



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Оригинальная статья

УДК 616.1

<https://doi.org/10.52560/2713-0118-2026-1-83-106>

Роль интериктальной ПЭТ/МРТ головного мозга с ^{18}F -ФДГ у пациентов с фокальной фармакорезистентной эпилепсией

Т. М. Ростовцева¹, М. Б. Долгушин², М. А. Каралкина³,
О. И. Пацап⁴, Ю. В. Рублева⁵

¹⁻⁵ ФГБУ «Федеральный центр мозга и нейротехнологий» ФМБА России, г. Москва, Россия

¹ <https://orcid.org/0001-6541-179X>

² <https://orcid.org/0003-3930-5998>

³ <https://orcid.org/0002-9267-3602>

⁴ <https://orcid.org/0003-4620-3922>

⁵ <https://orcid.org/0002-3746-1797>

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Михайловна Ростовцева,
rostovtsevat@gmail.ru

Аннотация

Фармакорезистентная эпилепсия остается одной из наиболее актуальных проблем современной неврологии, поскольку до 30 % пациентов не поддаются медикаментозному лечению, а стандартные методы нейровизуализации оказываются недостаточно информативными у значительного числа пациентов с МР-негативной картиной и дискордантными данными магнитно-резонансной томографии и ЭЭГ. Оптимизация предоперационного картирования и развитие неинвазивных высокоточных методов нейровизуализации критичны для повышения эффективности хирургического лечения и улучшения прогноза хирургической резекции. Гибридная интериктальная ПЭТ/МРТ головного мозга с ^{18}F -фтордезоксиглюкозой (^{18}F -ФДГ) открывает новые возможности для усовершенствования предоперационного планирования таких пациентов.

Цель. Исследовать диагностические возможности и клиническую применимость гибридного ПЭТ/МРТ-исследования в предоперационном картировании эпилептогенных зон у пациентов с фармакорезистентной эпилепсией, включая МР-негативные случаи. Провести количественный анализ гипометаболизма ^{18}F -ФДГ в зависимости от типа эпилепсии, частоты и длительности эпилептических припадков.

Материалы и методы. Проведен скрининг 10 здоровых добровольцев и обследование 130 пациентов с фармакорезистентной эпилепсией по протоколу ПЭТ/МРТ с ^{18}F -ФДГ. Осуществлен качественный и количественный анализ зон гипометаболизма, сопоставление с клиническими данными, данными видео-ЭЭГ-мониторинга и МРТ.

© Ростовцева Т. М., Долгушин М. Б., Каралкина М. А., Пацап О. И., Рублева Ю. В., 2026

Результаты. Применение ПЭТ/МРТ головного мозга с ^{18}F -ФДГ позволило увеличить выявляемость эпилептогенных очагов при сравнении с изолированным применением МРТ по эпилептическому протоколу сканирования за счет МР-негативных случаев и пациентов с наличием небольших структурных изменений, которые были обнаружены при повторном прицельном пересмотре изображений МРТ с учетом метаболических изменений. У здоровых лиц значимая межполушарная асимметрия отсутствует, височные области демонстрируют физиологически более низкие показатели SUV по сравнению с лобными, теменными и затылочными. Во всех возрастных группах пациентов с фармакорезистентной эпилепсией выявлялась умеренная межполушарная асимметрия метаболизма ^{18}F -ФДГ (индекс асимметрии $\sim 0,25-0,5$). Длительность течения заболевания и частота приступов не оказывают выраженного прямолинейного влияния на уровень SUV в очаге. Однако у МР-позитивных пациентов с ежедневными приступами наблюдается тенденция к относительному повышению SUV, вероятно, связанная с постиктальной активностью, не влияющей значимо на асимметрию общего метаболизма ^{18}F -ФДГ. Наиболее выраженный гипометаболизм ^{18}F -ФДГ регистрировался при структурной фокальной эпилепсии, тогда как более высокий метаболический профиль отмечался при фокальной эпилепсии неуточненной этиологии и при эпилепсии, имеющей черты фокальной и генерализованной.

Заключение. Применение ПЭТ/МРТ с ^{18}F -ФДГ расширяет диагностические возможности нейровизуализации у пациентов с фокальной фармакорезистентной эпилепсией. Внедрение метода ПЭТ/МРТ в алгоритм предоперационного планирования обладает потенциалом улучшить эффективность хирургического лечения и качество жизни пациентов.

