

ПЭТ/КТ С ¹⁸F-МЕТАФТОРБЕНЗИЛГУАНИДИНОМ (¹⁸F-МФБГ) ПРИ НЕЙРОБЛАСТОМЕ. ПЕРВЫЙ ОПЫТ В РОССИИ: СРАВНЕНИЕ С ДАННЫМИ СЦИНТИГРАФИИ С ¹²³I-МЕТАЙОДБЕНЗИЛГУАНИДИНОМ (¹²³I-МИБГ)

Оджарова А.А., Крылов А.С.✉, Тулин П.Е., Рубанская М.В., Невзоров Д.И., Нестерова Н.И.

Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н.Н. Блохина Минздрава России; Россия, 115478 Москва, Каширское шоссе, 24

✉ Крылов Александр Сергеевич, krilovas@rambler.ru, +79037211777

РЕФЕРАТ

Нейробластома является самой частой экстракраниальной солидной опухолью детского возраста. В 7 из 10 случаев нейробластома на момент постановки диагноза уже проявляется диссеминированным процессом. Из современных методов ядерной медицины в оценке нейробластомы наиболее важную роль играет сцинтиграфия с метайодбензилгуанидином — аналогом норадреналина, меченным ¹²³I (¹²³I-МИБГ). В настоящее время появился новый РФЛП ¹⁸F-МФБГ (меченый ¹⁸F аналог бензилгуанидина), который может использоваться в радионуклидной диагностике нейробластом. Наши клинические наблюдения показали идентичную данным сцинтиграфии с ¹²³I-МИБГ диагностическую эффективность со значительно более быстрым клиренсом крови, чем ¹²³I-МИБГ, что позволяет проводить исследования уже через 1 ч после внутривенного введения. В одном случае при ПЭТ/КТ с ¹⁸F-МФБГ были выявлены дополнительные опухолевые очаги, что позволило корректировать терапию, что, безусловно, имеет большое значение в клинической практике.

Ключевые слова: нейробластома, онкопедиатрия, ПЭТ/КТ, ОФЭКТ/КТ, ¹⁸F-метафторбензилгуанидин, ¹²³I-метайодбензилгуанидин

Для цитирования: Оджарова А.А., Крылов А.С., Тулин П.Е., Рубанская М.В., Невзоров Д.И., Нестерова Н.И. ПЭТ/КТ с ¹⁸F-метафторбензилгуанидином (¹⁸F-МФБГ) при нейробластоме. Первый опыт в России: сравнение с данными сцинтиграфии с ¹²³I-метайодбензилгуанидином (¹²³I-МИБГ). Онкологический журнал: лучевая диагностика, лучевая терапия. 2025;8(1):44-50. <https://doi.org/10.37174/2587-7593-2025-8-1-44-50>

Journal of Oncology: Diagnostic Radiology and Radiotherapy

ISSN: 2587-7593 (Print) ISSN: 2713-167X (Online)

ЯДЕРНАЯ МЕДИЦИНА | NUCLEAR MEDICINE

<https://doi.org/10.37174/2587-7593-2025-8-1-44-50>

¹⁸F-METAFLUOROBENZYLGUANIDINE (¹⁸F-MFBG) PET/CT IN NEUROBLASTOMA. THE FIRST EXPERIENCE IN RUSSIA: COMPARISON WITH ¹²³I-METAIODOBENZYLGUANIDINE (¹²³I-MIBG) SCINTIGRAPHY

Akgul A. Odzharova, Alexander S. Krylov✉, Pavel E. Tulin, Marina V. Rubanskaya, Denis I. Nevzorov, Natalia I. Nesterova

N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology; 24 Kashirskoye Shosse, Moscow, Russia 115478.

✉ Alexander S. Krylov, krilovas@rambler.ru, +79037211777

ABSTRACT

Neuroblastoma is the most frequent extracranial solid tumor of childhood. In 7 out of 10 cases, neuroblastoma is already disseminated at the time of diagnosis. Of the current nuclear medicine techniques, scintigraphy with methaiodobenzylguanidine, which is a ¹²³I-labeled noradrenaline analog or (¹²³I-MIBG), plays the most important role in the evaluation of neuroblastoma. Currently, a new PET-tracer, ¹⁸F-MFBG (¹⁸F-labeled benzylguanidine analog), has emerged that can be used in the radionuclide diagnosis of neuroblastomas. Our clinical observations showed identical diagnostic efficiency to scintigraphy data with ¹²³I-MIBG with significantly faster blood clearance than ¹²³I-MIBG, which allows us to perform studies as early as 1 h after intravenous administration. In one case PET/CT with ¹⁸F-MIBG revealed additional tumor foci, which allowed to correct therapy, which is certainly of great importance in clinical practice.

Key words: neuroblastoma, pediatric oncology, PET/CT, SPECT/CT, ¹⁸F-metafluorobenzylguanidine, ¹²³I-metaiodobenzylguanidine

For citation: Odzharova A.A., Krylov A.S., Tulin P.E., Rubanskaya M.V., Nevzorov D.I., Nesterova N.I. ¹⁸F-metafluorobenzylguanidine (¹⁸F-MFBG) PET/CT in Neuroblastoma. The First experience In Russia: Comparison with ¹²³I-metaiodobenzylguanidine (¹²³I-MIBG) Scintigraphy. Journal of Oncology: Diagnostic Radiology and Radiotherapy. 2025;8(1):44-50. (In Russ.). <https://doi.org/10.37174/2587-7593-2025-8-1-44-50>

Из современных методов ядерной медицины в оценке нейробластомы (от момента установления первоначального диагноза и определения стадии до оценки ответной реакции на лечение и выявления рецидивов) наиболее важную роль играет сцинтиграфия с ¹²³I-метайодбензилгуанидином (¹²³I-МИБГ). Бензилгуанидин имеет структурное сходство с норадреналином и проникает в клет-

ку посредством трансмембранного переносчика норадреналина. ¹²³I-МИБГ — это радиофармацевтический лекарственный препарат (РФЛП), представляющий собой бензилгуанидин, меченный в мета-положении радиоактивным изотопом йода ¹²³I. Используется для специфической визуализации катехоламиносекретирующих опухолей (феохромочитома, параганглиома, нейробластома) [1].

