

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОЙ ДОЗЫ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПЭТ/КТ С ^{18}F -ФДГ У ДЕТЕЙ С ОНКОЛОГИЧЕСКИМИ ЗАБОЛЕВАНИЯМИ

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

¹ НМИЦ детской гематологии, онкологии и иммунологии им. 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

ESTIMATION OF EFFECTIVE DOSE FROM ^{18}F -FDG PET/CT IN PEDIATRIC ONCOLOGY PATIENTS

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

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

² N.I. Pirogov Russian National Research Medical University of the Ministry, 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

Введение: Позитронно-эмиссионная томография, совмещенная с компьютерной томографией (ПЭТ/КТ) с ^{18}F -ФДГ, является важным методом диагностики в детской онкологии. Однако радиационное воздействие, связанное с процедурой, требует особого внимания в педиатрической практике из-за высокой радиочувствительности биологических тканей. Согласно данным производителей медицинского оборудования, современные ПЭТ/КТ-сканеры и усовершенствованные алгоритмы реконструкции позволяют снизить лучевую нагрузку на пациента. Для оценки эффективности от внедрения современных цифровых технологий, позволяющих снижать дозы облучения при выполнении исследований на современных ПЭТ/КТ-сканерах с цифровыми кремниевыми детекторами (SiPM), необходимо понимание уровней лучевой нагрузки, получаемой при выполнении исследований на ПЭТ/КТ-сканерах предыдущего поколения.

Цель исследования: Ретроспективно количественно оценить эффективную дозу (ЭД) у детей с онкологическими заболеваниями при проведении ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ, а также отдельно оценить вклад ПЭТ- и КТ-компонентов у детей различных возрастных групп на аналоговых ПЭТ/КТ-томографах для определения базового уровня лучевой нагрузки.

Материал и методы: Проведено ретроспективное одноцентровое исследование 3478 ПЭТ/КТ-сканирований, выполненных в период с 2018 по 2023 гг. Все исследования выполнены на аппарате Discovery STE (General Electric Healthcare). Оценка ЭД проводилась согласно методическим указаниям МУ 2.6.1.3700-21 и

МУ 2.6.1.3584-19 с разделением пациентов на возрастные группы (0–2, 3–7, 8–12, 13–17 лет). Расчет ЭД от ПЭТ-компонента проводился на основе введенной активности и дозовых коэффициентов согласно МУ 2.6.1.3700-21. ЭД от КТ-компонента рассчитывалась на основе показателя DLP и коэффициентов МУ 2.6.1.3584-19.

Результаты: Среднее значение суммарной ЭД от ПЭТ/КТ в когорте исследования составило 24,33 мЗв, минимальное и максимальное значения составили 5,7 и 119,9 мЗв соответственно. Выявлено, что средняя ЭД при ПЭТ/КТ у детей варьировала от 14,6 до 31,1 мЗв в зависимости от возраста. Медианная ЭД от ПЭТ/КТ составила: 13,7 мЗв (0–2 года), 15,4 мЗв (3–7 лет), 20,4 мЗв (8–12 лет) и 28,8 мЗв (13–17 лет). Установлено, что с увеличением возраста пациентов наблюдается рост относительного вклада КТ-компонента (от 39,5 % до 74,5 %) при снижении доли ПЭТ-компонента (от 60,5 % до 25,5 %). ЭД от ПЭТ-компоненты варьировала от 6,72 [6,64; 6,80] мЗв (3–7 лет) до 8,60 [8,50; 8,71] мЗв (0–2 года), от КТ – от 6,05 [5,76; 6,34] мЗв (0–2 года) до 24,01 [23,42; 24,59] мЗв (13–17 лет), суммарная средняя ЭД – от 14,65 [14,30; 15,00] мЗв (0–2 года) до 31,14 [30,50; 31,78] мЗв (13–17 лет). Статистически значимое снижение суммарной ЭД зафиксировано при использовании протокола TORO по сравнению с протоколом “все тело” (для групп 3–7 и 8–12 лет). Проведение КТ с контрастным усилением ожидаемо приводило к увеличению лучевой нагрузки во всех возрастных группах при использовании протокола “все тело”, и в группах 3–7, 8–12 и 13–17 лет при использовании протокола TORO.

Заключение: Полученные нами данные как суммарной ЭД от ПЭТ/КТ, так и ЭД от ПЭТ и ЭД от КТ у детей разных возрастных групп могут рассматриваться как базовые референсные уровни и в дальнейшем позволят сравнить ЭД, получаемую как от выполнения исследований на современных цифровых ПЭТ/КТ-аппаратах с кремниевыми детекторами (SiPM), так и от модификации протоколов сканирования (особенно КТ-компонента).

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

Abstract

Introduction: ^{18}F -FDG PET/CT is an important diagnostic modality in pediatric oncology. However, the associated radiation exposure requires special consideration in pediatric practice due to the high radiosensitivity of children's biological tissues. As reported by equipment manufacturers, modern PET/CT scanners equipped with advanced reconstruction algorithms can reduce the patient radiation dose. To assess the benefit of implementing new digital technologies - specifically modern PET/CT scanners with digital silicon photomultipliers (SiPM) that enable dose reduction - it is essential to first establish baseline radiation dose levels from previous-generation PET/CT scanners.

Purpose: To retrospectively quantify the effective dose (ED) in pediatric patients with cancer undergoing ^{18}F -FDG PET/CT, and to separately assess the contribution of the PET and CT components across different age groups using analog PET/CT scanners to establish baseline radiation dose levels.

Materials and methods: A retrospective single-center study was conducted on 3,478 PET/CT scans performed between 2018 and 2023. All examinations were performed on a Discovery STE scanner (General Electric Healthcare). ED was assessed in accordance with Russian guidelines MU 2.6.1.3700-21 and MU 2.6.1.3584-19, with patients stratified into age groups (0–2, 3–7, 8–12, 13–17 years). The ED from the PET component was calculated based on the administered activity and dose conversion coefficients as per MU 2.6.1.3700-21. The ED from the CT component was calculated using the DLP and conversion coefficients from MU 2.6.1.3584-19.