Ключевые слова: ПЭТ/МРТ, ПЭТ/МРТ с ^{18}F -ФДГ, эпилепсия, радиофармацевтические лекарственные препараты

Для цитирования: Ростовцева Т. М., Долгушин М. Б., Каралкина М.А., Пацап О. И., Рублева Ю. В. Роль интериктальной ПЭТ/МРТ головного мозга с ^{18}F -ФДГ у пациентов с фокальной фармакорезистентной эпилепсией // Радиология — практика. 2026;1:83-106. <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2026-1-83-106>

Источники финансирования

Исследование выполнено в рамках НИР «Разработка показаний для применения гибридного метода ПЭТ-МРТ при планировании хирургического лечения у пациентов с эпилепсией», шифр 03.02.VY.

Благодарности

Авторы выражают благодарность медицинскому физику отдела рентгенологических и радионуклидных методов диагностики ФГБУ «ФЦМН» ФМБА России Дворянчикову А. В.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что данная работа, ее тема, предмет и содержание не затрагивают конкурирующих интересов. Мнения, изложенные в статье, принадлежат авторам рукописи. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Соответствие принципам этики

Работа соответствует этическим нормам Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» с поправками 2008 года и «Правилами клинической практики в Российской Федерации», утвержденными Приказом Минздрава РФ от 19.06.2003.

ORIGINAL RESEARCH

Original article

The Role of Interictal ^{18}F -FDG Brain PET/MRI in Patients with Focal Pharmacoresistant Epilepsy

Tatiana M. Rostovtseva¹, Mikhail B. Dolgushin², Maria A. Karalkina³,
Olga I. Patsap⁴, Yulia V. Rubleva⁵

¹⁻⁵ Federal State Budgetary Institution «Federal center of brain research and neurotechnologies» of the Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russian Federation

¹ <https://orcid.org/0001-6541-179X>

² <https://orcid.org/0003-3930-5998>

³ <https://orcid.org/0002-9267-3602>

⁴ <https://orcid.org/0003-4620-3922>

⁵ <https://orcid.org/0002-3746-1797>

Corresponding author: Tatiana M. Rostovtseva, rostovtsevat@mail.ru

Abstract

Pharmacoresistant epilepsy remains a significant challenge in modern neurology, affecting around 30 % of patients who do not respond to medication. Conventional neuroimaging methods often fail to provide sufficient diagnostic information in patients with MRI-negative findings and discordant EEG and MRI data. Optimizing preoperative mapping through noninvasive, high-precision neuroimaging techniques is critical to improving surgical outcomes and patient prognosis. Hybrid PET/MRI imaging with ^{18}F -FDG offers new possibilities for enhanced preoperative localization in such patients.

Objective. To evaluate the diagnostic value and clinical applicability of hybrid PET/MRI with ^{18}F -FDG in the preoperative mapping of epileptogenic zones in patients with pharmacoresistant epilepsy, including MRI-negative cases. To perform a quantitative analysis of ^{18}F -FDG hypometabolism in relation to the type of epilepsy, as well as the frequency and duration of epileptic seizures.

Materials and Methods. A screening of 10 healthy volunteers and an evaluation of 130 patients with drug-resistant epilepsy were performed according to the hybrid PET/MRI protocol with ^{18}F -FDG. Both qualitative and quantitative analyses of hypometabolic brain regions were conducted, with findings correlated to clinical data, video-EEG monitoring results, and MRI findings. This approach enabled integrated assessment of functional and structural abnormalities, provided improved localization of epileptogenic zones, and facilitated the interpretation of metabolic, electrophysiological, and neuroanatomical correlates in the study cohort.

Results. The use of interictal brain PET/MRI with ^{18}F -FDG significantly improved the detection rate of epileptogenic zones compared with standalone epilepsy-protocol MRI. This effect was particularly pronounced in MR-negative cases and in patients with subtle structural abnormalities, which were subsequently recognized upon targeted MRI re-evaluation guided by metabolic findings from PET imaging. In healthy individuals, no significant interhemispheric asymmetry of glucose metabolism was observed; physiologically, temporal regions demonstrate lower SUV values compared with frontal, parietal, and occipital cortices. Across all age groups of patients with pharmacoresistant epilepsy, moderate interhemispheric asymmetry of ^{18}F -FDG metabolism was identified (asymmetry index range ~ 0.25–0.5). Disease duration and seizure frequency showed no clear linear relationship with focal SUV values. However, in MRI-positive cases with daily seizures, a relative increase in SUV within the epileptogenic focus was noted,

likely reflecting postictal metabolic activity without materially affecting overall hemispheric asymmetry. The most pronounced ^{18}F -FDG hypometabolism was observed in structural focal epilepsy, while higher metabolic activity characterized focal epilepsy of unknown etiology and mixed focal-generalized forms. These findings emphasize that hybrid ^{18}F -FDG PET/MRI provides an advanced diagnostic advantage through its ability to integrate metabolic and structural data, allowing for improved localization of epileptogenic foci – even in subtle or MRI-negative cases – and thereby enhancing presurgical evaluation and treatment planning.