По данным различных авторов, чувствительность и специфичность сцинтиграфии с ¹²³I-МИБГ варьируют, но превышают 92 и 94 % соответственно [2]. Существующие недостатки сцинтиграфии с ¹²³I-МИБГ в виде ложноположительных или ложноотрицательных результатов обусловлены, в основном, фармакологическим влиянием различных препаратов, уникальным биологическим поведением новообразования (способность к трансформации в доброкачественные опухоли), наличием костных метастазов. Также необходимо учитывать, что примерно у 10 % пациентов результаты сцинтиграфии с ¹²³I-МИБГ могут быть ложноотрицательными — так называемые МИБГ-негативные нейробластомы [3].

В ряде исследований показана роль ПЭТ/КТ с ¹⁸F-ФДГ (фтордезоксиглюкоза) при нейробластомах для стадирования, оценки ответа на терапию, выявления рецидива заболевания и при динамическом наблюдении. При первичной диагностике нейробластомы 1-ой и 2-ой стадий диагностическая эффективность ПЭТ/КТ с ¹⁸F-ФДГ не уступает таковой при сцинтиграфии с ¹²³I-МИБГ [4]. ПЭТ/КТ с ¹⁸F-ФДГ обязательно проводят при 4-ой стадии нейробластомы, хотя РФЛП проигрывает в диагностике поражения костного мозга вследствие низкой специфичности.

По данным ряда исследований показано, что уровень накопления ¹⁸F-ФДГ в первичных и метастатических очагах при нейробластоме на момент постановки диагноза имеет прогностическое значение, поскольку опосредованно может отображать так называемую дедифференциацию клеток. В ряде работ, посвященных изучению возможностей ПЭТ/КТ с ¹⁸F-ФДГ при нейробластомах, делается акцент на то, что метод следует использовать в качестве дополнительного, а не заменяющего сцинтиграфию с ¹²³I-МИБГ (за исключением МИБГ-негативных опухолей) [5]. Основное ограничение сцинтиграфии с ¹²³I-МИБГ, как известно, связано как с относительно низким пространственным разрешением метода по сравнению с ПЭТ, так и с низкой доступностью РФЛП.

Следует отметить, что для диагностики нейробластомы также применяют позитрон-излучающий РФЛП на основе МИБГ — ¹²⁴I-МИБГ. Возможным ограничением в оценке нейробластом у детей по ПЭТ/КТ с ¹²⁴I-МИБГ является относительно более высокая доза облучения (0,25 мЗв/МБк) по сравнению с ¹²³I-МИБГ (0,019 мЗв/МБк) и высокая стоимость препарата. При планировании радионуклидной терапии при нейробластомах с использованием ¹³¹I-МИБГ обязательно проводят сцинтиграфию с ¹²³I-МИБГ («тераностическая пара» — радионуклидная диагностика ¹²³I и радионуклидная терапия ¹³¹I) для определения сохраняющейся способности клеток нейробластомы концентрировать МИБГ. С этой точки зрения, ПЭТ/КТ с ¹²⁴I-МИБГ, помимо оценки активности опухолевого процесса и

распространенности заболевания, представляет собой потенциальный метод оценки дозы облучения как опухолевых очагов, так и непораженных тканей до лечения ¹³¹I-МИБГ. Обеспечение более точной количественной оценки распределения РФЛП обусловлено характеристиками изотопа, таких как период полураспада ¹²⁴I в 4,2 сут (γ ¹³¹I — 8,02 сут). Это позволяет выполнять исследования в динамике в течение 3–4 сут и проводить дозиметрию патологических очагов, оценивая динамику уровня накопления РФЛП, для последующей радионуклидной МИБГ-терапии [6, 7].

Как известно, клетки нейробластомы способны секретировать гормоны (такие как норадреналин и несколько его предшественников, а также некоторые рецепторы соматостатина). Для ПЭТ/КТ можно использовать и ряд других РФЛП на основе синтетических аналогов нейроаминов и рецепторных лигандов, которые широко используются в функциональном отображении процессов при нейроэндокринных опухолях у взрослых. К примеру, секреция дигидроксифенилаланина позволяет успешно использовать такой РФЛП, как ¹⁸F-ДОФА (¹⁸F-L-дигидроксифенилаланин). На сегодняшний день уже проведен ряд исследований по применению ПЭТ с ¹⁸F-ДОФА у детей с нейробластомами, которые демонстрируют более высокие показатели диагностической точности по сравнению с данными сцинтиграфии с ¹²³I-МИБГ, особенно при опухолях малых (менее 1,5 см) размеров [8–10].

Касательно применения других РФЛП для исследования статуса рецепторов соматостатина ⁶⁸Ga-ДОТА-конъюгатов (ТАТЕ, ТОС, НОС), надо отметить, что у детей возможности этого РФЛП еще полностью не оценены. Исследования представлены единичными работами на малых группах больных [11–14].

Все эти препараты рекомендованы в европейских клинических рекомендациях для диагностики нейробластомы в качестве альтернативных РФЛП [15, 16].

Особый интерес вызывают работы по изучению диагностических возможностей ПЭТ/КТ при нейробластоме, меченных ¹⁸F, в частности ¹⁸F-МФБГ (метафторбензилгуанидин) [17, 18]. При исследованиях *in vitro* и на животных, ¹⁸F-МФБГ (меченый ¹⁸F аналог МИБГ) показал идентичную данным сцинтиграфии с ¹²³I-МИБГ диагностическую эффективность со значительно более быстрым клиренсом крови, чем ¹²³I-МИБГ. Это позволяет проводить исследования уже через 1–2 ч после внутривенного введения (сцинтиграфия с ¹²³I-МИБГ проводится через 24 часа после в/в введения). Также при ПЭТ-исследованиях с ¹⁸F-МФБГ не требуется дополнительной блокировки ткани щитовидной железы. Проведенные исследования у детей при нейробластоме показали, что применение ¹⁸F-МФБГ является

безопасным, имеет сходное с ^{123}I -МИБГ биораспределение препарата и высокую диагностическую точность определения опухолевых очагов. Также немаловажна возможность количественно измерять активность в опухолевых очагах и оценивать эффективность стандартного лечения при динамическом исследовании. В проспективном пилотном исследовании изучалась эффективность ^{18}F -МФБГ для визуализации нейроblastомы путем проведения 20 парных исследований с ^{123}I -МИБГ и ^{18}F -МФБГ у 14 пациентов. Никаких побочных реакций не было выявлено. Благодаря более короткому времени сканирования ^{18}F -МФБГ по сравнению со стандартной ^{123}I -МИБГ, была отмечена меньшая продолжительность седации при проведении процедуры — 2/20 против 10/20 соответственно. При применении ^{18}F -МФБГ было выявлено одинаковое или большее количество поражений мягких тканей в 95 % пар исследований, и одинаковое или большее количество скелетных поражений в 85 % пар исследований. В среднем, при использовании ^{18}F -МФБГ определяли два дополнительных участка поражения мягких тканей и на 6 баллов больше по шкале SIOPEL на одного пациента [19].

В настоящее время за рубежом решается вопрос о возможности внесения ПЭТ с ^{18}F -МФБГ в клинические рекомендации диагностики и лечения нейроblastом. Изучаются вопросы использования ^{18}F -МФБГ в качестве тераностической пары перед терапией ^{131}I -МИБГ [20].

Цель исследования — представить клинические наблюдения результатов сравнения сцинтиграфии (с дополнительным проведением ОФЭКТ/КТ зоны интереса) с ^{123}I -МИБГ и ПЭТ/КТ с ^{18}F -МФБГ, выполненных с интервалом в 48–72 ч. Исследования выполнены в отделениях радионуклидной диагностики №1 и №2 отдела радионуклидной диагностики и терапии НИИ клинической и экспериментальной радиологии «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России. Исследования с ^{123}I -МИБГ проводили через 24 ч после внутривенного введения РФЛП активностью 4 МБк/кг в режиме сцинтиграфии всего тела, с дополнительным проведением ОФЭКТ/КТ (КТ в низкодозном режиме). В качестве подготовки накануне проводилась блокировка щитовидной железы.

Через 48 ч выполняли ПЭТ/КТ с ^{18}F -МФБГ. Исследования проводили через 60 мин после в/в введения РФЛП активностью 3 МБк/кг без специальной подготовки (КТ в низкодозном режиме).

Клинический случай № 1

Мальчик 4-х лет. Нейроblastома забрюшинного пространства слева с распространением в позвоночный канал, левую длинную мышцу груди и мягкие ткани спины. 3 ст. по INSS. Состояние по-

сле хирургического лечения — частичное удаление забрюшинной опухоли слева с пластикой аорты. Динамическое наблюдение.

На сцинтиграммах в режиме всего тела и реконструированных томосцинтиграммах ОФЭКТ/КТ определяется патологическое накопление ^{123}I -МИБГ паравертебрально слева на уровне Th11–L4 и в интраканальном компоненте на уровне Th12–L2 с расширением просвета позвоночного канала. В других отделах очагов патологического накопления ^{123}I -МИБГ не было.

По данным ПЭТ/КТ получены аналогичные данные — определяется патологическое накопление ^{18}F -МФБГ в опухолевом образовании паравертебрально слева на уровне Th11–L4 с интраканальным компонентом на уровне Th12–L2. Другие очаги патологического накопления ^{18}F -МФБГ в исследованных отделах не определяются.

Резюмируя данные обоих исследований результаты ПЭТ/КТ с ^{18}F -МФБГ идентичны данным сцинтиграфии с ^{123}I -МИБГ — по уровню, характеру накопления РФЛП и распространенности процесса (рис. 1).

Ребенок оставлен под динамическим наблюдением.

Клинический случай № 2

Девочка 4-х лет. Диагноз: Нейроblastома забрюшинного пространства, 4 стадия по INSS, стадия М по INRGSS (метастатическое поражение костей скелета (позвонок Th12, средняя треть диафиза левой бедренной кости), мезентериальных и забрюшинных лимфатических узлов). Амплификация гена N-тус отрицательная, делеция 11q23 отрицательная. Лапароскопическая биопсия опухоли забрюшинного пространства. Противоопухолевая полихимиотерапия по протоколу NB 2004 г. Аферез ПСК. Иммунотерапия анти-GD2 моноклональными антителами. Смешанный ответ. На этом этапе проведены исследования — ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ (27.11.2023), сцинтиграфия с ^{123}I -МИБГ (18.01.2024) и ПЭТ/КТ с ^{18}F -МФБГ (19.01.2024). С учетом результатов ПЭТ/КТ с ^{18}F -МФБГ было принято продолжить терапию с проведением высокодозной химиотерапии (ВДХТ) с ауто-ТГСК, лучевой терапии на метастазах в позвонке Th12.

Оценка эффективности лечения проводилась по результатам ПЭТ/КТ с ^{18}F -МФБГ (через 4 мес). Первым этапом была выполнена ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ, результаты которой показали интенсивное и неравномерное накопление РФЛП во всем объеме первичной опухоли. В других отделах патологической аккумуляции препарата не выявлено. При исследовании с ^{123}I -МИБГ на сцинтиграммах в режиме всего тела и реконструированных томосцинтиграммах ОФЭКТ/КТ определяется патологическое накопле-

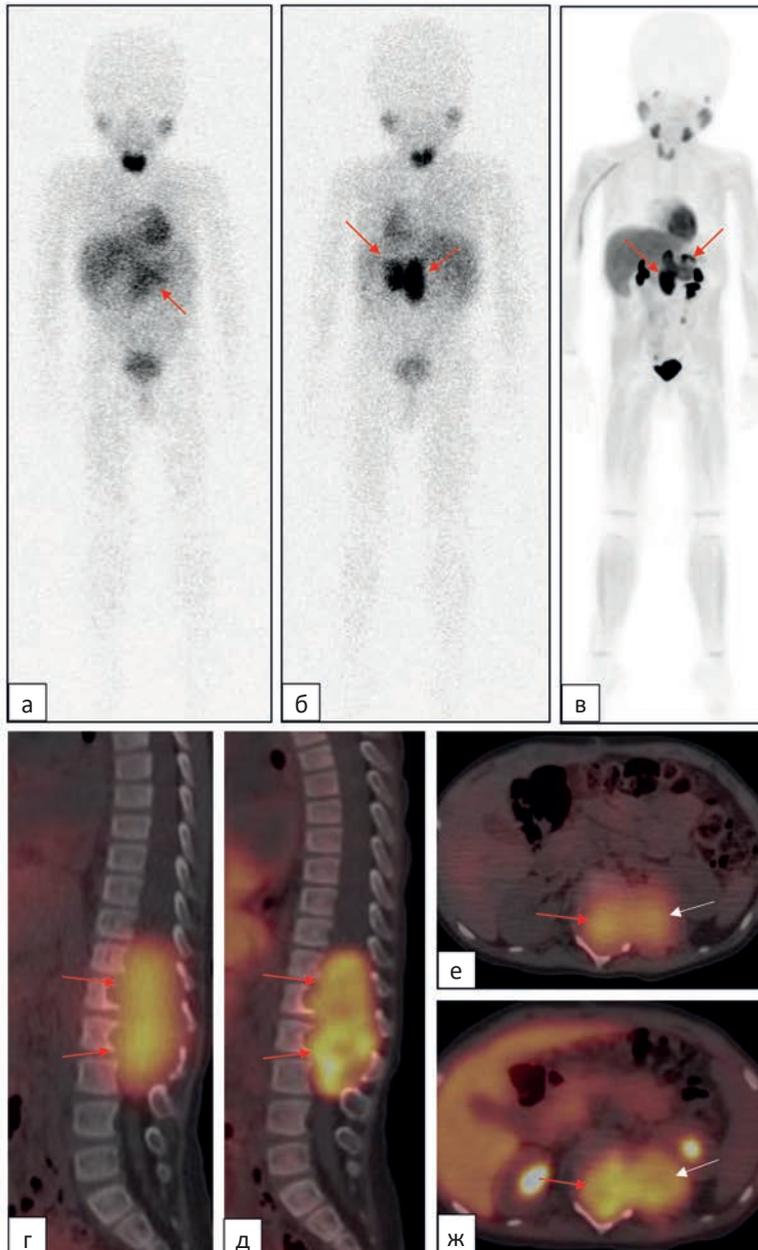


Рис. 1. Нейробластома забрюшинного пространства слева с распространением в расширенный позвоночный канал (остаточная опухоль).
а, б — сцинтиграммы в режиме всего тела в передней и задней проекциях с ¹²³I-МИБГ (красные стрелки — опухолевые очаги);
в — MIP (проекция максимальной интенсивности) ПЭТ с ¹⁸F-МФБГ (красные стрелки — опухолевые очаги);
г — совмещенный сагиттальный срез ОФЭКТ/КТ с ¹²³I-МИБГ (красные стрелки — интраканальный компонент опухоли);
д — совмещенный сагиттальный срез ПЭТ/КТ с ¹⁸F-МФБГ (красные стрелки — интраканальный компонент опухоли);
е — совмещенный аксиальный срез ОФЭКТ/КТ с ¹²³I-МИБГ (красная стрелка — интраканальный компонент опухоли, белая стрелка — остаточная паравертебральная опухоль);
ж — совмещенный аксиальный срез ПЭТ/КТ с ¹⁸F-МФБГ (красная стрелка — интраканальный компонент опухоли, белая стрелка — остаточная паравертебральная опухоль)

Fig. 1. Left retroperitoneal neuroblastoma with extension into the dilated spinal canal (residual tumor).
а, б — scintigrams in the whole body mode in the anterior and posterior projections with ¹²³I-MIBG (red arrows — tumor foci);
в — MIP (maximum intensity projections) PET with ¹⁸F-MIBG (red arrows — tumor foci);
г — fusion sagittal slice of SPECT/CT with ¹²³I-MIBG (red arrows — intracanal component of the tumor);
д — fusion sagittal slice of PET/CT with ¹⁸F-MIBG (red arrows — intracanal component of the tumor);
е — fusion axial slice of SPECT/CT with ¹²³I-MIBG (red arrow — intracanal component of the tumor, white arrow — residual paravertebral tumor);
ж — fusion axial slice of PET/CT with ¹⁸F-MIBG (red arrow — intracanal component of the tumor, white arrow — residual paravertebral tumor)

ние РФЛП в опухолевом образовании забрюшинного пространства. Накопление РФЛП в его структуре носит низкоинтенсивный и фрагментарный характер, местами убедительно не определяется. В других отделах очагов патологического накопления ¹²³I-МИБГ не было выявлено.

По данным ПЭТ/КТ с ¹⁸F-МФБГ получены аналогичные данные в забрюшинной опухоли — накопление РФЛП неравномерное, с наличием ¹⁸F-МФБГ-негативных участков. Дополнительно выявлены два патологических очага гипераккумуляции ¹⁸F-МФБГ в теле позвонка Th12 (по КТ — бластический очаг) и в участке уплотнения костномозгового канала средней трети диафиза левой бедренной кости. В других отделах очагов патологического накопления РФЛП не выявлено (рис. 2). По результатам обследования с тремя диагности-

ческими РФЛП можно выдвинуть предположение о наличии гетерогенности опухоли, которое объясняется относительно более высоким накоплением неспецифического препарата ¹⁸F-ФДГ и более низким, фрагментарным — МИБГ. Более скромные результаты сцинтиграфии с ¹²³I-МИБГ по сравнению с ¹⁸F-МФБГ дополнительно обусловлены относительно низким пространственным разрешением метода.

С учетом результатов ПЭТ/КТ с ¹⁸F-МФБГ было принято решение продолжить терапию с проведением ВДХТ с ауто-ТГСК, лучевой терапии на метастаз в позвонке Th12.

Резюмируя данные обоих исследований, по данным ПЭТ/КТ с ¹⁸F-МФБГ в известных метастазах в указанных костях сохраняется опухолевая активность после проведения программного лечения.

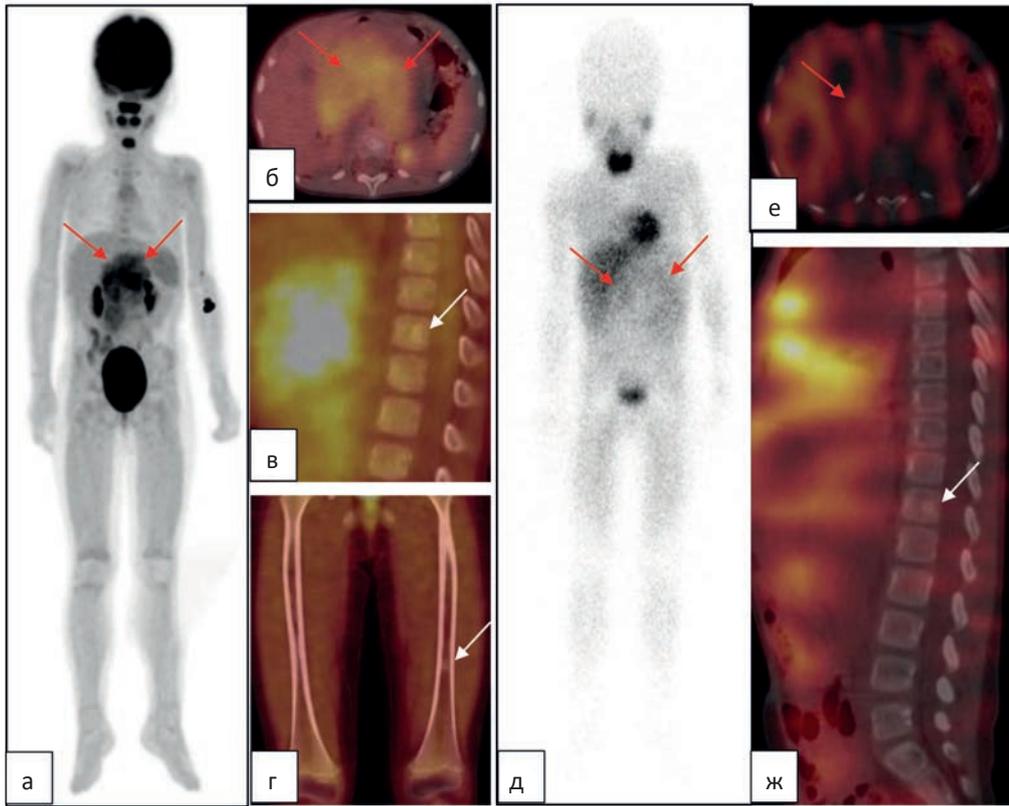
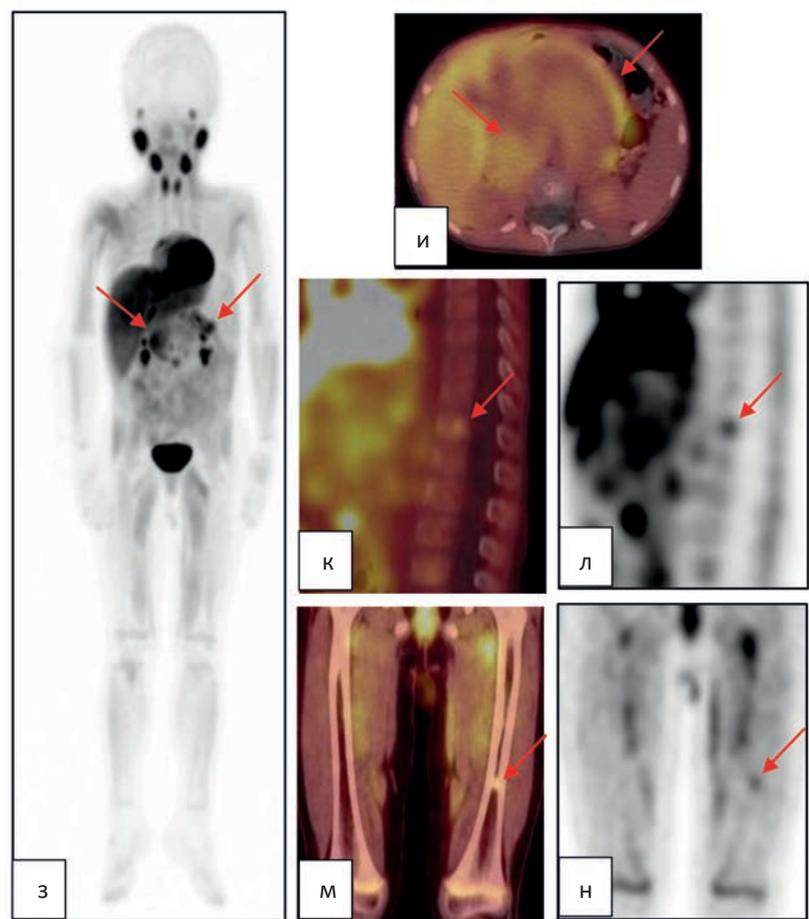


Рис. 2. Нейробластома забрюшинного пространства, 4-ая стадия по INSS, стадия М по INRGSS (метастатическое поражение костей скелета (позвонок Th12, средняя треть диафиза левой бедренной кости), мезентериальных и забрюшинных лимфатических узлов). Состояние после специального лечения, контрольное обследование. ПЭТ/КТ с ¹⁸F-ФДГ (а-г), сцинтиграфия с ¹²³I-МИБГ (д-ж), ПЭТ/КТ с ¹⁸F-МФБГ (з-н): а — МIP (проекция максимальной интенсивности) ПЭТ с ¹⁸F-ФДГ (здесь и далее красные стрелки указывают на активные опухолевые очаги); б — аксиальный совмещенный срез; в — сагиттальный совмещенный срез (здесь и далее белые стрелки указывают на неактивные опухолевые очаги); г — фронтальный совмещенный срез; д — сцинтиграмма в передней проекции в режиме всего тела с ¹²³I-МИБГ; е — аксиальный совмещенный срез; ж — сагиттальный совмещенный срез;



з — МIP, ПЭТ с ¹⁸F-МФБГ; и — аксиальный совмещенный срез; к — сагиттальный совмещенный срез; л — сагиттальный срез ПЭТ; м — фронтальный совмещенный срез; н — фронтальный срез ПЭТ

Fig. 2. Neuroblastoma of the retroperitoneum, INSS stage 4, INRGSS stage M (metastatic lesion of skeletal bones (Th12 vertebrae, middle third of the diaphysis of the left femur), mesenteric and retroperitoneal lymph nodes). Status after special treatment, control examination. PET/CT with ¹⁸F-FDG (a-g), scintigraphy with ¹²³I-MIBG (d-g), PET/CT with ¹⁸F-MFBG (z-n): a — MIP (maximum intensity projections) PET with ¹⁸F-FDG (hereinafter, red arrows indicate active tumor foci); б — fusion axial slice; в — fusion sagittal slice (hereinafter, white arrows indicate inactive tumor foci); г — fusion frontal slice; д — scintigram in the anterior projection in the whole body mode with ¹²³I-MIBG; е — fusion axial slice; ж — fusion sagittal slice; з — MIP, PET with ¹⁸F-MFBG; и — fusion axial slice; к — fusion sagittal slice; л — sagittal slice of PET; м — fusion frontal slice; н — frontal slice of PET

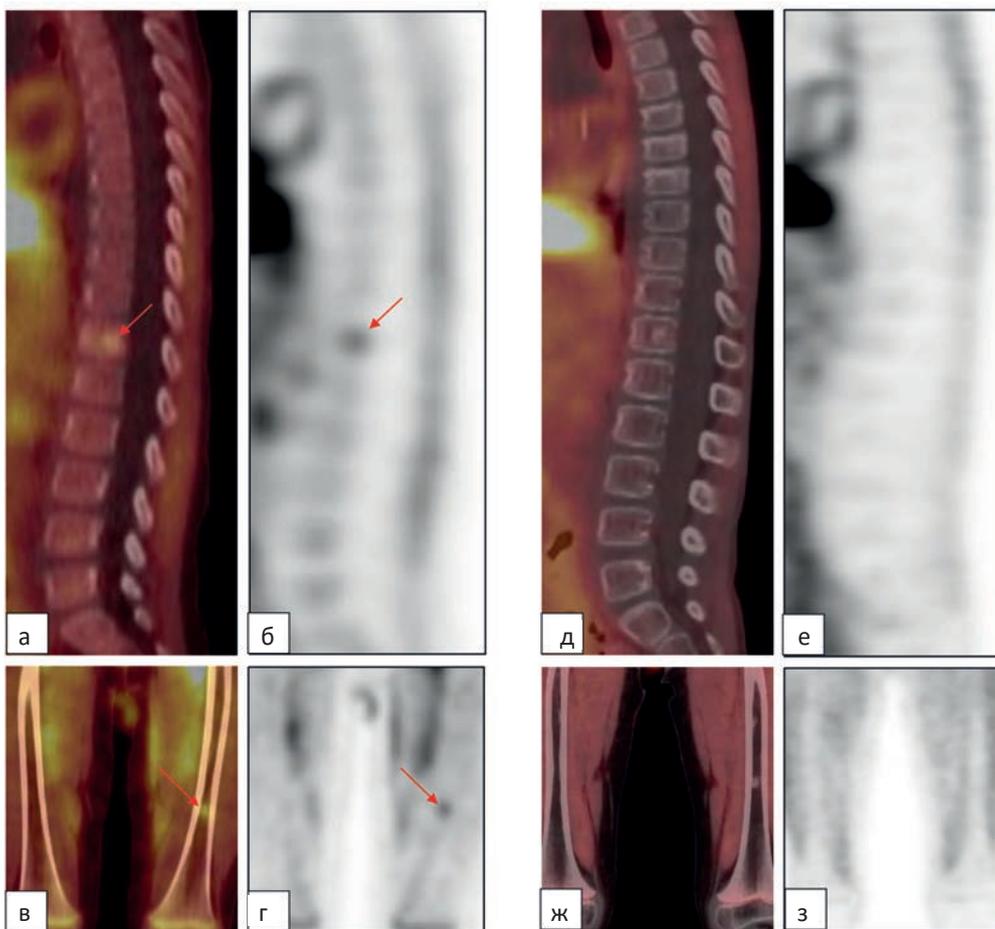


Рис. 3. Тот же пациент. Сравнение данных ПЭТ/КТ с ¹⁸F-МФБГ от 19.01.2024 (а–г) и от 03.04.2024 (д–з): а, д — совмещенные сагиттальные срезы; б, е — сагиттальные срезы; в, ж — совмещенные фронтальные срезы; г, з — фронтальные срезы. Патологическая гипераккумуляция РФЛП в позвонке Th12 и костномозговом канале левой бедренной кости (стрелки) определяются только при первом исследовании

Fig. 3. The same patient. Comparison of PET/CT data with ¹⁸F-MFBG from 19.01.2024 (a–г) and from 03.04.2024 (д–з): а, д — fusion sagittal slices; б, е — sagittal slices; в, ж — fusion frontal slices; г, з — frontal slices. Pathological hyperaccumulation of radiopharmaceutical in the Th12 vertebra and the medullary canal of the left femur (arrows) are determined only during the first examination

Клиницистами было принято решение эскалировать противоопухолевую терапию.

Через 4 месяца проведены повторные (контрольные) исследования. Результаты сцинтиграфии с ¹²³I-МИБГ те же. По данным ПЭТ/КТ с ¹⁸F-МФБГ — изменения в первичной опухоли без динамики, очаговое накопление в теле позвонка Th12 и в участке уплотнения костномозгового канала средней трети диафиза левой бедренной кости более не определялось (рис. 3).

Заключение

Биораспределение РФЛП ¹⁸F-МФБГ — сходное с ¹²³I-МИБГ. Побочных реакций после введения РФЛП выявлено не было. Помимо общих преимуществ метода ПЭТ/КТ (наиболее значимое — высокое про-

странственное разрешение) по сравнению со сцинтиграфией/ОФЭКТ, радионуклид ¹⁸F имеет период полураспада 110 мин, что позволяет проводить исследование уже через 60 минут. Из недостатков на сегодняшний день можно отметить ограниченную доступность РФЛП и отсутствие опыта на большом клиническом материале.

Продemonстрированные клинические наблюдения показали, что применение ¹⁸F-МФБГ является безопасным, имеет сходное с ¹²³I-МИБГ биораспределение препарата и высокую диагностическую точность определения опухолевых очагов. Планируется продолжение исследования на большей когорте детей с нейробластомой.

Список литературы / References

- Sharp SE, Gelfand MJ, Shulkin BL. Pediatrics: diagnosis of neuroblastoma. *Semin Nucl Med.* 2011;41(5):345-53. <https://doi.org/10.1053/j.semnucmed.2011.05.001>.
- Shapiro B, Gross MD. Radiochemistry, biochemistry, and kinetics of ¹³¹I-metaiodobenzylguanidine (MIBG) and of ¹²³I-MIBG: Clinical implications of the use of ¹²³I-MIBG. *Med Pediatr Oncol.* 1987;15(4):170-7. <https://doi.org/10.1002/mpo.2950150406>.
- Colavolpe C, Guedj E, Cammilleri S, et al. Utility of FDG-PET/CT in the follow-up of neuroblastoma which became MIBG-negative. *Pediatr Blood Cancer.* 2008;51(6):828-31. <https://doi.org/10.1002/pbc.21594>.
- Sharp SE, Shulkin BL, Gelfand MJ, et al. ¹²³I-MIBG scintigraphy and ¹⁸F-FDG PET in neuroblastoma. *J Nucl Med.* 2009;50(8):1237-43. <https://doi.org/10.2967/jnumed.108.060467>.
- Taggart DR, Han MM, Quach A, et al. Comparison of iodine-123 metaiodobenzylguanidine (MIBG) scan and ¹⁸F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography to evaluate response after iodine-131 MIBG therapy for relapsed neuroblastoma. *J Clin Oncol.* 2009;27(32):5343-9. <https://doi.org/10.1200/JCO.2008.20.5732>.
- Huang SY, Bolch WE, Lee C, et al. Patient-specific dosimetry using pretherapy [¹²⁴I]m-iodobenzylguanidine ([¹²⁴I]mIBG) dynamic PET/CT imaging before [¹³¹I]mIBG targeted radionuclide therapy for neuroblastoma. *Mol Imaging Biol.* 2015;17(2):284-94. <https://doi.org/10.1007/s11307-014-0783-7>.
- Cistaro A, Quartuccio N, Caobelli F, et al. ¹²⁴I-MIBG: a new promising positron-emitting radiopharmaceutical for the evaluation of neuroblastoma. *Nuclear Med Rev.* 2015;18(2):102-6. <https://doi.org/10.5603/NMR.2015.0024>.
- Wartski M, Jehanno N, Michon J, et al. Weak uptake of ¹²³I-MIBG and ¹⁸F-FDOPA contrasting with high ¹⁸F-FDG uptake in stage I neuroblastoma. *Clin Nucl Med.* 2015;40(12):969-70. <https://doi.org/10.1097/RLU.0000000000000957>.
- Matsubara K, Watabe H, Kumakura Y, et al. Sensitivity of kinetic macro parameters to changes in dopamine synthesis, storage, and metabolism: a simulation study for [¹⁸F]FDOPA PET by a model with detailed dopamine pathway. *Synapse.* 2011;65(8):751-62. <https://doi.org/10.1002/syn.20899>.
- Piccardo A, Lopci E, Foppiani L, et al. (¹⁸F)-DOPA PET/CT for assessment of response to induction chemotherapy in a child with high-risk neuroblastoma. *Pediatr Radiol.* 2014;44(3):355-61. <https://doi.org/10.1007/s00247-013-2807-x>.
- Kayani I, Bomanji JB, Groves A, et al. Functional imaging of neuroendocrine tumors with combined PET/CT using ⁶⁸Ga-DOTATATE (DOTA-DPhe1,Tyr3-octreotate) and ¹⁸F-FDG. *Cancer.* 2008;112(11):2447-55. <https://doi.org/10.1002/cncr.23469>.
- Gains JE, Aldridge MD, Mattoli MV, et al. ⁶⁸Ga-DOTATATE and ¹²³I-MIBG as imaging biomarkers of disease localisation in metastatic neuroblastoma: Implications for molecular radiotherapy. *Nucl Med Commun.* 2020;41(11):1169-77. <https://doi.org/10.1097/MNM.0000000000001265>.
- Telli T, Ergün EL, Salanci BV, et al. The complementary role of ⁶⁸Ga-DOTATATE PET/CT in neuroblastoma. *Clin Nucl Med.* 2020;45(4):326-29. <https://doi.org/10.1097/RLU.0000000000002961>.
- Николаева ЕА, Крылов АС, Каспшик СМ и др. Сравнение скintiграфии с ¹²³I-метайодбензилгуанидином и ^{99m}Tc-тектротидом у пациентов с опухолями нейрогенной природы. *Российский журнал детской гематологии и онкологии.* 2024;11(1):36-43. Nikolaeva EA, Krylov AS, Kasprshyk SM, et al. Comparison of scintigraphy with ¹²³I-MIBG and ^{99m}Tc-tectrotyde in patients with tumors of a neurogenic nature. *Russian Journal of Pediatric Hematology and Oncology.* 2024;11(1):36-43. (In Russ.). <https://doi.org/10.21682/2311-1267-2024-11-1-36-43>.
- Brisse HJ, McCarville MB, Granata C, et al. Guidelines for imaging and staging of neuroblastic tumors: consensus report from the International Neuroblastoma Risk Group Project. *Radiology.* 2011;261(1):243-57. <https://doi.org/10.1148/radiol.11101352>.
- Bar-Sever Z, Biassoni L, Shulkin B, et al. Guidelines on nuclear medicine imaging in neuroblastoma. *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 2018;45(11):2009-24. <https://doi.org/10.1007/s00259-018-4070-8>.
- Zhang H, Huang R, Pillarsetty NVK, et al. Synthesis and evaluation of ¹⁸F-labeled benzylguanidine analogs for targeting the human norepinephrine transporter. *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 2014;41(2):322-32. <https://doi.org/10.1007/s00259-013-2558-9>.
- Hu B, Vavere AL, Neumann KD, et al. A practical, automated synthesis of meta-[[¹⁸F]fluorobenzylguanidine for clinical use. *ACS Chem Neurosci.* 2015;18(6):1870-9. <https://doi.org/10.1021/acchemneuro.5b00202>.
- Samim F, Blom T, Poot AJ, et al. [¹⁸F]mFBG PET-CT for detection and localisation of neuroblastoma: a prospective pilot study. *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 2023;50(4):1146-57. <https://doi.org/10.1007/s00259-022-06063-6>.
- Pandit-Taskar N, Zanzonico P, Staton KD, et al. Biodistribution and dosimetry of ¹⁸F-MetaFluorobenzylguanidine: a first-in-human PET/CT imaging study of patients with neuroendocrine malignancies. *J Nucl Med.* 2018;59(1):147-53. <https://doi.org/10.2967/jnumed.117.193169>.

Вклад авторов

Статья подготовлена с равным участием авторов.

Authors' contributions

Article was prepared with equal participation of the authors.

Information about the authors

Alexander S. Krylov, <https://orcid.org/0000-0002-8476-7879>;
Akgul A. Odzharova, <https://orcid.org/0000-0003-3576-6156>;
Pavel E. Tulin, <https://orcid.org/0000-0001-7226-5129>;
Marina V. Rubanskaya, <http://orcid.org/0000-0002-1016-539X>;
Denis I. Nevzorov, <http://orcid.org/0000-0003-2969-0191>;
Natalia I. Nesterova, <http://orcid.org/0000-0003-2312-6020>.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки. Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Соответствие принципам этики. Одобрение этического комитета не требовалось. Информированное согласие. Родители пациента подписали информированное согласие на публикацию его данных.

Тип статьи: Оригинальная статья.

Поступила: 20.11.2024.

Принята к публикации: 27.12.2024.

Опубликована online: 26.03.2025.

Funding. The study had no sponsorship.

Conflict of interests. Not declared.

Ethical compliance. Ethical committee approval was not necessary.

Informed consent. The patient's parents signed informed consent for the publication of his data.

Article type: Original article.

Received: 20.11.2024.

Accepted for publication: 27.12.2024.

Published online: 26.03.2025.