Results: The mean total effective dose from PET/CT in the study cohort was 24.33 mSv, with a range of 5.7 mSv to 119.9 mSv. The mean ED for children varied from 14.6 to 31.1 mSv depending on age. The median total ED from PET/CT was: 13.7 mSv (0–2 years), 15.4 mSv (3–7 years), 20.4 mSv (8–12 years), and 28.8 mSv (13–17 years). An increase in the relative contribution of the CT component (from 39.5 % to 74.5 %) and a corresponding decrease in the PET component (from 60.5 % to 25.5 %) was observed with increasing patient age. The ED from the PET component ranged from 6.72 [6.64, 6.80] mSv (3–7 years) to 8.60 [8.50, 8.71] mSv (0–2 years). The ED from the CT component ranged from 6.05 [5.76, 6.34] mSv (0–2 years) to 24.01 [23.42, 24.59] mSv (13–17 years). The mean total ED ranged from 14.65 [14.30, 15.00] mSv (0–2 years) to 31.14 [30.50, 31.78] mSv (13–17 years). A statistically significant reduction in total ED was observed when using the TORO protocol compared to the whole-body protocol (for the 3–7 and 8–12 years age groups). As expected, the use of contrast-enhanced CT led to an increase in radiation exposure in all age groups with the whole-body protocol, and in the 3–7, 8–12, and 13–17 years age groups with the TORO protocol.

Conclusion: The total ED values for PET/CT, as well as the separate ED contributions from the PET and CT components across different pediatric age groups, can be considered baseline reference levels. These data will enable future comparisons with EDs resulting from examinations performed on modern digital PET/CT scanners with silicon photomultipliers (SiPM) and from modified scanning protocols, particularly for the CT component.

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

E-mail: yury.likar@dgoi.ru

<https://doi.org/10.52775/1810-200X-2026-110-2-77-88>

Введение

Распространенность онкологических заболеваний в детской популяции остается значимой медицинской проблемой [1, 2], требующей использования высокоточных диагностических технологий. К их числу относится позитронно-эмиссионная томография, совмещенная с компьютерной томографией (ПЭТ/КТ), эффективность которой при ведении пациентов с онкологическими заболеваниями подтверждена как у взрослых, так и у детей [3]. ПЭТ/КТ широко используется на различных этапах лечения: при инициальной диагностике (стадирование и рестадирование), при подозрении на рецидив, для оценки раннего ответа на терапию и оценки ответа на лечение, а также при планировании лучевой (ЛТ) и радионуклидной терапии (РНТ) [4, 5].

Безусловно, в отличие от моно-ПЭТ и КТ-исследований, гибридный метод ПЭТ/КТ позволяет улучшить специфичность и получить комплексную картину. Объединяя две принципиально важные характеристики – метаболическую активность опухолевых клеток (ПЭТ) и их анатомическую локализацию (КТ), – он способствует повышению точности диагностики [6]. Однако использование ПЭТ/КТ сопряжено с неизбежной лучевой нагрузкой как от ПЭТ-, так и КТ-компонента, что особенно важно для педиатрической практики. Это обусловлено более высокой радиочувствительностью биологических тканей у детей [7, 8] и необходимостью проведения повторных ПЭТ/КТ-исследований в течение периода лечения [9, 10]. Поэтому любые мероприятия, позволяющие снизить лучевую нагрузку без потери диагностического качества исследования, должны изучаться и внедряться в клиническую практику [8, 11, 12]. Для достижения такого результата необходимо учитывать все факторы, влияющие на лучевую нагрузку, включая индивидуальный расчет вводимой активности, выбор зоны сканирования (в режиме “все тело” или “короткий протокол” (TORSO)), параметры протокола КТ, необходимость внутривенного контрастирования, а также использование современных ПЭТ/КТ-сканеров и программного обеспечения [13].

Согласно данным производителей, современные ПЭТ/КТ-сканеры с цифровыми кремниевыми детекторами (SiPM) и усовершенствованными алгоритмами реконструкции позволяют снизить вводимую активность радиофар-

мацевтического лекарственного препарата (РФЛП), что несомненно приведет к снижению эффективной дозы (ЭД) от ПЭТ-компонента, а использование современных программ реконструкции позволит минимизировать рентгеновское облучение от КТ-компонента [14–17].

Однако для понимания того, насколько использование современных цифровых ПЭТ/КТ томографов позволит снизить лучевую нагрузку у детей, необходимо знать, какая ЭД регистрировалась ранее при использовании аппаратов без цифровых детекторов.

Целью настоящей работы стала ретроспективная оценка суммарной ЭД от ПЭТ/КТ-исследований, а также отдельная оценка ЭД от ПЭТ- и КТ-компонента у детей разных возрастных групп, страдающих онкологическими заболеваниями. Расчет ЭД проводился согласно методическим указаниям МУ 2.6.1.3700-21 и МУ 2.6.1.3584-19 соответственно.

Материал и методы

Проведено одноцентровое ретроспективное наблюдательное исследование по оценке ЭД при выполнении ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ у детей с различными онкологическими заболеваниями. Все исследования были выполнены в Национальном медицинском исследовательском центре детской гематологии, онкологии и иммунологии имени Дмитрия Рогачева Минздрава России (далее – Центр) в период с 2018 г. по 2023 г.

В настоящей работе мы придерживались терминологических подходов, изложенных в серии публикаций по стандартизации понятий в медицинской радиологии [18], и использовали понятие “эффективная доза” (ЭД) 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 младше 18 лет; (б) ПЭТ/КТ-исследования были выполнены в Центре на аппарате Discovery STE General Electric Healthcare US с фотоэлектронными умножителями (ФЭУ) (далее в тексте для простоты именуемый “аналоговым”); (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.

Исследование было проведено в соответствии со стандартами Хельсинкской декларации. Ввиду ретроспективного характера информированное согласие пациентов не требовалось.

За указанный период было выполнено 3479 ПЭТ/КТ-исследований, за время исследования изменений как в методику расчета вводимой активности, так и в протокол сканирования не вносилось.

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

Пациенты соблюдали стандартные правила подготовки к исследованию: голод 6 часов до введения ^{18}F -ФДГ, безуглеводная диета за 24–48 ч до исследования, покой и теплая одежда. Исследования выполняли приблизительно через 60 мин после внутривенного введения ^{18}F -ФДГ (через периферический или центральный катетер).

Протокол КТ-исследования выбирали в зависимости от массы тела пациента, во всех протоколах КТ была включена функция автоматической модуляции тока трубки (МА). Исходные КТ-изображения, полученные с толщиной среза 3,75 мм, реконструировали с толщиной среза 1,25 мм.

Протокол ПЭТ-исследования: использовались различные зоны сканирования – как в режиме “все тело”, так и режиме короткого протокола (TORSO) – зона сканирования от основания черепа до верхней трети бедер. Время сбора данных составляло 3 мин на 1 позицию стола (кровать). В зависимости от клинической ситуации использовалась укладка пациентов с руками вдоль тела или с поднятыми вверх руками; при необходимости дополнительно выполняли протокол КТ с внутривенным контра-

стированием в равновесной фазе. Полученные ПЭТ-изображения были реконструированы с использованием итеративного алгоритма (VUE Point, GE Healthcare, subsets 20, iterations 2) с коррекцией ослабления излучения по данным КТ.

Для каждого пациента собранные данные включали как информацию из протокола исследования (введенная активность, область сканирования – “все тело” или TORSO, положение рук, выполнение внутривенного контрастирования, значения total DLP), так и демографические данные пациента (пол, возраст, масса тела и рост).

Для расчета эффективной дозы от ПЭТ/КТ-исследования пациенты были распределены по возрастным группам в соответствии с действующими методическими указаниями МУ 2.6.1.3700-21 и МУ 2.6.1.3584-19 с целью использования верных возрастных дозовых коэффициентов (табл. 1).

Ввиду того что в методических рекомендациях отсутствуют дозовые коэффициенты для протокола TORSO и исследований с контрастным усилением, и 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 фантома 16 см не использовались ввиду того, что диаметр тела исследованных пациентов превышал указанное значение.

Пациенты были разделены на группы в соответствии с возрастными дозовыми коэффициентами МУ, анатомической зоной сканирования («все тело» или TORSO), положением рук и наличием КТ-протокола с контрастированием.

Важно отметить, что, так как ЭД для исследований, выполненных в период с 2018 по 2020 г,

Таблица 1

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*					
			Взрослые	13–17 лет	8–12 лет	3–7 лет	0–2 года	0–6 месяцев
ПЭТ с ^{18}F -ФДГ	МУ 2.6.1.3700-21	мЗв/МБк	0,019	0,024	0,037	0,056	0,095	–
КТ всего тела	МУ 2.6.1.3584-19	мЗв/(мГр·см)	0,017	0,020	0,027	0,031	0,038	0,043

* 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

первоначально рассчитывались с использованием коэффициентов, указанных в МУ 2.6.1.2944-11, нам пришлось пересчитать их в соответствии с МУ 2.6.1.3700-21 и МУ 2.6.1.3584-19 для обеспечения корректного сравнения.

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). Для оценки различий между группами рассчитывали разность средних значений и 95 % доверительный интервал для разности средних, вычисленный с использованием метода Уэлча для независимых выборок. Анализ проведен стратифицированно по возрастным группам (0–2, 3–7, 8–12 и 13–17 лет). Визуализация взаимосвязей между параметрами выполнена с использованием диаграмм рассеяния с линиями линейной регрессии, построенными методом наименьших квадратов отдельно для каждой возрастной группы; на графиках указывалось число исследований (N). Для дополнительной оценки распределения сочетаний ЭД ПЭТ- и КТ-компонентов использовали двумерную карту плотности (hexbin-визуализация). Зависимость вклада КТ-компонента в суммарную эффективную дозу от возраста пациента моделировали с использованием полиномиальной регрессии второго порядка (метод наименьших квадратов).

Для подгрупп, содержащих малое число наблюдений (3 и менее), расчет доверительных интервалов не проводился.

Результаты

В соответствии с критериями отбора, из 3479 ПЭТ/КТ-исследований, выполненных у 2013 пациентов в Центре за указанный период, в анализ было включено 3478 исследований (одно исследование исключено по причине отсутствия данных о введенной активности). Из них 285 пациентов были в возрасте 0–2 года, 489 пациентов – 3–7 лет, 469 пациентов – 8–12 лет, и 770 пациентов – 13–17 лет. Следует отметить, что суммарное число пациентов по возрастным группам превышает общее число включенных пациентов, поскольку у части пациентов выполнялось несколько ПЭТ/КТ-исследований в разные периоды наблюдения, и при повторных исследованиях они могли переходить в следующую возрастную группу.

В режиме “все тело” было проведено 2031 исследование, в 1845 исследованиях использовалось внутривенное контрастирование, а 823 исследования выполнены в положении “руки вверх”.

В табл. 2 представлены значения ЭД от ПЭТ- и КТ-компонентов, а также суммарная ЭД ПЭТ/КТ у пациентов различных возрастных групп.

Анализ вклада компонентов ПЭТ и КТ в суммарную ЭД показал, что с увеличением возраста пациентов растет относительный вклад

Таблица 2

Эффективная доза от ПЭТ- и КТ-компонент, а также суммарная эффективная доза при ПЭТ/КТ у детей различных возрастных групп

Возраст	N пациентов	N исследований	Медиана (Q1; Q3)	Среднее (95 % ДИ)
ЭД от ПЭТ, мЗв				
13–17 лет	817	1501	7,03 (6,05; 8,21)	7,13 (7,05; 7,21)
8–12 лет	504	822	6,73 (5,51; 8,18)	7,00 (6,87; 7,14)
3–7 лет	508	785	6,61 (5,94; 7,06)	6,72 (6,64; 6,80)
0–2 года	285	370	8,64 (7,81; 9,50)	8,60 (8,50; 8,71)
ЭД от КТ, мЗв				
13–17 лет	817	1501	21,39 (15,14; 33,18)	24,01 (23,42; 24,59)
8–12 лет	504	822	13,82 (9,24; 21,16)	16,84 (16,11; 17,57)
3–7 лет	508	785	8,77 (6,35; 12,00)	9,67 (9,32; 10,01)
0–2 года	285	370	5,28 (4,00; 7,51)	6,05 (5,76; 6,34)
Суммарная ЭД, мЗв				
13–17 лет	817	1501	28,83 (21,51; 40,55)	31,14 (30,50; 31,78)
8–12 лет	504	822	20,35 (15,08; 29,22)	23,84 (23,01; 24,67)
3–7 лет	508	785	15,41 (12,64; 18,90)	16,39 (16,00; 16,78)
0–2 года	285	370	13,66 (12,22; 16,85)	14,65 (14,30; 15,00)

Таблица 3

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

Возраст	N пациентов	N исследований	Вклад ПЭТ, %	Вклад КТ, %
13–17 лет	817	1501	25,46	74,54
8–12 лет	504	822	33,24	66,76
3–7 лет	508	785	43,84	56,16
0–2 года	285	370	60,54	39,46

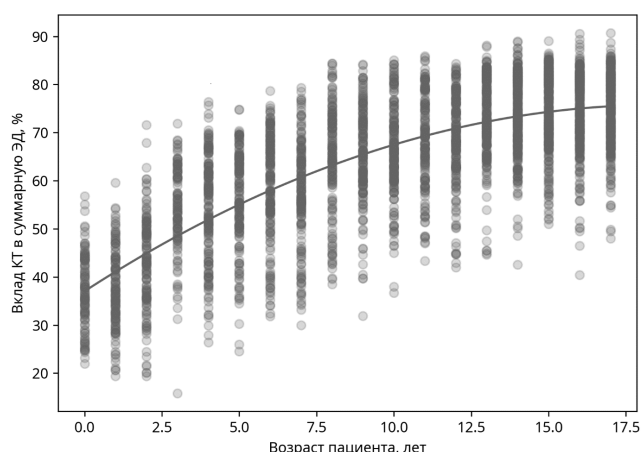


Рис. 1. Зависимость вклада КТ-компонента в суммарную эффективную дозу ПЭТ/КТ от возраста пациента. Линия тренда соответствует полиномиальной регрессии второго порядка (метод наименьших квадратов, $R^2=0,598$)

КТ-компонента при одновременном снижении доли ПЭТ-компонента (табл. 3, рис. 1).

Наибольший разброс значений ЭД от КТ наблюдался в группе подростков (13–17 лет), где межквартильный размах составил 15,14–33,18 мЗв. Вероятно, это отражает вариабельность антропометрических характеристик пациентов в данной возрастной группе, а также различия в протоколах сканирования (с/без контраста, зона сканирования) в данной клинически сложной группе.

Сравнение суммарной эффективной дозы в зависимости от анатомической зоны сканирования, и от применения контрастного усиления и положения рук пациента представлено в табл. 4–9. Среднее значение суммарной ЭД в общей когорте исследования составило 24,33 мЗв, минимальное и максимальное значения составили 5,7 и 119,9 мЗв соответственно.

Также была оценена зависимость эффективной дозы ПЭТ-компонента от массы тела у пациентов различных возрастных групп (рис. 2). Распределение сочетаний эффективных доз ПЭТ- и КТ-компонентов в общей когорте представлено на двумерной карте плотности (рис. 3).

Таблица 4

Сравнение суммарной ЭД при ПЭТ/КТ в режимах 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	466	900	30,82 (30,05; 31,60)	441	601	31,60 (30,51; 32,70)	0,78 (–0,57; 2,12)
8–12 лет	214	346	22,04 (20,74; 23,34)	336	476	25,15 (24,07; 26,22)	3,11 (1,43; 4,79)*
3–7 лет	123	199	13,35 (12,69; 14,01)	437	586	17,42 (16,97; 17,87)	4,07 (3,27; 4,86)*
0–2 года	2	2	10,52 (НП)	285	368	14,67 (14,32; 15,03)	4,16 (НП)

* Различия статистически значимы (95 % ДИ разницы средних не включает 0); НП – не применимо (малое число наблюдений).

Таблица 5

Сравнение суммарной ЭД при ПЭТ/КТ в режимах TORSO с контрастом и “все тело” с контрастом у детей различных возрастных групп

Возраст	Протокол TORSO с контрастом			Протокол “все тело” с контрастом			Разница средних, мЗв (95 % ДИ)
	N пациен-тов	N исследо-ваний	Среднее (95 % ДИ), мЗв	N пациен-тов	N исследо-ваний	Среднее (95 % ДИ), мЗв	
13–17 лет	321	593	35,47 (34,56; 36,38)	224	280	40,51 (39,00; 42,02)	5,04 (3,28; 6,81)*
8–12 лет	124	177	27,32 (25,28; 29,37)	166	215	31,24 (29,48; 32,99)	3,91 (1,23; 6,60)*
3–7 лет	54	75	16,40 (15,25; 17,54)	240	319	19,82 (19,17; 20,47)	3,42 (2,11; 4,74)*
0–2 года	0	0	НП	153	186	16,61 (16,11; 17,10)	НП

* Различия статистически значимы (95 % ДИ разницы средних не включает 0); НП – не применимо (малое число наблюдений).

Таблица 6

Сравнение суммарной ЭД при ПЭТ/КТ при положении “руки вверх” в режимах TORSO и “все тело” у детей различных возрастных групп

Возраст	Протокол TORSO “руки вверх”			Протокол “все тело”, “руки вверх”			Разница средних, мЗв (95 % ДИ)
	N пациен-тов	N исследо-ваний	Среднее (95 % ДИ), мЗв	N пациен-тов	N исследо-ваний	Среднее (95 % ДИ), мЗв	
13–17 лет	301	606	31,37 (30,39; 32,35)	9	9	40,51 (20,97; 60,06)	9,15 (–10,41; 28,70)
8–12 лет	112	175	23,26 (21,24; 25,28)	2	2	НП	НП
3–7 лет	22	31	16,49 (13,87; 19,12)	0	0	НП	НП
0–2 года	0	0	НП	0	0	НП	НП

* Различия статистически значимы (95% ДИ разницы средних не включает 0); НП – не применимо (малое число наблюдений).

Таблица 7

Сравнение суммарной ЭД при ПЭТ/КТ при положении “руки вверх” и контрастном усилении в режимах TORSO и “все тело” у детей различных возрастных групп

Возраст	Протокол TORSO «руки вверх» с контрастом			Протокол “все тело”, “руки вверх” с контрастом			Разница средних, мЗв (95 % ДИ)
	N пациен-тов	N исследо-ваний	Среднее (95 % ДИ), мЗв	N пациен-тов	N исследо-ваний	Среднее (95 % ДИ), мЗв	
13–17 лет	228	435	35,46 (34,38; 36,54)	4	4	63,80 (33,06; 94,53)	28,34 (–2,34; 59,01)
8–12 лет	75	112	27,80 (25,12; 30,49)	0	0	НП	НП
3–7 лет	14	19	17,73 (14,50; 20,97)	0	0	НП	НП
0–2 года	0	0	НП	0	0	НП	НП

* Различия статистически значимы (95 % ДИ разницы средних не включает 0); НП – не применимо (малое число наблюдений).

Таблица 8

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

Возраст	Протокол “все тело” без контраста			Протокол “все тело” с контрастом			Разница средних, мЗв (95 % ДИ)
	N пациен-тов	N исследо-ваний	Среднее (95 % ДИ), мЗв	N пациен-тов	N исследо-ваний	Среднее (95 % ДИ), мЗв	
13–17 лет	241	321	23,83 (22,86; 24,79)	224	280	40,51 (39,00; 42,02)	16,68 (14,89; 18,47)*
8–12 лет	188	261	20,13 (19,15; 21,11)	166	215	31,24 (29,48; 32,99)	11,11 (9,10; 13,11)*
3–7 лет	216	267	14,55 (14,17; 14,93)	240	319	19,82 (19,17; 20,47)	5,27 (4,52; 6,03)*
0–2 года	143	182	12,70 (12,39; 13,00)	153	186	16,61 (16,11; 17,10)	3,91 (3,33; 4,49)*

* Различия статистически значимы (95 % ДИ разницы средних не включает 0); НП – не применимо (малое число наблюдений).

Таблица 9

Сравнение суммарной ЭД при ПЭТ/КТ в режимах TORSO с контрастом и TORSO без контраста у детей различных возрастных групп

Возраст	Протокол TORSO с контрастом			Протокол TORSO без контраста			Разница средних, мЗв (95 % ДИ)
	N пациен-тов	N исследо-ваний	Среднее (95 % ДИ), мЗв	N пациен-тов	N исследо-ваний	Среднее (95 % ДИ), мЗв	
13–17 лет	321	593	35,47 (34,56; 36,38)	188	307	21,85 (21,10; 22,60)	13,62 (12,44; 14,80)*
8–12 лет	124	177	27,32 (25,28; 29,37)	108	169	16,50 (15,42; 17,59)	10,82 (8,51; 13,13)*
3–7 лет	54	75	16,40 (15,25; 17,54)	76	124	11,51 (10,90; 12,12)	4,89 (3,60; 6,18)*
0–2 года	0	0	НП	2	2	10,52 (НП)	НП

* Различия статистически значимы (95 % ДИ разницы средних не включает 0); НП – не применимо (малое число наблюдений).

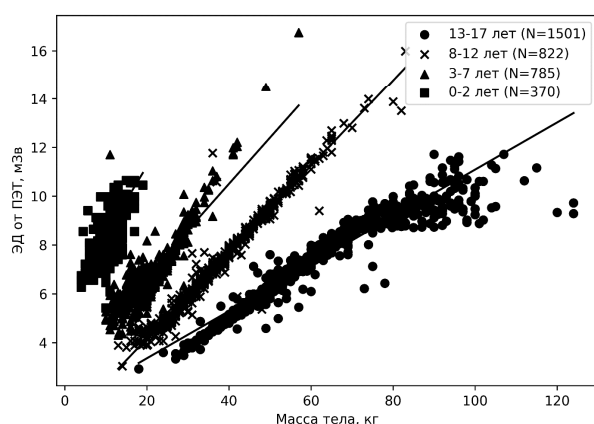


Рис. 2. Зависимость эффективной дозы ПЭТ-компонента от массы тела у педиатрических пациентов различных возрастных групп. Линии тренда соответствуют линейной регрессии, рассчитанной методом наименьших квадратов (13–17 лет: $R^2=0,92$; 8–12 лет: $R^2=0,97$; 3–7 лет: $R^2=0,77$; 0–2 года: $R^2=0,56$)

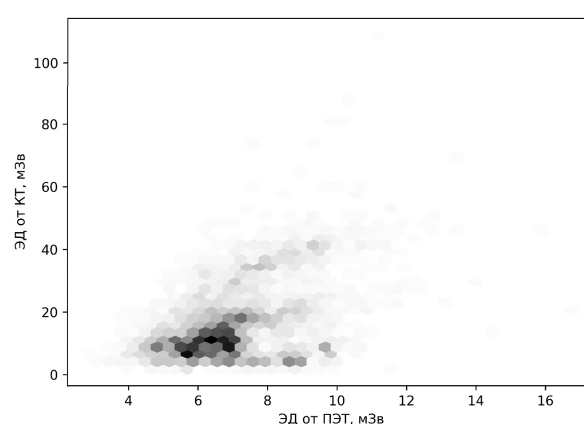


Рис. 3. Двумерная карта плотности распределения сочетаний эффективных доз ПЭТ- и КТ-компонентов при ПЭТ/КТ у педиатрических пациентов. Оттенок ячеек отражает число наблюдений в соответствующем диапазоне значений: более темные ячейки соответствуют большей плотности данных

Обсуждение

ПЭТ/КТ играет важную диагностическую и прогностическую роль у пациентов с различными онкологическими заболеваниями и широко используется как у взрослых, так и у детей на различных этапах их ведения: стадирование, рестадирование, оценка ответа на лечение и другие. Современные тенденции указывают на то, что клиническое значение данного метода будет только возрастать [3, 4]. К сожалению, использование ПЭТ/КТ сопряжено с неизбежной лучевой нагрузкой, что является одним из недостатков метода и темой для постоянных дискуссий, особенно при выполнении исследований у детей.

Для возможности последующего сравнения и корректной оценки снижения ЭД при использовании современных ПЭТ/КТ-аппаратов необходимы опорные значения ЭД от исследований, выполненных на ПЭТ/КТ-томографах предыдущего поколения. В настоящей работе выполнена ретроспективная оценка как суммарной ЭД от ПЭТ/КТ-исследования, так и раздельная оценка ЭД от ПЭТ- и КТ-компонента у детей разных возрастных групп с онкологическими заболеваниями.

Исследование включало 2013 пациентов, которым было выполнено 3478 ПЭТ/КТ исследований, или 1,7 исследований на пациента. Анализ вклада компонентов ПЭТ/КТ в суммарную ЭД показал, что с увеличением возраста пациентов относительный вклад КТ-компонента растет, а доля ПЭТ-компонента снижается (табл. 2, 3, рис. 1). Как и ожидалось, с учетом системного характера распространения большинства детских опухолей, 2038 (58,6 %) исследований было проведено в режиме “все тело”. При сравнении суммарной ЭД в режиме протокола TORSO и “все тело” статистически значимые различия получены для возрастных групп 3–7 лет и 8–12 лет (табл. 4). Сравнение суммарной ЭД в режиме протокол TORSO с контрастом и “все тело” с контрастом показало существенное увеличение ЭД, при этом статистически значимые различия были получены для всех возрастных групп пациентов (табл. 5), за исключением группы 0–2 года, так как в этой группе протокол TORSO не выполнялся. Сравнение суммарной ЭД в режиме “все тело” с контрастом и “все тело” без контраста показало статистически значимые различия для всех возрастных групп (табл. 8). Также статистически значимая разница получена для групп 3–7,

8–12 и 13–17 лет при сравнении суммарной ЭД в режиме протокол TORSO с контрастом и протокол TORSO без контраста (табл. 9). Показана зависимость ЭД от ПЭТ-компонента от массы тела, а также взаимосвязь ЭД КТ- и ПЭТ-компонентов у пациентов различных возрастных групп.

Полученные нами результаты согласуются с данными зарубежных исследований [19–21], однако прямое сравнение затруднено из-за различий в используемых протоколах и методиках расчёта. В нашей работе впервые представлены столь подробные данные для российской популяции детей. Следует признать, что 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 [22, 23]. Однако в последнее время наметилась тенденция к системному изучению данного вопроса, в том числе в аспектах контроля качества оборудования и оптимизации протоколов сканирования [24]. Системный характер большинства детских онкологических заболеваний объясняет, почему большинство протоколов ПЭТ/КТ-исследований выполняются в режиме “все тело”. Однако постоянные исследования в этой области позволяют вносить изменения в область сканирования, как это произошло у детей с лимфомой Ходжкина [25]. При этом основной задачей на текущем этапе обеспечения радиационной безопасности в педиатрической практике остается контроль качества оборудования, а также стандартизация протоколов сканирования. Это касается как расчета вводимой активности, так и параметров компьютерной томографии при гибридной визуализации. Данная задача также будет включена в число будущих научных исследований нашей рабочей группы [26].

Полученные данные показали, что ЭД при ПЭТ/КТ-исследованиях ниже при использовании протокола TORSO по сравнению с протоколом “все тело”. Однако необходимо помнить, что излишнее и необоснованное сокращение зоны сканирования у детей может привести к пропуску как отдаленных метастазов, так и первичного очага, что полностью нивелирует диагностическую ценность выполненного ПЭТ/КТ-исследования. Выявленное увеличение лучевой нагрузки от КТ-компонента с возрастом пациентов подчеркивает необходи-

мость оптимизации КТ-протоколов, особенно для подростковой группы 13–17 лет

Кроме того, наши данные подтверждают, что выполнение дополнительного протокола КТ с контрастным усилением достоверно увеличивает суммарную ЭД. С другой стороны, контрастирование повышает диагностическую ценность исследования, главным образом за счет увеличения специфичности, поэтому важно помнить, что стремление снизить лучевую нагрузку не должно влиять на информативность исследования.

Выполнение исследования с укладкой рук за головой пациента также позволяет избежать поглощения излучения мягкими тканями конечностей, снизить количество артефактов от конечностей в области грудной клетки, брюшной полости, таза и способствует правильному расчету силы тока на данные области исследования при использовании протокола КТ с автоматической модуляцией тока трубки, что в итоге приводит к снижению лучевой нагрузки. Следует помнить, что выполнение такого протокола укладки у детей возможно не всегда. Это связано с возрастными особенностями (возрастает риск двигательных артефактов), трудностями при проведении анестезиологической иммобилизации, а также с системным характером многих детских опухолей, требующим расширения зоны сканирования.

Результаты нашей работы еще раз подтвердили, что ключом к безопасному проведению ПЭТ/КТ у детей является максимально индивидуальный подход к каждому исследованию, который включает в себя точный расчет активности вводимого РФЛП, обоснованный выбор зоны сканирования и взвешенное решение о проведении дополнительного протокола КТ с введением контрастного препарата.

Полученные в нашем исследовании значения эффективных доз могут служить основой для перехода к персонализированной оценке радиационных рисков, методологические подходы к которой уже разрабатываются [27]. На основе полученных данных можно установить референсные диагностические уровни (РДУ) для различных возрастных групп в отдельном медицинском центре, что станет практическим итогом работы.

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 парных межгрупповых сравнений на основе анализа 95 % ДИ, что теоретически может повысить 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.

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

Заключение

Полученные в ходе работы значения суммарной ЭД от ПЭТ/КТ, а также отдельно ЭД от ПЭТ и КТ-компонентов у детей разных возрастных групп могут рассматриваться как базовые опорные значения. В дальнейшем это позволит сравнить ЭД, получаемую при исследованиях на современных цифровых ПЭТ/КТ-аппаратах

с SiPM, и оценить влияние оптимизации протоколов сканирования, особенно КТ-компонента.

Среднее значение суммарной ЭД от ПЭТ/КТ в общей когорте исследования составило 24,3 мЗв, и варьировались в диапазоне от 5,7 до 119,9 мЗв. Столь широкий диапазон подчеркивает необходимость дальнейшей оптимизации и подтверждает актуальность поиска способов снижения лучевой нагрузки без потери диагностического качества. Анализ вклада компонентов ПЭТ/КТ в суммарную эффективную дозу показал, что с увеличением возраста пациентов наблюдается увеличение относительного вклада КТ-компонента при одновременном снижении доли ПЭТ-компонента. Результаты нашего исследования показали преобладание вклада КТ-компонента в суммарную ЭД у подростков, что подтверждает необходимость оптимизации КТ-протоколов. Дальнейшие научные поиски должны быть направлены на возможные изменения параметров протоколов КТ-сканирования с целью снижения ЭД у всех групп пациентов, но особенно актуальным это является для группы 13–17 лет.

Отдельно необходимо подчеркнуть, что стремление к снижению радиационного риска не должно препятствовать основной цели исследования – получению важной диагностической и прогностической информации для правильного ведения онкологического пациента, что возможно только при получении ПЭТ/КТ-изображений хорошего качества.

Список литературы

1. Аксенова ИА, Попова НВ, Старинский ВВ, Ходакова ОВ, Сохибов СУ, Шахзадова АО, Кучерявый АА. Анализ эпидемиологии злокачественных новообразований среди детского населения в Российской Федерации. Вопросы онкологии. 2025; 71 (1): 54-71. <https://doi.org/10.37469/0507-3758-2025-71-1-OF-2169>.
Aksenova AA, Popova NV, Starinsky VV, Khodakova OV, Sokhibov SU, Shakhzadova AO, Kucheryavy AA. Analysis of the epidemiology of malignant neoplasms among children in the Russian Federation. Voprosy Onkologii = Problems in Oncology. 2025; 71 (1): 54-71. (In Russ). <https://doi.org/10.37469/0507-3758-2025-71-1-OF-2169>.
2. Волкова АР, Вахитов ХМ, Кумирова ЭВ. Детские злокачественные новообразования и их учет: мировые и отечественные тенденции. Российский журнал детской гематологии и онкологии (РЖДГО). 2020; 7 (3): 64-9. <https://doi.org/10.21682/2311-1267-2020-7-3-64-69>.
Volkova AR, Vakhitov KhM, Kumirova EV. Children's malignancies and their accounting: global and domestic trends. Russian Journal of Pediatric Hematology and Oncology. 2020; 7 (3): 64-9. (In Russ) <https://doi.org/10.21682/2311-1267-2020-7-3-64-69>.
3. 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. European radiology, 2025; 35 (4): 1894-902. <https://doi.org/10.1007/s00330-024-11094-8>.
4. Meshaka R, Biassoni L, Chambers G, Voss S, Orr K. Nuclear medicine techniques in paediatric body oncology: present and future. EJC Paediatr Oncol. 2023; 2: 100120. <https://doi.org/10.1016/j.ejcped.2023.100120>.
5. Дунайкин ММ, Киреева ЕД, Чаурасия К, Ликарь ЮН. ПЭТ/КТ в детской онкологии. Педиатрия им. Г.Н. Сперанского. 2023; 102 (3): 115-23. <https://doi.org/10.24110/0031-403X-2023-102-3-115-123>.
Dunaykin MM, Kireeva ED, Chaurasiya K, Likar YuN. Positron emission tomography-computed tomography in pediatric oncology. Pediatria n.a. G.N. Speransky. 2023; 102 (3): 115-23. (In Russ) <https://doi.org/10.24110/0031-403X-2023-102-3-115-123>.
6. Kluetz PG, Meltzer CC, Villemagne VL, Kinahan PE, Chander S, Martinelli MA, Townsend DW. Combined PET/CT Imaging in Oncology. Impact on Patient Management. Clinical positron imaging : official journal of the Institute for Clinical P.E.T, 2000; 3 (6): 223-30. [https://doi.org/10.1016/s1095-0397\(01\)00055-3](https://doi.org/10.1016/s1095-0397(01)00055-3).
7. Крылов АС, Наркевич БЯ, Рыжков АД. Актуальные проблемы ядерной медицины в педиатрии (обзор). Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2021; 30 (4): 69-84. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2021-30-4-69-84>. – EDN QWRQTU.
Krylov AS, Narkevich BYa, Ryzhkov AD. Aktualnye problemy yadernoy meditsiny v pediatrii (obzor) [Current problems of nuclear medicine

- in pediatrics (review)]. Radiatsiya i Risk (Bulletin of the National Radiation and Epidemiological Registry). 2021; 30 (4): 69-84. (In Russ). <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2021-30-4-69-84>.
8. Granata C, Sofia C, Francavilla M, Kardos M, Kasznia-Brown J, Nievelstein RA, Olteanu BS, Owens C, Salerno S, Sorantin E, Apine I. Let's talk about radiation dose and radiation protection in children. Pediatric radiology, 2025; 55 (3): 386-96. <https://doi.org/10.1007/s00247-024-06009-0>.
9. Хасанова КА, Тюрин ИЕ, Рыжов СА, Кизжаев ЕВ. Снижение дозовой нагрузки при проведении компьютерной томографии у детей. Мед. радиология и радиационная безопасность. 2019; 64 (1): 38-44. https://doi.org/10.12737/article_5c55fb466d7532.24221014. Khasanova KA, Tyurin IE, Ryzhov SA, Kizhayev EV. Radiation Dose Reduction in Pediatric Computed Tomography. Medical Radiology and Radiation Safety. 2019; 64 (1): 38-44. (In Russ). https://doi.org/10.12737/article_5c55fb466d7532.24221014.
10. Nardo L, Schmall JP, Werner TJ, Malogolowkin M, Badawi RD, Alavi A. Potential Roles of Total-Body PET/Computed Tomography in Pediatric Imaging. PET clinics, 2020; 15 (3): 271-9. <https://doi.org/10.1016/j.cpet.2020.03.009>.
11. Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation | IAEA [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iaea.org/publications/11102/radiation-protection-and-safety-in-medical-uses-of-ionizing-radiation> (дата обращения: 10.03.2026).
12. Fahey FH, Goodkind AB, Plyku D, Khamwan K, O'Reilly SE, Cao X, Frey EC, Li Y, Bolch WE, Sgouros G, Treves ST. Dose Estimation in Pediatric Nuclear Medicine. Seminars in nuclear medicine, 2017; 47 (2): 118-25. <https://doi.org/10.1053/j.semnuclmed.2016.10.006>.
13. Крылов АС, Наркевич БЯ, Рыжков АД. Методологические основы ядерной медицины в педиатрии. Онкологический журнал: лучевая диагностика, лучевая терапия. 2022; 5 (1): 18-36. <https://doi.org/10.37174/2587-7593-2022-5-1-18-36>. – EDN AIIHXE. Krylov AS, Narkevich BYa, Ryzhkov AD. Methodological Basis of Nuclear Medicine in Pediatric. Journal of oncology: diagnostic radiology and radiotherapy. 2022; 5 (1): 18-36. (In Russ) <https://doi.org/10.37174/2587-7593-2022-5-1-18-36>.
14. Singh MK. (2024). A review of digital PET-CT technology: Comparing performance parameters in SiPM integrated digital PET-CT systems. Radiography (London, England : 1995), 30 (1): 13-20. <https://doi.org/10.1016/j.radi.2023.10.004>.
15. Zhao YM, Li YH, Chen T, Zhang WG, Wang LH, Feng J, Li C, Zhang X, Fan W, Hu YY. Image quality and lesion detectability in low-dose pediatric 18F-FDG scans using total-body PET/CT. European journal of nuclear medicine and molecular imaging, 2021; 48 (11): 3378-85. <https://doi.org/10.1007/s00259-021-05304-4>.
16. Alberts I, Sachpekidis C, Prenosil G, Viscione M, Bohn KP, Mingels C, Shi K, Ashar-Oromieh A, Rominger A. Digital PET/CT allows for shorter acquisition protocols or reduced radiopharmaceutical dose in [18F]-FDG PET/CT. Annals of nuclear medicine, 2021; 35 (4): 485-92. <https://doi.org/10.1007/s12149-021-01588-6>.
17. Raman SP, Johnson PT, Deshmukh S, Mahesh M, Grant KL, Fishman EK. CT dose reduction applications: available tools on the latest generation of CT scanners. Journal of the American College of Radiology : JACR, 2013; 10 (1): 37-41. <https://doi.org/10.1016/j.jacr.2012.06.025>.
18. Наркевич БЯ, Ратнер ТГ, Рыжов СА, Моисеев АН. Трудности в интерпретации радиологических терминов. Онкологический журнал: лучевая диагностика, лучевая терапия. 2022; 5 (3): 78-101. <https://doi.org/10.37174/2587-7593-2022-5-3-78-101> – EDN QPWFWB. Narkevich BYa, Ratner TG, Ryzhov SA, Moiseev AN. Difficulties in the Interpretation of Radiological Terms. Journal of oncology: diagnostic radiology and radiotherapy. 2022; 5 (3): 78-101. (In Russ) <https://doi.org/10.37174/2587-7593-2022-5-3-78-101>.
19. Grant FD, Gelfand MJ, Drubach LA, Treves ST, Fahey FH. Radiation doses for pediatric nuclear medicine studies: comparing the North American consensus guidelines and the pediatric dosage card of the European Association of Nuclear Medicine. Pediatric radiology, 2015; 45 (5): 706-13. <https://doi.org/10.1007/s00247-014-3211-x>.
20. Kim YY, Shin HJ, Kim MJ, Lee MJ. Comparison of effective radiation doses from X-ray, CT, and PET/CT in pediatric patients with neuroblastoma using a dose monitoring program. Diag-

- nostic and interventional radiology (Ankara, Turkey), 2016; 22 (4), 390-4. <https://doi.org/10.5152/dir.2015.15221>.
21. Poli GL, Torres L, Coca M, Veselinovic M, Lassmann M, Delis H, Fahey F. Paediatric nuclear medicine practice: an international survey by the IAEA. *European journal of nuclear medicine and molecular imaging*, 2020; 47 (6), 1552-63. <https://doi.org/10.1007/s00259-019-04624-w>.
 22. Водоватов АВ, Чипига ЛА, Дружинина ПС, Шацкий ИГ, Петрякова АВ, Сарычева СС, Библин АМ, Ахматдинов РР, Ахматдинов РР, Капырина ЮН, Братилова АА, Солдатов ИВ, Лантух ЗА, Пузырев ВГ, Рыжов СА. Актуализация формы федерального государственного статистического наблюдения № 3-ДОЗ "Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенорадиологических исследований": часть 2 (рекомендации по заполнению формы) // *Digital Diagnostics*. 2023; 4 (3): 322-39. <https://doi.org/10.17816/DD530656>. – EDN XLHQWW.
Vodovатов AV, Chipiga LA, Druzhinina PS, Shatskiy IG, Petryakova AV, Sarycheva SS, Biblin AM, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Kapyrina YuN, Bratilova AA, Soldatov IV, Lantukh ZA, Puzyrev VG, Ryzhov SA. Update of the federal governmental statistical surveillance form № 3-DOZ: "Data on patient doses from medical X-ray examinations"—Part 2 (FORM completion Recommendations). *Digital Diagnostics*. 2023; 4 (3): 322-39. <https://doi.org/10.17816/DD530656>.
 23. Zvonova I, Chipiga L, Balonov M, Ermolina E. Nuclear medicine examinations of children in Russia. *Radiation protection dosimetry*, 2015; 165 (1-4): 216-9. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncv101>.
 24. Рыжов СА, Киселев КД, Плотова 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. <https://doi.org/10.52775/1810-200X-2025-108-4-89-98>. – EDN JNHRVS.
 25. Ликарь ЮН, Киреева ЕД, Кайлаш А, Ядгаров МЯ, Кузяев ДД, Мякова НВ. Сравнение различных режимов сканирования ПЭТ/КТ с 18F-ФДГ у детей с лимфомой Ходжкина. *Педиатрия им. Г.Н. Сперанского*. 2021; 100 (3): 28-34.
Likar YuN, Kireeva ED, Kailash A, Yadgarov MYa, Kuzyaev DD, Myakova NV. Comparison of various 18F FDG PET/CT acquisition protocols in children with Hodgkin's lymphoma. *Pediatric n.a. G.N. Speransky*. 2021; 100 (3): 28-34. (In Russ).
 26. Magill D, Alavi A. Radiation Safety Concerns Related to PET/Computed Tomography Imaging for Assessing Pediatric Diseases and Disorders. *PET clinics*, 2020; 15 (3), 293-8. <https://doi.org/10.1016/j.cpet.2020.03.012>.
 27. Шатёнок МП, Рыжов СА, Лантух ЗА, Дружинина ЮВ, Толкачев КВ. Возможности программного обеспечения для мониторинга дозовой нагрузки пациентов в лучевой диагностике. *Digital Diagnostics*. 2022; 3 (3): 212-30. <https://doi.org/10.17816/DD106083>.
Shatenok MP, Ryzhov SA, Lantukh ZA, Druzhinina YuV, Tolkachev KV. Patient dose monitoring software in radiology. *Digital Diagnostics*. 2022; 3 (3): 212-30. <https://doi.org/10.17816/DD106083>.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 16.03.2026. Принята к публикации: 17.06.2026.

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

Financing. The study had no sponsorship.

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

Article received: 16.03.2026. Accepted for publication: 17.06.2026.