Conclusion. The use of hybrid ^{18}F -FDG PET/MRI expands the diagnostic capabilities of neuroimaging in patients with focal pharmaco-resistant epilepsy. Incorporation of PET/MRI into the presurgical planning workflow has the potential to improve the effectiveness of surgical treatment and enhance patient quality of life.

Keywords: PET/MRI, PET/MRI with ^{18}F -FDG, Epilepsy, Radiopharmaceuticals

For citation: Rostovtseva T. M., Dolgushin M. B., Karalkina M. A., Patsap O. I., Rubleva Yu. V. The Role of Interictal ^{18}F -FDG Brain PET/MRI in Patients with Focal Pharmaco-resistant Epilepsy. *Radiology – Practice*. 2026;1:83-106. (In Russ.). <https://doi.org/10.52560/2713-0118-2026-1-83-106>

Funding

This study was conducted as part of the research project « Developing indications for the use of hybrid PET/MRI when planning surgery in patients with pharmaco-resistant epilepsy», code 03,02.VY.

Acknowledgments

The authors are grateful to A. V. Dvoryanchikov, medical physicist of the Department of X-ray and Radionuclide Diagnostic Methods, Federal Center for Brain and Neurotechnologies, FMBA of Russia.

Conflicts of Interest

The authors declare that this work, its subject, and content do not involve any competing interests. The opinions expressed in the article are those of the manuscript authors. The authors confirm the compliance of their authorship with the ICMJE (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, the preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Compliance with Ethical Standards

The work complies with the ethical standards of the Helsinki Declaration of the World Medical Association «Ethical Principles of conducting scientific medical research with human participation» as amended in 2008 and the «Rules of Clinical Practice in the Russian Federation» approved by the Order of the Ministry of Health of the Russian Federation dated 06/19/2003.

Введение

Фармакорезистентная эпилепсия остается одной из основных проблем неврологии, затрагивая значительную часть пациентов, у которых медикаментозная терапия оказывается неэффективной [1]. Точная идентификация эпилептогенного очага является критически важной для успешного хирургического

лечения. Современные методы нейровизуализации, включая магнитно-резонансную томографию (МРТ), играют важную роль в локализации эпилептогенных очагов, однако нередко оказываются недостаточно информативными у пациентов с МР-негативной формой заболевания и при несогласованности данных МРТ и видео-ЭЭГ-мониториро-

вания (ВЭМ) [14, 17]. В этом контексте интериктальная позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) с ^{18}F -фтордезоксиглюкозой (^{18}F -ФДГ) демонстрирует высокую чувствительность в выявлении участков гипометаболизма, связанных с эпилептогенными зонами, даже при отрицательных данных МРТ [1, 5, 6].

Позитронно-эмиссионная томография, совмещенная с магнитно-резонансной томографией (ПЭТ/МРТ) с применением ^{18}F -ФДГ — новый перспективный гибридный метод диагностики, который позволяет одновременно получать структурную и метаболическую информацию о мозге, что улучшает точность локализации патологических зон [7, 13]. ПЭТ/МРТ позволяет осуществлять одновременный сбор данных интериктальной ПЭТ с ^{18}F -ФДГ и высокоразрешающей МРТ головного мозга и производить комбинированный анализ структурных и метаболических изменений в мозге на основе полученных изображений с высоким пространственным разрешением и оптимальной корегистрацией [3, 19].

Современные алгоритмы обработки и количественные методы анализа изображений дополнительно повышают диагностическую ценность ПЭТ/МРТ, обеспечивая высокую корреляцию с инвазивными методами мониторинга и позволяя прогнозировать эффективность хирургического вмешательства [9, 18]. Несмотря на эти успехи, стандартизация протоколов ПЭТ/МРТ и их клиническая валидация остаются актуальными задачами [15]. Настоящее исследование посвящено оценке диагностической ценности и клинической эффективности гибридного ПЭТ/МРТ с ^{18}F -ФДГ при локализации эпилептогенных очагов у пациентов с фармакорезистентной эпилепсией.

Материалы и методы

Всего исследование ПЭТ/МРТ головного мозга с ^{18}F -ФДГ проведено 10 здоровым добровольцам и 130 пациен-

там с фармакорезистентной эпилепсией (возраст 18–48 лет, средний возраст $29,6 \pm 9,7$ года), которые проходили лечение в ФГБУ «Федеральный центр мозга и нейротехнологий» ФМБА России в 2023–2025 гг. Группа контроля состояла из 10 здоровых добровольцев (5 мужчин и 5 женщин) в возрасте от 20 до 39 лет (средний возраст 27,6 года).

Исследование проводилось при добровольном информированном письменном согласии пациентов. Протокол исследования одобрен локальным этическим комитетом Федерального центра мозга и нейротехнологий (протокол № 12/05-12-22, 05.12.2022).

Все пациенты до включения в исследование имели установленный диагноз эпилепсии, получали противоэпилептические препараты в режиме политерапии. Во время проведения исследований все пациенты находились на стационарном лечении в ФГБУ «ФЦМН» ФМБА России. Всем обследуемым было выполнено клиничко-неврологическое обследование, суточное ВЭМ, гибридное сканирование ПЭТ/МРТ головного мозга с ^{18}F -ФДГ, была проведена оценка функциональных, структурных и метаболических изменений головного мозга. У всех включенных в исследование пациентов отсутствовали сопутствующие заболевания, которые могли оказать существенное влияние на показатели метаболизма ^{18}F -ФДГ.

Критериями включения были:

- наличие установленного диагноза эпилепсии с лекарственной устойчивостью;
- продолжительность заболевания более 1 года;
- частота эпилептических приступов более 1 раза в 2 месяца.

Критериями исключения были:

- наличие объемных образований головного мозга, за исключением образований, относящихся к группе LEAT;

- наличие воспалительных изменений головного мозга и оболочек мозга;
- наличие противопоказаний к исследованиям МРТ или ПЭТ с ^{18}F -ФДГ.

Все обследованные пациенты были распределены на следующие группы: пациенты с предполагаемым эпилептогенным очагом в височных долях; с выявленными потенциально эпилептогенными структурными изменениями на МРТ (МР-позитивные, $n = 56$; 43,1 %) и с отсутствием потенциально эпилептогенных структурных изменений на МРТ (МР-негативные, $n = 40$; 30,8 %); пациенты с предполагаемым эпилептогенным очагом вневисочной локализации, МР-позитивные ($n = 22$; 16,9 %) и МР-негативные ($n = 12$; 9,2 %). Группа МР-позитивных пациентов с височной эпилепсией на 82,1 % состояла из пациентов с мезиальным темпоральным склерозом ($n = 46$), а также включала пациентов с гетеротопией серого вещества ($n = 2$), менингоэнцефалоцеле ($n = 3$), фокальной кортикальной дисплазией (ФКД, $n = 2$), полимикрогирией ($n = 1$), кавернозной мальформацией ($n = 1$), ганглиogliомой ($n = 1$). Группа МР-позитивных пациентов с вневисочной эпилепсией на 63,6 % ($n = 14$) состояла из пациентов с ФКД, кроме того, включала пациентов с гетеротопией серого вещества ($n = 2$), полимикрогирией ($n = 1$), ганглиogliомой ($n = 1$), послеоперационными изменениями ($n = 3$), глиозом ($n = 1$). 35 (26,9 %) пациентам был выполнен стерео-ЭЭГ-видеомониторинг, 33 (25,4 %) пациентам было выполнено оперативное вмешательство в виде резекции эпилептогенного очага, из них в 16 случаях перед операцией выполнялся инвазивный видео-ЭЭГ-мониторинг. Всего инвазивные вмешательства выполнялись 52 пациентам (40 %).

Продолженное ВЭМ проводилось с использованием систем «Нейрон-Спектр-4/П» и «Нейрон-Спектр-65» (ООО «Нейрософт», Россия) в соот-

ветствии с рекомендациями Международной федерации клинической нейрофизиологии. Производилась оценка биоэлектрической активности головного мозга, осуществлялась запись приступов.

ПЭТ/МР-исследования выполнялись на гибридной системе SIGNA PET/MR (3 Тл, GE Healthcare, США), обеспечивающей одновременное проведение позитронно-эмиссионной и магнитно-резонансной томографии головного мозга. Для всех обследований использовалась 8-канальная высокоразрешающая катушка, предназначенная для нейрорадиологических исследований. Все пациенты находились под наблюдением медицинского персонала не менее чем за сутки до исследования; при возникновении эпилептических приступов проведение процедуры переносилось на другое время. Перед выполнением ПЭТ/МРТ с ^{18}F -ФДГ проводилась стандартная подготовка, соответствующая принятым протоколам для исследований с ^{18}F -ФДГ. Радиофармацевтический лекарственный препарат на основе ^{18}F -ФДГ вводился внутривенно в дозе, определяемой врачом-радиологом индивидуально в зависимости от массы тела и роста пациента (125–250 МБк, средняя доза — 180 МБк). После введения препарата пациенты находились в затемненном, тихом помещении в положении лежа с закрытыми глазами в течение 30 минут под наблюдением медицинского персонала, воздерживаясь от использования мобильных устройств, чтения, прослушивания музыки и активных движений.

Протокол гибридного ПЭТ/МРТ-сканирования был сформирован следующим образом. Во время проведения гибридного ПЭТ/МРТ-сканирования при сборе данных ПЭТ (в течение 15 мин, размер матрицы 192×192) на основании технических возможностей системы и рекомендованного протокола HARNESSTMRI для пациентов с эпилепсией (рекомендации ILAE, 2019) были выполнены

следующие МР-последовательности высокого разрешения [14]:

- 3D T1-взвешенная последовательность с инверсионным восстановлением (IR-FSPGR), сагиттальная плоскость; поле зрения — 25,6 см; толщина среза — 1,2 мм; угол наклона — 12°; частотное и фазовое разрешение — 256 × 256; ширина полосы пропускания — 31,25 кГц;
- 3D T2-взвешенная последовательность (Cube T2), сагиттальная плоскость; поле зрения — 25,6 см; TR — 2500 мс; TE — максимальное; Echo Train Length — 125; разрешение — 320 × 320; ширина полосы пропускания — 50 кГц;
- 3D T2 FLAIR-взвешенная последовательность (Cube T2 FLAIR), сагиттальная плоскость; поле зрения — 25,6 см; толщина среза — 1,2 мм; TR — 6500 мс; TE — 90 мс; Echo Train Length — 140; разрешение — 256 × 256; ширина полосы пропускания — 31,25 кГц;
- 2D корональная T2-взвешенная последовательность с быстрым спин-эхо (FRFSE-XL); поле зрения — 20 см; толщина среза — 2,0 мм; межсрезовое расстояние — 0,2 мм; TR — 4877 мс; TE — 120 мс; угол наклона — 111°; Echo Train Length — 14; разрешение — 288 × 224; ширина полосы пропускания — 19,23 кГц.

Помимо указанных выше последовательностей, в протокол исследования была включена последовательность для коррекции ослабления сигнала (magnetic resonance attenuation correction, MR-AC) длительностью 18 с, используемая для построения карт коррекции на основе атласного подхода с генерацией псевдо-КТ, обеспечивающего моделирование непрерывного распределения коэффициента ослабления в пределах головы. Атлас был основан на КТ-изображениях единого эталонного объекта, что обеспечивало точную реконструкцию данных ПЭТ и минимизацию арте-

фактов, связанных с неоднородностью тканей.

Независимо друг от друга два врача радиолога и два врача рентгенолога провели визуальный анализ полученных изображений гибридного исследования. Помимо визуального анализа, проводился анализ с использованием рабочей станции Advantage Workstation 4.6 (AWS, GE Healthcare, США) со специальным клиническим программным обеспечением CortexID Suite ver. 1.04-5.

Анализ данных ПЭТ/МРТ выполнялся поэтапно. На первом этапе проводилась оценка МР-изображений с анализом структурных изменений в веществе головного мозга. В дальнейшем проводилась качественная и количественная оценка метаболизма ¹⁸F-ФДГ в различных отделах мозга. На основании данных позитронно-эмиссионной томографии определялась асимметрия метаболической активности ¹⁸F-ФДГ в зеркально расположенных участках полушарий. Количественный анализ включал измерение стандартных параметров накопления радиофармацевтического лекарственного препарата (SUV_{max}, SUV_{mean}) в зонах интереса (ROI) и областях скорректированного поглощения (COROA), а также вычисление индекса асимметрии метаболизма ¹⁸F-ФДГ в предполагаемой эпилептогенной зоне по сравнению с контралатеральным участком вещества мозга. Объем выделенных ROI составлял 400–600 мм³. На заключительном этапе выполнялось сопоставление структурных изменений, выявленных по данным МРТ, с зонами метаболической активности, определенными по результатам ПЭТ, а также с информацией, полученной при видео-ЭЭГ-мониторинге. В случаях расхождения результатов проводился повторный целенаправленный анализ МР-изображений с детальной оценкой структурных изменений вещества мозга в областях, соответствующих зонам гипометаболизма ¹⁸F-ФДГ.

Для всех групп пациентов были рассчитаны средние значения стандартизированных коэффициентов накопления радиофармпрепарата (SUVmax и SUVmean) в предполагаемом эпилептогенном очаге, а также индексы асимметрии метаболизма (AI SUVmax и AI SUVmean). Статистическая обработка данных выполнялась с использованием программного пакета SPSS 23.0, а также библиотек Scipy и Matplotlib языка программирования Python. Количественные данные представлены в виде среднего значения и стандартного отклонения ($m \pm SD$). Статистически значимыми считались различия при уровне значимости $p < 0,05$. Проверка нормальности распределения признаков осуществлялась с применением критерия Шапиро — Уилка; однородность дисперсий оценивалась перед проведением параметрических тестов. Для оценки влияния клинических факторов на метаболические параметры применялся однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) и двухфакторный ANOVA. Однофакторный ANOVA использовался для сравнения средних значений SUVmax, SUVmean и индексов асимметрии между группами, выделенными по длительности заболевания, частоте эпилептических приступов, типу эпилепсии и принадлежности к группе дизайна исследования (височная / вневисочная эпилепсия, МР-позитивный / МР-негативный статус). При выявлении статистически значимых различий по данным ANOVA проводились апостериорные множественные сравнения с применением критерия Тьюки. Двухфакторный ANOVA применялся для оценки совместного влияния двух факторов (например, длительности заболевания и принадлежности к группе) на индексы асимметрии метаболизма. В случаях нарушения предположений о нормальности распределения или гомогенности дисперсий дополнительно использовался непараметрический критерий Кра-

скела — Уоллиса. Сравнение непрерывных количественных показателей в двух независимых выборках проводилось с использованием t-теста Стьюдента для независимых выборок или непараметрического критерия Манна — Уитни. Для парных сравнений показателей метаболизма между анатомическими регионами в группе контроля использовался парный t-критерий Стьюдента; в качестве непараметрической альтернативы применялся критерий Уилкоксона для связанных выборок. Для оценки взаимосвязей между количественными переменными (индекс асимметрии, показатели SUV, длительность заболевания, частота приступов) выполнялся корреляционный анализ с вычислением коэффициента корреляции Пирсона (или Спирмена — при ненормальном распределении данных).

Результаты

Проведен сравнительный анализ эффективности выявления эпилептогенных очагов с помощью метода МРТ и гибридного метода ПЭТ/МРТ головного мозга с ^{18}F -ФДГ в четырех группах пациентов: с эпилепсией височной и вневисочной локализации, с наличием (МРТ+) и с отсутствием (МРТ-) потенциально эпилептогенных структурных изменений на МРТ. Результаты анализа представлены в табл. 1.

При анализе группы пациентов с височной эпилепсией и положительными данными МРТ ($n = 56$) наблюдалась высокая эффективность обоих методов: МРТ выявила очаги у 78,6 % пациентов, а ПЭТ/МРТ — у 98,2 %. Разница в выявляемости методов в МР-позитивной височной группе обусловлена пациентами, у которых эпилептогенный очаг был выявлен при повторном пересмотре изображений МРТ с учетом данных ПЭТ (рис. 1).

Анализ группы пациентов с эпилепсией вневисочной локализации и позитивной МР-картиной ($n = 22$) по-

Таблица 1

Выявление очагов эпилепсии методами МРТ и ПЭТ/МРТ

Группа пациентов	Всего пациентов	Выявлено МРТ (очагов), %	Выявлено ПЭТ/МРТ (очагов), %
Височная эпилепсия, МРТ+	56	78,6	98,2
Височная эпилепсия, МРТ-	40	0	95,0
Вневисочная эпилепсия, МРТ+	22	72,5	90,9
Вневисочная эпилепсия, МРТ-	12	0	84,6

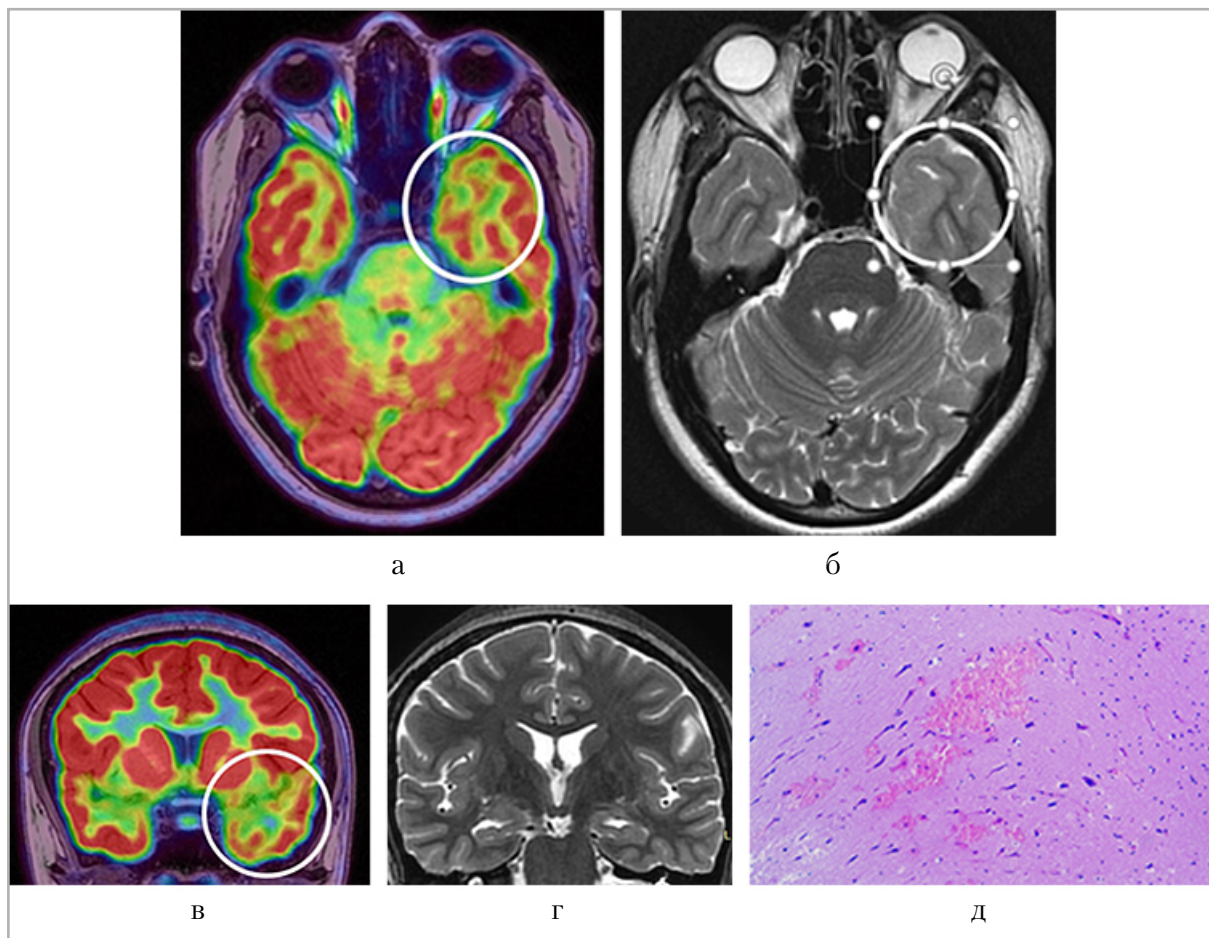


Рис. 1. ПЭТ/МРТ головного мозга с ^{18}F -ФДГ пациента с фокальной кортикальной дисплазией типа 1b: *а* – совмещенное изображение ПЭТ/МРТ в аксиальной плоскости, зона гипометаболизма ^{18}F -ФДГ в передних отделах левой височной доли (*окружность*); *б* – T2-ВИ в аксиальной плоскости. Небольшой участок утолщения коры в передних отделах левой височной доли (*окружность*); *в* – совмещенное изображение ПЭТ/МРТ в коронарной плоскости, зона гипометаболизма ^{18}F -ФДГ в передних отделах левой височной доли (*окружность*); *г* – T2-ВИ в косо-аксиальной плоскости. Неизмененные гиппокампы; *д* – гистологический препарат, окраска гематоксилином и эозином, корковая дисламинация

казал схожие результаты: с помощью МРТ эпилептогенные очаги выявлены у 72,5 % пациентов, с помощью ПЭТ/МРТ – у 84,6 %, разница выявляемости

эпилептогенных очагов обусловлена выявлением очагов на изображениях МРТ при повторном пересмотре с учетом данных ПЭТ (рис. 2).

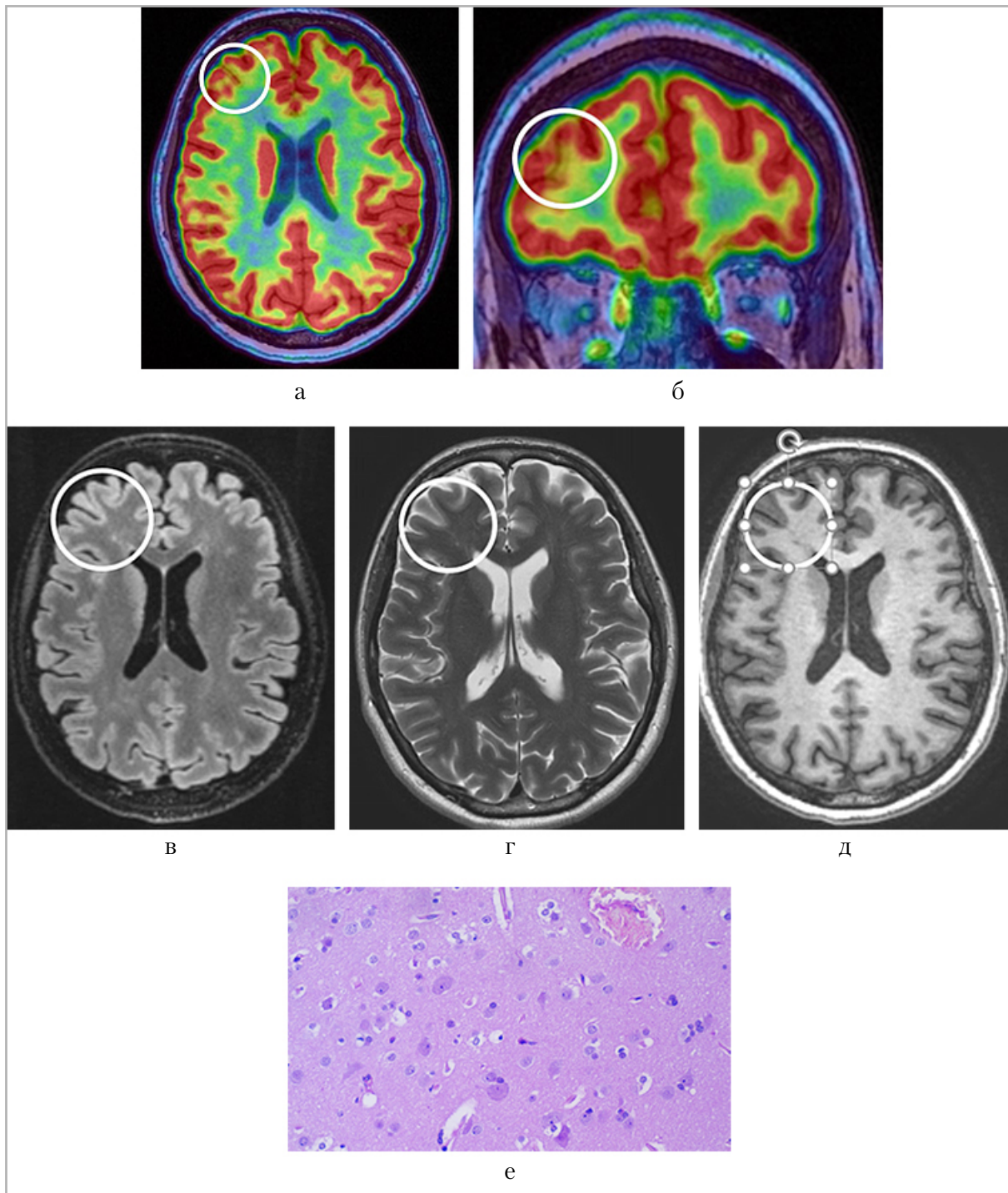


Рис. 2. ПЭТ/МРТ головного мозга с ^{18}F -ФДГ пациента с ФКД в правой лобной доле. *а* — совмещенное изображение ПