования изменений как в методику расчета вводимой активности, так и в протокол сканирования не вносилось. В анализ включены данные 2793 ПЭТ/КТ исследований (1899 пациентов).

Далее был выполнен сравнительный анализ полученных значений ЭД от ПЭТ/КТ с циф-

ровыми детекторами с нашими данными по эффективной дозе на ПЭТ/КТ предыдущего поколения, опубликованными ранее [27].

В настоящей работе мы придерживались терминологических подходов, изложенных в серии публикаций по стандартизации понятий в медицинской радиологии [28], и использовали понятие “эффективная доза” как меру радиационного ущерба, согласно определению, приведенному в российских нормативных документах (Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 26 апреля 2010 г. N 40 “Об утверждении СП 2.6.1.2612-10 “Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010)”).

Критерии включения: (а) пациенты в возрасте от 0 до 17 лет; (б) ПЭТ/КТ исследования были выполнены в Центре на аппаратах Discovery MI General Electric Healthcare с аксиальным полем зрения 20 см; (в) выполненные ПЭТ/КТ-исследования были доступны в системе архивирования и передачи изображений (PACS) Центра; (г) наличие информации о пациентах в электронной истории болезни Центра (диагноз, масса тела, введенная активность, параметры КТ-сканирования). Исследование было проведено в соответствии со стандартами Хельсинкской декларации. Ввиду ретроспективного характера, информированное согласие пациентов не требовалось.

Критерии исключения: отсутствие в медицинской документации информации о массе тела, введенной активности, значениях ЭД от КТ и(или) от ПЭТ.

Пациенты соблюдали стандартные правила подготовки к исследованию: голод 6 часов до

введения ^{18}F -ФДГ, безуглеводная диета за 24–48 часов до исследования, покой и теплая одежда. Исследования выполняли через 60 минут после внутривенного введения ^{18}F -ФДГ (через периферический или центральный катетер).

Характеристика протоколов сканирования

В зависимости от клинической задачи использовали два протокола: “все тело” и “TORSO” (от основания черепа до верхней трети бедер). Укладка осуществлялась с руками, поднятыми вверх или опущенными вдоль тела, в зависимости от состояния пациента и клинической информации о заболевании. Всем пациентам при отсутствии противопоказаний и отсутствии данных КТ с внутривенным контрастированием, выполненной в течение предшествующих 3 недель, дополнительно проводили КТ в равновесной фазе с контрастным усилением.

Протокол КТ-исследования выбирали в зависимости от массы тела и роста пациента (табл. 1), во всех протоколах КТ была включена функция автоматической модуляции тока трубки.

Полученные ПЭТ-изображения были реконструированы с использованием итеративного алгоритма VUE Point FX (OSEM с TOF, с PSF-моделированием, число подмножеств – 8, число итераций – 4) с коррекцией ослабления излучения по данным КТ.

Расчет эффективной дозы (ЭД)

Расчет ЭД проводили отдельно для ПЭТ- и КТ-компонентов, пациенты были стратифи-

Таблица 1

Основные характеристики протоколов сканирования КТ в зависимости от антропометрических параметров пациента

Масса пациента, кг (рост, см)	Тип сканирования	Пиковое напряжение на трубке, кВ	Диапазон тока, мА		Индекс шума	Толщина среза, мм
			мин.	макс.		
0–12	Спиральный	80	10	140	14,82	3,75
13–20	Спиральный	100	10	120	15,43	3,75
20–40	Спиральный	100	10	180	16,07	3,75
<40	Спиральный	100	10	180	16,06	3,75
	Пошаговый	100	10	50	15,86	2,50
40–60	Спиральный	120	10	180	16,68	3,75
<60	Спиральный	120	10	180	16,68	3,75
	Пошаговый	120	10	50	17,44	2,50
>60	Спиральный	120	10	260	17,29	3,75
>60 (180 см)	Спиральный	120	10	260	17,29	3,75
	Пошаговый	120	10	240	17,29	2,50
>60 (200 см)	Пошаговый	120	10	160	17,44	2,50
	Спиральный	120	10	260	17,29	3,75
	Пошаговый	120	10	50	17,44	2,50

Таблица 2

Дозовые коэффициенты, использованные при расчете эффективной дозы для ПЭТ- и КТ-компонентов у детей различных возрастных групп (согласно действующим МУ)

Часть исследования	Нормативный документ	Размерность	Дозовые коэффициенты*				
			0–6 месяцев	0–2 года	3–7 лет	8–12 лет	13–17 лет
ПЭТ с ^{18}F -ФДГ	МУ 2.6.1.3700-21	мЗв/МБк	–	0,095	0,056	0,037	0,024
КТ всего тела	МУ 2.6.1.3584-19	мЗв/(мГр·см)	0,043	0,038	0,031	0,027	0,020

* При наличии в методических документах перекрывающихся диапазонов возрастов выбор делался в сторону большего дозового коэффициента. Например, при диапазонах 0–2, 2–7 использованы диапазоны 0–2 и 3–7 и т.д. Для столбца 0–2 года для КТ использовался диапазон от 7 месяцев до 2 лет включительно

цированы по возрастным группам согласно действующими методическими указаниями МУ 2.6.1.3700-21 и МУ 2.6.1.3584-19 (МУ 2.6.1.3700-21 “Оценка и учет эффективных доз у пациентов при проведении радионуклидных диагностических исследований” (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 31 августа 2021 г.)) с целью использования верных возрастных дозовых коэффициентов (табл. 2).

Поскольку в методических рекомендациях отсутствуют дозовые коэффициенты для протокола “TORSO” и исследований с контрастным усилением, для обеспечения сопоставимости данных авторами было принято решение использовать дозовые коэффициенты для режима “всего тела”. При этом авторы осознают, что фактическое значение ЭД для протокола TORSO и протоколов ПЭТ/КТ с контрастным усилением может быть выше на 10–40 %. Коэффициенты для 16 см фантома не использовались ввиду того, что диаметр исследованных пациентов превышал указанное значение.

Статистический анализ

Статистический анализ выполнен с использованием IBM SPSS Statistics 27.0 и Python (библиотеки pandas, numpy, scipy и matplotlib). Количественные показатели представлены в виде среднего значения и 95 % доверительного интервала (ДИ), а также медианы и межквартильного размаха (Q1; Q3). Межгрупповые сравнения выполняли путем оценки разности средних значений и ее 95 % ДИ, вычисленный с использованием метода t-критерия Уэлча для независимых выборок. Анализ проводился стратифицированно по возрастным группам.

Результаты

Выполнена ретроспективная количественная оценка ЭД, полученная детьми от выполнения исследования ПЭТ/КТ с цифровыми детекторами. В соответствии с критериями отбора, все 2793 ПЭТ/КТ-исследования, выполненных у 1899 пациентов в Центре за указанный период, были включены в анализ. Из них 329 пациентов были в возрасте 0–2 года, 420 пациентов – 3–7 лет, 396 пациентов – 8–12 лет, и 771 пациентов – 13–17 лет. Следует отметить, что суммарное число пациентов по возрастным группам превышает общее число включенных пациентов, поскольку у части пациентов (17 человек) выполнялось несколько ПЭТ/КТ-исследований в разные периоды наблюдения, и при повторных исследованиях они переходили в следующую возрастную группу.

Суммарная эффективная доза и вклад компонентов

Средняя суммарная ЭД по всей когорте составила 21,69 мЗв. Анализ по возрастным группам показал, что с возрастом суммарная доза закономерно увеличивалась с 13,7 мЗв (0–2 года) до 28,0 мЗв (13–17 лет). В табл. 3 представлены результаты полученной ЭД от ПЭТ- и КТ-частей, а также суммарная эффективная доза при ПЭТ/КТ у педиатрических пациентов различных возрастных групп.

Анализ вклада компонентов в суммарную эффективную дозу показал, что рост ЭД был обусловлен, главным образом, КТ-компонентом, средняя доза которого возрастала от 6,9 до 22,1 мЗв. В то же время, средняя ЭД от ПЭТ-компонента была относительно стабильной и находилась в узком диапазоне 5,50–6,77 мЗв во всех группах. Такое неравенство динамики привело к выраженному перераспределению

Таблица 3

Эффективная доза от ПЭТ- и КТ-компонентов, а также суммарная эффективная доза при ПЭТ/КТ у педиатрических пациентов различных возрастных групп

Возраст	N пациентов	N исследований	Медиана (Q1; Q3)	Среднее (95 % ДИ)
ЭД от ПЭТ, мЗв				
13–17 лет	771	1177	5,64 (4,78; 6,72)	5,88 (5,79; 5,97)
8–12 лет	396	586	5,35 (4,38; 6,87)	5,84 (5,69; 6,00)
3–7 лет	420	617	5,32 (4,98; 5,71)	5,50 (5,43; 5,58)
0–2 года	329	413	6,65 (6,08; 7,41)	6,77 (6,67; 6,88)
ЭД от КТ, мЗв				
13–17 лет	771	1177	19,86 (13,92; 26,84)	22,11 (21,47; 22,74)
8–12 лет	396	586	14,45 (9,98; 19,22)	16,86 (16,01; 17,72)
3–7 лет	420	617	9,52 (7,19; 11,44)	9,78 (9,49; 10,07)
0–2 года	329	413	6,95 (5,02; 8,51)	6,92 (6,69; 7,16)
Суммарная ЭД, мЗв				
13–17 лет	771	1177	25,62 (18,95; 33,54)	27,99 (27,29; 28,69)
8–12 лет	396	586	19,88 (14,58; 26,14)	22,71 (21,72; 23,70)
3–7 лет	420	617	14,70 (12,33; 17,12)	15,28 (14,94; 15,63)
0–2 года	329	413	13,57 (11,50; 15,39)	13,70 (13,39; 14,01)

Таблица 4

Вклад ПЭТ- и КТ-компонентов в суммарную эффективную дозу при ПЭТ/КТ

Возраст	N пациентов	N исследований	Вклад ПЭТ, %	Вклад КТ, %
13–17 лет	771	1177	23,05	76,95
8–12 лет	396	586	28,34	71,66
3–7 лет	420	617	37,45	62,55
0–2 года	329	413	50,77	49,23

вклада компонентов в суммарную ЭД (табл. 4). Для детей до 2 лет вклады ПЭТ и КТ были практически равны (50,8 % и 49,2 %), тогда как у подростков 13–17 лет на долю КТ приходилось уже более трех четвертей суммарной дозы (76,9 %), а вклад ПЭТ снизился до 23,1 %.

Сравнение суммарной эффективной дозы в зависимости от анатомической зоны сканирования, применения контрастного усиления и положения рук пациента представлено в табл. 5–10.

Сравнение суммарной ЭД между коротким протоколом (TORSO) и протоколом “все тело” показало отсутствие статистически значимых различий во всех возрастных группах.

Факторы, влияющие на эффективную дозу

Наиболее выраженное и статистически значимое влияние на суммарную ЭД пациентов, как и ожидалось, оказывает наличие дополнительных серий КТ-сканирования с контрастным усилением. Этот эффект наблюдался во всех возрастных группах и для обоих протоколов сканирования (“все тело” и “TORSO”), как показано в табл. 10 и 11. В среднем, наличие контрастной

серии увеличивало суммарную ЭД на 34–65 % в зависимости от возрастной группы, от 3,75 мЗв (0–2 года) до 13,85 мЗв (13–17 лет) для протокола “все тело” и на сопоставимые значения для протокола “TORSO”. Дополнительный стратифицированный анализ не выявил статистически значимого и устойчивого вклада в суммарную ЭД таких факторов, как анатомическая зона сканирования (протокол “все тело” или “TORSO”) и положение рук пациента. Мы полагаем, что подавляющий по величине эффект от контрастного усиления мог маскировать более тонкое влияние этих параметров, поэтому их детальное обсуждение выходит за рамки данного исследования.

Сравнение эффективной дозы на цифровых и аналоговых томографах

Ключевые результаты сравнения с ранее полученными нами данными на системах предыдущего поколения [27] представлены в табл. 11 и 12. Применение цифрового ПЭТ/КТ привело к статистически значимому снижению суммарной ЭД практически во всех возрастных группах. Следует отметить, что в группе детей 8–12 лет снижение суммарной ЭД на 1,13 мЗв оказалось на границе статистической

Таблица 5

Сравнение суммарной эффективной дозы при ПЭТ/КТ в режиме “короткий протокол “TORSO” и “все тело” у детей различных возрастных групп

Возраст	Протокол TORSO			Протокол «все тело»			Разница средних, мЗв (95 % ДИ)
	N пациентов	N исследований	Среднее (95 % ДИ), мЗв	N пациентов	N исследований	Среднее (95 % ДИ), мЗв	
13–17 лет	349	587	27,32 (26,36; 28,27)	461	590	28,65 (27,62; 29,69)	1,34 (–0,07; 2,74)
8–12 лет	112	197	22,84 (21,14; 24,53)	295	389	22,64 (21,41; 23,87)	–0,20 (–2,28; 1,89)
3–7 лет	41	74	15,63 (14,59; 16,66)	389	543	15,24 (14,87; 15,60)	–0,39 (–1,48; 0,70)
0–2 года	4	4	15,13 (10,60; 19,66)	325	409	13,68 (13,37; 14,00)	–1,45 (–5,94; 3,05)

Таблица 6

Сравнение суммарной эффективной дозы при ПЭТ/КТ в режиме протокол “TORSO с контрастом” и “все тело” с контрастом у педиатрических пациентов различных возрастных групп

Возраст	Протокол TORSO с контрастом			Протокол «все тело» с контрастом			Разница средних, мЗв (95 % ДИ)
	N пациентов	N исследований	Среднее (95 % ДИ), мЗв	N пациентов	N исследований	Среднее (95 % ДИ), мЗв	
13–17 лет	247	394	31,04 (29,88; 32,19)	250	315	35,11 (33,67; 36,56)	4,07 (2,22; 5,93)*
8–12 лет	79	129	26,56 (24,40; 28,72)	171	218	27,27 (25,43; 29,12)	0,71 (–2,13; 3,55)
3–7 лет	31	58	16,71 (15,65; 17,77)	265	365	16,72 (16,28; 17,17)	0,02 (–1,13; 1,17)
0–2 года	4	4	15,13 (12,34; 17,92)	225	288	14,79 (14,45; 15,13)	–0,34 (–3,15; 2,47)

* Различия статистически значимы (95 % ДИ разницы средних не включает 0)

Таблица 7

Сравнение суммарной эффективной дозы при ПЭТ/КТ при положении “руки вверх” в режимах протокол “TORSO” и “все тело” у педиатрических пациентов различных возрастных групп

Возраст	Протокол TORSO «руки вверх»			Протокол «все тело», «руки вверх»			Разница средних, мЗв (95 % ДИ)
	N пациентов	N исследований	Среднее (95 % ДИ), мЗв	N пациентов	N исследований	Среднее (95 % ДИ), мЗв	
13–17 лет	304	516	27,12 (26,10; 28,14)	49	55	30,60 (26,59; 34,61)	3,48 (–0,65; 7,61)
8–12 лет	103	180	22,96 (21,26; 24,66)	8	8	27,07 (8,32; 45,82)	4,11 (–14,66; 22,88)
3–7 лет	13	24	17,42 (15,15; 19,69)	2	3	30,87 (–10,34; 72,08)	13,45 (–27,02; 53,92)
0–2 года	0	0	НП	0	0	НП	НП

* НП – не применимо

Таблица 8

Сравнение суммарной эффективной дозы при ПЭТ/КТ при положении “руки вверх” и контрастном усилении режимах протокол “TORSO” и “все тело” у педиатрических пациентов различных возрастных групп

Возраст	Протокол TORSO «руки вверх» с контрастом			Протокол «все тело», «руки вверх» с контрастом			Разница средних, мЗв (95 % ДИ)
	N пациентов	N исследований	Среднее (95 % ДИ), мЗв	N пациентов	N исследований	Среднее (95 % ДИ), мЗв	
13–17 лет	220	357	30,65 (29,43; 31,86)	33	36	35,65 (30,39; 40,92)	5,01 (–0,38; 10,40)
8–12 лет	74	120	26,43 (24,32; 28,55)	5	5	32,70 (–0,98; 66,38)	6,26 (–27,35; 39,87)
3–7 лет	10	20	18,48 (16,02; 20,95)	1	2	40,40 (НП)	21,92 (НП)
0–2 года	0	0	НП	0	0	НП	НП

* НП – не применимо

Таблица 9

Сравнение суммарной эффективной дозы при ПЭТ/КТ в режиме “все тело” с контрастом и без контраста у детей различных возрастных групп

Возраст	Протокол «все тело» без контраста			Протокол «все тело» с контрастом			Разница средних, мЗв (95 % ДИ)
	N пациентов	N исследований	Среднее (95 % ДИ), мЗв	N пациентов	N исследований	Среднее (95 % ДИ), мЗв	
13–17 лет	222	275	21,26 (20,41; 22,10)	250	315	35,11 (33,66; 36,56)	13,85 (12,18; 15,53)*
8–12 лет	131	171	16,74 (15,83; 17,65)	171	218	27,27 (25,42; 29,13)	10,53 (8,47; 12,60)*
3–7 лет	136	178	12,19 (11,82; 12,56)	265	365	16,72 (16,28; 17,17)	4,53 (3,96; 5,11)*
0–2 года	112	121	11,04 (10,65; 11,43)	225	288	14,79 (14,45; 15,13)	3,75 (3,24; 4,27)*

* Различия статистически значимы (95 % ДИ разницы средних не включает 0)

Таблица 10

Сравнение суммарной эффективной дозы при ПЭТ/КТ в режимах протокол “TORSO” с контрастом и протокол “TORSO” без контраста у педиатрических пациентов различных возрастных групп

Возраст	Протокол TORSO с контрастом			Протокол TORSO без контраста			Разница средних, мЗв (95 % ДИ)
	N пациентов	N исследований	Среднее (95 % ДИ), мЗв	N пациентов	N исследований	Среднее (95 % ДИ), мЗв	
13–17 лет	247	394	31,04 (29,88; 32,20)	123	193	19,72 (18,67; 20,78)	11,31 (9,75; 12,88)*
8–12 лет	79	129	26,56 (24,38; 28,74)	39	68	15,77 (14,06; 17,48)	10,79 (8,04; 13,54)*
3–7 лет	31	58	16,71 (15,62; 17,79)	11	16	11,70 (9,93; 13,47)	5,00 (2,98; 7,03)*
0–2 года	4	4	15,13 (10,60; 19,66)	0	0	НП	НП

* Различия статистически значимы (95 % ДИ разницы средних не включает 0); НП, не применимо

Таблица 11

Разность средних значений ЭД полученных от исследований ПЭТ/КТ с цифровыми детекторами и без цифровых детекторов по возрастным группам по сравнению с [27]

Возраст	Разность средних, мЗв	95 % ДИ разности, мЗв
ЭД от ПЭТ, мЗв		
13–17 лет	–1,25	–1,37; –1,13*
8–12 лет	–1,16	–1,37; –0,95*
3–7 лет	–1,22	–1,33; –1,11*
0–2 года	–1,83	–1,97; –1,69*
ЭД от КТ, мЗв		
13–17 лет	–1,90	–2,76; –1,03*
8–12 лет	0,03	–1,10; 1,16
3–7 лет	0,11	–0,34; 0,57
0–2 года	0,88	0,50; 1,25*
Суммарная ЭД, мЗв		
13–17 лет	–3,15	–4,10; –2,20*
8–12 лет	–1,13	–2,42; 0,16
3–7 лет	–1,10	–1,63; –0,58*
0–2 года	–0,95	–1,42; –0,49*

* Различия статистически значимы (95 % ДИ не включает 0). Отрицательные значения соответствуют снижению ЭД на цифровых системах

значимости (95 % ДИ: от –2,42 до 0,16 мЗв), что не позволяет сделать однозначный вывод о снижении дозы в данной группе.

Основной вклад в это снижение внес ПЭТ-компонент: его доза уменьшилась во всех возрастных группах, причем наиболее выражено – у детей до 2 лет (снижение на 1,83 мЗв). Для КТ-компонента картина была неоднородной. Статистически значимое снижение дозы на 1,90 мЗв было достигнуто только в группе 13–17 лет. В группах 3–7 и 8–12 лет изменения были минимальными и незначимыми, а в группе 0–2 года было зафиксировано небольшое, но статистически значимое увеличение средней дозы от КТ-компонента на 0,88 мЗв. Следует отметить, что в группе 0–2 года мы наблюдали разнонаправленную динамику ПЭТ и КТ компонентов, одновременно наблюдалось значимое снижение дозы от ПЭТ компоненты (–1,83 мЗв) почти полностью нивелированное значимым ростом КТ (+0,88 мЗв). В итоге суммарная доза снизилась в этой группе на 0,95 мЗв.

Характер формирования ЭД пациентов в целом сохраняется при переходе на томографы нового поколения: снижение вклада ПЭТ-компонента с увеличением возраста, доминирование вклада КТ-компоненты у пациентов старшего возраста, высокий вклад контрастных исследований в формирование дозовой нагрузки.

Обсуждение

Роль ПЭТ/КТ, при ведении онкологических пациентов, постоянно растет и данный метод

Таблица 12

Отклонение ЭД полученных от исследований ПЭТ/КТ с цифровыми детекторами и без цифровых детекторов по возрастным группам по сравнению с [27]

Возраст	Δ ПЭТ, %	Δ КТ, %	Δ Суммарная, %
13–17 лет	–17,5 %*	–7,9 %*	–10,1 %*
8–12 лет	–16,6 %*	+0,2 %	–4,7 %
3–7 лет	–18,2 %*	+1,1 %	–6,7 %*
0–2 года	–21,3 %*	+14,6 %*	–6,5 %*

* Статистически значимые изменения

широко используется для стадирования, рестадирования, оценки ответа на терапию, планирования лучевой и радионуклидной терапии. Таким образом растет не только коллективная доза облучения, но и кумулятивные дозы у отдельных пациентов. При этом следует учитывать, что за счет применения таргетной терапии и других инновационных методов лечения пятилетняя выживаемость в данной группе пациентов за последние годы существенно возросла и по отдельным нозологиям достигла 95 %. В связи с этим лучевая нагрузка остается одним из важных факторов который следует учитывать при назначении данного исследования у детей. Принимая во внимание всю важность получаемой информации, для принятия клинических решений, основные усилия должны быть направлены на снижение дозы облучения пациентов к минимально возможному уровню, без потери диагностического качества, а не на отмену ПЭТ/КТ-исследования.

Проведенное нами исследование на большом клиническом материале (2793 ПЭТ/КТ-ис-

следования у 1899 пациентов) позволило впервые в отечественной практике количественно оценить влияние перехода на ПЭТ/КТ с цифровыми кремниевыми детекторами (SiPM) на эффективную дозу облучения детей с онкологическими заболеваниями. Главным результатом работы является демонстрация статистически значимого снижения суммарной ЭД за счет применения цифровых детекторов в трех из четырех возрастных групп: на 0,95 мЗв (0–2 года), 1,10 мЗв (3–7 лет) и 3,15 мЗв (13–17 лет).

Принципиально важно, что практически весь достигнутый выигрыш был обеспечен снижением дозы от ПЭТ-компонента (табл. 11), что закономерно объясняется более высокой чувствительностью и лучшим временным разрешением цифровой системы с детектором на основе SiPM-матриц в сравнении с аналоговой. Это позволило уменьшить вводимую активность ^{18}F -ФДГ без ущерба для качества изображений, как показано ранее [29].

Таким образом использование современных ПЭТ/КТ с цифровыми детекторами может помочь в снижении дозы облучения, в дополнение к персонализированному подходу к исследованиям. Переход к использованию ПЭТ/КТ с цифровыми детекторами стал одним из наиболее значимых достижений в области ПЭТ/КТ, что в сочетании с улучшением разрешения (благодаря технологии time-of-flight) привело к существенному улучшению отношения сигнал/шум [29]. Как результат, высокая чувствительность современных ПЭТ/КТ с цифровыми детекторами позволяет снизить вводимую активность РФЛП или сократить время сканирования без потери диагностического качества исследования, что делает исследование более комфортным для пациента [15–18, 21, 22]. Кроме того, использование цифровых ПЭТ/КТ-томографов способствует повышению выявляемости мелких патологических очагов, что имеет особое значение в педиатрической практике [23, 24, 29, 30].

Наиболее выраженное влияние на суммарную ЭД пациентов, как и ожидалось, оказывает наличие дополнительных серий КТ-сканирования с контрастом. Остальные рассмотренные факторы (положение рук, длина зоны сканирования) не показали устойчивого вклада в формирование ЭД пациентов. Анализ вклада компонентов ПЭТ/КТ в суммарную эффективную дозу показал, что с увеличением возраста пациентов наблюдается увеличение относительного вклада КТ-компонента при одновре-

менном снижении доли ПЭТ-компонента (табл. 4).

Полученные нами результаты согласуются с данными зарубежных исследований и демонстрируют возможность снижения лучевой нагрузки при использовании ПЭТ/КТ с цифровыми детекторами, однако прямое сравнение затруднено как из-за различий в используемых протоколах и методиках расчёта, так и отсутствия опубликованных данных у детей. При этом следует отметить, что большинство работ посвящены возможности снижения вводимой активности или сокращению времени исследования, а не прямой оценке ЭД [21, 29, 31]. Так, применение ПЭТ/КТ с цифровыми детекторами позволило снизить вводимую пациентам активность ^{18}F -ФДГ примерно на 36,4% относительно значений, предусмотренных международными рекомендациями (4,44–5,18 МБк/кг) [21]. В другом исследовании показано, что использование ПЭТ/КТ с цифровыми детекторами позволило существенно больше снизить вводимую активность РФЛП: с 350 МБк до 190 МБк (или на 45 %) [31]. Кроме того, уменьшение вводимой активности РФЛП снижает радиационную нагрузку на персонал при индивидуальной фасовке, введении РФЛП и сопровождении пациента. Так, снижение вводимой активности, при использовании ПЭТ/КТ с цифровыми детекторами позволило не только снизить лучевую нагрузку на пациента, но и дозовую нагрузку на персонал в пересчете на 1 пациента [21].

Систематические исследования лучевой нагрузки при ПЭТ/КТ у детей в РФ до недавнего времени отсутствовали, а имеющиеся работы были ограничены анализом отчётных форм, что затрудняет оценку данных как по глубине, так и по достоверности. Единственная работа, в которой была выполнена всесторонняя оценка ЭД от ПЭТ/КТ исследований, выполненных на аппаратах предыдущего поколения у детей [27], была опубликована нашим коллективом авторов. Для сопоставления и корректной оценки степени снижения ЭД при использовании ПЭТ/КТ с цифровыми детекторами в настоящем исследовании было выполнено сравнение полученных значений ЭД с ранее опубликованными данными у детей [27].

Достигнутое в нашем исследовании снижение ЭД от ПЭТ-компонента (от 16,5 % в группе 8–12 лет до 21,3 % в группе 0–2 года) оказалось несколько скромнее, чем сообщаемое в зарубежной литературе уменьшение вводи-

мой активности РФЛП на 30–45 % при аналогичном технологическом переходе [21, 31]. Данное различие может объясняться тем, что использованные ранее педиатрические протоколы Центра были исходно оптимизированы в направлении минимальных вводимых активностей еще на томографах предыдущего поколения [27], что оставляло меньше пространства для дальнейшего снижения. Кроме того, прямое сравнение с мировыми публикациями затруднено практически полным отсутствием работ по оценке именно эффективной дозы у детей на цифровых ПЭТ/КТ-системах: большинство исследований сфокусированы на взрослой популяции и оперируют показателями вводимой активности или времени сканирования, а не итоговой дозовой нагрузки [21, 29, 31]. В этом контексте полученные нами данные заполняют существенный пробел в литературе.

При этом уменьшение суммарной ЭД было менее выраженным, поскольку значительный вклад в общую лучевую нагрузку вносил КТ-компонент. Наиболее заметное снижение суммарной ЭД (на 11,1 %) отмечено у пациентов 13–17 лет – с 28,83 до 25,62 мЗв; в остальных возрастных группах различия были умеренными. Полученные результаты указывают, что использование ПЭТ/КТ с цифровыми детекторами позволяют снизить лучевую нагрузку, в основном за счет снижения вводимой активности РФЛП, однако для дальнейшего снижения суммарной ЭД необходимо направить научные усилия на оптимизацию параметров КТ-сканирования.

Описанная закономерность согласуется с результатами ряда исследований, демонстрирующих, что КТ-компонент вносит от 47 до 81 % суммарной ЭД при стандартном ПЭТ/КТ-исследовании [32]. В условиях, когда параметры КТ-протокола не пересматривались одновременно с переходом на цифровой ПЭТ, ожидаемое снижение суммарной ЭД оказывается ограниченным, при этом возможностей модуляции тока современных систем недостаточно для грамотной оптимизации протоколов КТ в педиатрии [33]. Вероятно дальнейшее внедрение технологий искусственного интеллекта в оптимизацию дозы при КТ позволят значимо снизить ЭД от данного компонента.

Если снижение дозы ПЭТ-компонента было ожидаемым и однозначным, то динамика КТ-компонента оказалась неоднородной и требует детального анализа. Статистически значимое снижение КТ-дозы было зафиксиро-

вано только в группе подростков 13–17 лет (на 1,90 мЗв). В группах 3–7 и 8–12 лет изменения были минимальными и не значимыми, а у детей 0–2 лет наблюдался небольшой, но достоверный рост средней дозы КТ на 0,88 мЗв (95 % ДИ: 0,50; 1,25). Поскольку протоколы КТ-сканирования при смене томографов в Центре целенаправленно не пересматривались, наиболее вероятным объяснением данного феномена являются различия в работе системы автоматической модуляции тока трубки на новом оборудовании в разных весовых категориях. Нельзя также исключить влияние изменившейся пропорции контрастных исследований в младшей группе. Какой бы ни была конкретная причина, данная находка имеет важное практическое следствие: замена томографа сама по себе не гарантирует автоматического снижения дозы. Для реализации всего потенциала новой системы необходима целенаправленная адаптация и оптимизация педиатрических КТ-протоколов в соответствии с современными международными рекомендациями [33]. Учитывая, что у детей старше 3 лет КТ-компонент формирует 63–77 % суммарной ЭД, оптимизация именно этого звена является наиболее перспективным направлением дальнейшего снижения лучевой нагрузки.

Отдельного комментария заслуживает неожиданное отсутствие значимого влияния длины зоны сканирования (протоколы “все тело” против “TORSO”) и положения рук пациента на суммарную ЭД. Интуитивно ожидалось, что сканирование всего тела и положение рук вдоль туловища будут ассоциированы с более высокой дозой, однако стратифицированный анализ не выявил устойчивых различий ни в одной возрастной группе. Мы предполагаем, что этот парадоксальный результат объясняется доминирующим и маскирующим вкладом КТ с внутривенным контрастированием. Как показано в табл. 9 и 10, наличие контрастной серии добавляло к суммарной дозе от 3,75 до 13,85 мЗв в зависимости от возраста. Эта добавка многократно превышает потенциальное снижение дозы от сокращения зоны сканирования на 20–30 см или от оптимизации положения рук, что делает эффект последних статистически неразличимым на фоне фактора контрастирования. Для вычленения независимого вклада этих параметров потребовался бы многофакторный анализ на выборке, что будет целью наших дальнейших исследований.

Отдельного обсуждения заслуживает структура суммарной ЭД. В зависимости от возраста пациента, массы тела, вводимой активности, анатомической зоны сканирования и параметров КТ-протокола вклад ПЭТ- и КТ-компонентов в общую дозовую нагрузку может варьировать. Так, в группе детей до 2 лет вклад ПЭТ-компонента на цифровых системах составил 50,8 % суммарной ЭД против 60,5 % на аналоговых, тогда как у подростков 13–17 лет – 23,1 % против 25,5 % соответственно. Таким образом, выигрыш от снижения вводимой активности наиболее значим именно у детей младшего возраста, тогда как у пациентов старшего возраста доминирует КТ-компонент, оптимизация которого остаётся приоритетной задачей для дальнейших исследований. Это подчёркивает необходимость раздельной оценки ЭД от каждого компонента, поскольку именно такой подход позволяет наиболее объективно определить источники потенциального снижения дозы и наметить направления дальнейшей оптимизации протоколов.

Сравнение с ранее полученными данными ЭД от аналоговых ПЭТ/КТ-томографов демонстрирует, что технологический переход к цифровым системам сопровождается количественно измеримыми преимуществами в отношении снижения лучевой нагрузки. При этом важно еще раз подчеркнуть, что сама по себе замена оборудования не гарантирует автоматического снижения ЭД. Реализация потенциала цифровых систем требует адаптации протоколов исследования, пересмотра вводимой активности, использования современных алгоритмов реконструкции и стандартизации параметров КТ в зависимости от возраста и клинической задачи. В перспективе представляется целесообразным проведение исследований с унифицированными протоколами, направленными на более точную количественную оценку вклада отдельных технических и организационных факторов в снижение ЭД. Особый интерес представляет определение минимально достаточных уровней вводимой активности и параметров КТ-сканирования, обеспечивающих сохранение необходимого диагностического качества исследования в различных возрастных группах.

Настоящее исследование имеет ряд ограничений, которые необходимо учитывать при интерпретации результатов. Во-первых, исследование имеет ретроспективный одноцентровый дизайн, что потенциально ограничивает

возможность экстраполяции полученных данных на другие медицинские учреждения, где могут использоваться иные ПЭТ/КТ-сканеры, параметры протоколов сканирования и подходы к расчету вводимой активности РФЛП. Во-вторых, несмотря на значительное общее число выполненных исследований, отдельные подгруппы пациентов, сформированные по сочетанию возрастных категорий и параметров протокола сканирования, содержали относительно небольшое число наблюдений. Это может ограничивать статистическую мощность анализа при сравнении отдельных подгрупп и требует осторожности при интерпретации соответствующих результатов. Кроме того, в рамках исследования выполнялось несколько попарных межгрупповых сравнений на основе анализа 95 % ДИ, что теоретически может повышать вероятность ошибок первого рода при интерпретации статистической значимости отдельных результатов. Однако полученные различия рассматривались преимущественно в контексте их клинической значимости.

Следует также отметить, что расчет ЭД в настоящем исследовании выполнялся с использованием табличных возрастных дозовых коэффициентов, приведённых в действующих МУ. Такой подход дает усредненную оценку лучевой нагрузки, поскольку не учитывает индивидуальные особенности пациента, различия в антропометрических параметрах и индивидуальную вариабельность распределения РФЛП и, что более важно, не дифференцированы для зоны “TORSO” и исследований с контрастным усилением. Вынужденное использование коэффициентов для зоны “все тело” для всех протоколов приводит к систематическому занижению вклада КТ-компонента, а следовательно, к консервативной оценке суммарной ЭД. Тем не менее, единообразие методики расчета на обеих сравниваемых выборках (цифровой и аналоговой) обеспечивает внутреннюю сопоставимость данных и не должно существенно влиять на выводы о направленности и относительной величине наблюдаемых изменений.

Несмотря на указанные ограничения, исследование включало значительное количество ПЭТ/КТ-исследований, выполненных по единым протоколам на томографах с одинаковыми техническими характеристиками, что обеспечило высокую однородность исходных данных. Использование стандартизированных методик расчета ЭД позволило обеспечить воспроизводимость и сопоставимость результатов с другими исследованиями в данной области.

Заключение

В настоящем исследовании впервые в отечественной практике выполнена количественная оценка ЭД, у детей с онкологическими заболеваниями, при проведении исследования ПЭТ/КТ с цифровыми детекторами и проведена сравнительная оценка эффективной дозы облучения при применении цифровых ПЭТ/КТ-систем (SiPM) и томографов предыдущего поколения в детской онкологии. Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение ПЭТ/КТ с цифровыми детекторами ассоциировано со снижением лучевой нагрузки по сравнению с томографами предыдущего поколения.

Снижение суммарной ЭД, обусловлено возможностью уменьшения вводимой активности РФЛП благодаря более высокой чувствительности цифровых детекторов, что в нашем случае привело к снижению ЭД на 6,5 %, 6,7 %, 4,7 %, и 10,1 % для групп пациентов 0–2, 3–7, 8–12 и 13–17 лет, соответственно. В группе 8–12 лет снижение на 4,7 % не достигло статистической значимости. Наибольшее практическое значение эти данные имеют в детской онкологии, где необходимость повторных исследований делает задачу минимизации лучевой нагрузки особенно актуальной. Однако с учетом того, что КТ-компонент играет большую роль при формировании значений суммарной ЭД дальнейшие научные поиски должны быть направлены на оптимизацию параметров КТ-сканирования, при сохранение диагностического качества исследования в различных возрастных группах.

Полученные данные свидетельствуют о том, что технологический переход к цифровым ПЭТ/КТ-системам является важным, но не единственным и не достаточным шагом в снижении лучевой нагрузки на педиатрических пациентов. Приоритетными направлениями дальнейшей работы должны стать: целенаправленная оптимизация педиатрических КТ-протоколов с использованием всех доступных инструментов снижения дозы (автоматическая модуляция тока, итеративные реконструкции, снижение пикового напряжения, использования машинного обучения и технологий искусственного интеллекта).

Список литературы

1. Аладин АС, Нуднов НВ, Аладин ПА. Оценка ПЭТ/КТ в России на основе данных сети “ПЭТ-Технолоджи” (2021–2024 гг.). Онкологический журнал: лучевая диагностика, лучевая терапия. 2026; 9 (2): 15–27. Aladin AS, Nudnov NV, Aladin PA. Assessment of PET/CT in Russia Based on Data from the “PET-Technology” Network (2021–2024). Journal of oncology: diagnostic radiology and radiotherapy. 2026; 9 (2): 15–27. (In Russ) <https://doi.org/10.37174/2587-7593-2026-9-2-15-27>.
2. Чипига ЛА, Ладанова ЕР, Водоватов АВ и др. Тенденции развития ядерной медицины в Российской Федерации за 2015–2020 гг. Радиационная гигиена. 2022; 15 (4): 122–33. Chipiga LA, Ladanova ER, Vodovатов AV, et al. Trends in the development of nuclear medicine in the Russian Federation for 2015–2020. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2022; 15 (4): 122–33. (In Russ) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-4-122-133>.
3. Рыжов СА, Водоватов АВ, Солдатов ИВ и др. Предложения по совершенствованию системы радиационной безопасности при медицинском облучении. Часть 1. Анализ информации, содержащейся в государственных отчетных формах и информационных базах данных, на примере города Москвы. Радиационная гигиена. 2022; 15 (3): 92–109. Ryzhov SA, Vodovатов AV, Soldatov IV, et al. Proposals for Improving the System of Radiation Safety in Medical Exposure. Part 1. Analysis of information contained in state reporting forms and information databases in Moscow. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2022; 15 (3): 92–109. (In Russ) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-3-92-109>.
4. Морозов СП, Владимирский АВ, Смоляручук МЯ и др. Динамика показателей работы ПЭТ/КТ-центров в Москве в рамках системы обязательного медицинского страхования. Медицинская физика. 2019; (4): 34–45. Morozov SP, Vladymyrskyy AV, Smolyarchuk MYa et al. Dynamics of Performance Indicators of PET/CT Facilities in Moscow (Russia) within the Compulsory Medical Insurance Program (According to the Data 2016–2018). Medical Physics. 2019; (4): 34–45. (In Russ).
5. Battisha A, Mann C, Raval R, Anandaram A, Patel B. Clinical Applications and Advancements of Positron Emission Tomography/Computed Tomography in Cardio-Oncology: A Comprehensive Literature Review and Emerging Perspectives. Curr Oncol Rep. 2024;

- 26 (11): 1442-51. <https://doi.org/10.1007/s11912-024-01598-3>.
6. Canadian Agency for Drugs and Technologies in Health. Positron Emission Tomography in Neurology and Cardiology: A Review of Guidelines and Recommendations. CADTH website. Published January 27, 2014. Accessed March 10, 2026.
7. Ebner R, Sheikh GT, Brendel M, Ricke J, Cyran CC. ESR Essentials: staging and restaging with FDG-PET/CT in oncology-practice recommendations by the European Society for Hybrid, Molecular and Translational Imaging. *Eur Radiol.* 2025; 35 (4): 1894-902. <https://doi.org/10.1007/s00330-024-11094-8>.
8. Nuclear medicine techniques in paediatric body oncology: present and future. *EJC Paediatr Oncol.* 2023; 2: 100120.
9. Дунайкин ММ, Киреева ЕД, Кайлаш Ч, Ликарь ЮН. ПЭТ/КТ в детской онкологии. *Педиатрия им. Г.Н. Сперанского.* 2023; 102 (3): 115-23.
Dunaykin MM, Kireeva ED, Kailash Ch, Likar YuN. Positron emission tomography-computed tomography in pediatric oncology. *Pediatr n.a. G.N. Speransky.* 2023; 102 (3): 115-23. (In Russ) <https://doi.org/10.24110/0031-403X-2023-102-3-115-123>.
10. Рекомендации по проведению и описанию исследований методом позитронно-эмиссионной томографии, совмещенной с компьютерной томографией, проводимых за счет средств Московского городского фонда обязательного медицинского страхования. 2-е изд., доп. Москва: Государственное бюджетное учреждение здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы»; 2021. 80 с.
Recommendations for the Conduct and Reporting of Positron Emission Tomography/Computed Tomography Studies Funded by the Moscow City Compulsory Medical Insurance Fund. 2nd ed., revised and expanded. Moscow: State Budgetary Healthcare Institution of the City of Moscow "Scientific and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow City Health Department"; 2021. 80 p. (In Russ).
11. Крылов АС, Наркевич БЯ, Рыжков АД. Актуальные проблемы ядерной медицины в педиатрии (обзор). *Радиация и риск.* 2021; 30 (4): 69-84.
- Krylov AS, Narkevich BY, Ryzhkov AD. Actual problems of nuclear medicine in pediatrics (review). *Radiat. Risk.* 2021; 30 (4): 69-84. (In Russ) <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2021-30-4-69-84>.
12. Granata C, Sofia C, Francavilla M, et al. Let's talk about radiation dose and radiation protection in children. *Pediatr Radiol.* 2025; 55 (3): 386-96. <https://doi.org/10.1007/s00247-024-06009-0>.
13. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation. International Atomic Energy Agency website. Published 2021. Accessed July 3, 2026.
14. Fahey FH, Goodkind AB, Plyku D, et al. Dose Estimation in Pediatric Nuclear Medicine. *Semin Nucl Med.* 2017; 47 (2): 118-25. <https://doi.org/10.1053/j.semnuclmed.2016.10.006>.
15. Nguyen NC, Vercher-Conejero JL, Sattar A, et al. Image Quality and Diagnostic Performance of a Digital PET Prototype in Patients with Oncologic Diseases: Initial Experience and Comparison with Analog PET. *J Nucl Med.* 2015; 56 (9): 1378-85. <https://doi.org/10.2967/jnumed.114.148338>.
16. Jaime M, Botkin C, Frye S, Muzaffar R, Osman M. Evaluation of digital PET imaging Vereos PET/CT. *Journal of Nuclear Medicine.* 2019; 60: 2059.
17. Sonni I, Baratto L, Park S, et al. Initial experience with a SiPM-based PET/CT scanner: influence of acquisition time on image quality. *EJNMMI Phys.* 2018; 5 (1): 9. Published 2018 Apr 18. <https://doi.org/10.1186/s40658-018-0207-x>.
18. Alberts I, Sachpekidis C, Prenosil G, et al. Digital PET/CT allows for shorter acquisition protocols or reduced radiopharmaceutical dose in [18F]-FDG PET/CT. *Ann Nucl Med.* 2021; 35 (4): 485-92. <https://doi.org/10.1007/s12149-021-01588-6>.
19. van Sluis J, de Jong J, Schaar J, et al. Performance Characteristics of the Digital Biograph Vision PET/CT System. *J Nucl Med.* 2019; 60 (7): 1031-6. <https://doi.org/10.2967/jnumed.118.215418>.
20. Surti S, Viswanath V, Daube-Witherspoon ME, Conti M, Casey ME, Karp JS. Benefit of Improved Performance with State-of-the Art Digital PET/CT for Lesion Detection in Oncology. *J Nucl Med.* 2020; 61 (11): 1684-90. <https://doi.org/10.2967/jnumed.120.242305>.

21. Silva DC, Freire A, Melo A et al. Addressing Operational Changes in Time and Radioactive Activity in a PET/CT Service with the Implementation of a Digital Scanner. *Braz. J. Radiat. Sci. Rio de Janeiro*, 2025. T. 13, № 2. C. 01–15. <https://doi.org/10.15392/2319-0612.2025.2796>.
22. Alves VPV, Brady S, Ata NA, et al. Simulated Reduced-Count Whole-Body FDG PET: Evaluation in Children and Young Adults Imaged on a Digital PET Scanner. *AJR Am J Roentgenol.* 2022; 219 (6): 952-61. <https://doi.org/10.2214/AJR.22.27894>.
23. Ptacek J, Karhan P, Hornak G, Quinn L. Direct comparison of PMT and SiPM PET systems using modified NEMA IEC Body phantom. *Phys Med.* 2025; 131: 104919. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2025.104919>.
24. Hsu DFC, Ilan E, Peterson WT, Uribe J, Lubberink M, Levin CS. Studies of a Next-Generation Silicon-Photomultiplier-Based Time-of-Flight PET/CT System. *J Nucl Med.* 2017; 58 (9): 1511-8. <https://doi.org/10.2967/jnumed.117.189514>.
25. Киселев КД, Рыжов СА, Глотова ИВ, Ликарь ЮН. Контроль качества ПЭТ/КТ-сканеров: опыт одного отделения ядерной медицины. *Медицинская физика.* 2026; 1: 70-80. Kiselev KD, Ryzhov SA, Glotova IV, Likar YuN. Quality Control of PET/CT Scanners: Experience of a Nuclear Medicine Department. *Medical Physics.* 2026; 1: 70-80. (In Russ) <https://doi.org/10.52775/1810-200X-2026-109-1-70-80>.
26. Киселев КД, Рыжов СА, Глотова ИВ, Ликарь ЮН. Современные подходы к контролю качества ПЭТ/КТ-сканеров: сравнение существующих международных методик и их возможная трансляция для использования в Российской Федерации. *Медицинская физика.* 2025; (4): 89-98. Kiselev KD, Ryzhov SA, Glotova IV, Likar YuN. Contemporary Approaches to Quality Control for PET/CT Systems: Comparison of International Methods and Their Possible Translation for Use in the Russian Federation. *Medical Physics.* 2025; (4): 89-98. (In Russ) <https://doi.org/10.52775/1810-200X-2025-108-4-89-98>.
27. Волженцев АА, Шермакова АА, Ядгаров МЯ и др. Оценка эффективной дозы при проведении ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ у детей с онкологическими заболеваниями. *Медицинская физика.* 2026; (2): 89–99. Volzhencev AA, Shermakova AA, Yadgarov MYa et al. Estimation of Effective Dose from ^{18}F -FDG PET/CT in Pediatric Oncology Patients. *Medical Physics.* 2026; (2): 89–99. (In Russ).
28. Глоссарий терминов, аббревиатур и понятий по медицинской радиологии и радиационной безопасности. – Москва : Издание АМФР, 2022. – 204 с. – ISBN 978-5-7262-2896-9. – EDN PRMIF.
29. Lopez-Mora DA, Carriy I, Flotats A. Digital PET vs Analog PET: Clinical Implications?. *Semin Nucl Med.* 2022; 52 (3): 302-11. <https://doi.org/10.1053/j.semnuclmed.2021.10.004>.
30. Adler S, Seidel J, Choyke P, et al. Minimum lesion detectability as a measure of PET system performance. *EJNMMI Phys.* 2017; 4 (1): 13. <https://doi.org/10.1186/s40658-017-0179-2>.
31. Loughman E, Maguire S, Hastings P, Banahan C. The impact of digital PET on radiation protection requirements in PET/CT facilities. *Phys Med.* 2024; 118 (Suppl 2):103222.
32. Yaseen A, Radzi Ya, Almohiy H, Kohli A, Rawashdeh M. Strategies to Improve CT Dose Optimization for Hybrid PET/CT Imaging . *Open J. Med. Imaging.* 2021; 11: 48-57. <https://doi.org/10.4236/ojmi.2021.112005>.
33. Parisi MT, Bermio MS, Alessio AM, Sharp SE, Gelfand MJ, Shulkin BL. Optimization of Pediatric PET/CT. *Semin Nucl Med.* 2017; 47 (3): 258-74. <https://doi.org/10.1053/j.semnuclmed.2017.01.002>.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках научной исследовательской работы "Разработка персонализированных методов радионуклидной диагностики и терапии у детей, а также радиологического контроля, в том числе с использованием технологий искусственного интеллекта" (регистрационный номер НИОКТР № 124021200036-9).

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов. **Поступила:** 07.07.2026. **Принята к публикации:** 09.09.2026.

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

Financing. The study was conducted within the framework of the research project "Development of personalized methods of radionuclide diagnostics and therapy in children, as well as radiological monitoring, including the use of artificial intelligence technologies" (state registration number 124021200036-9).

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Article received: 07.07.2026. **Accepted for publication:** 09.09.2026.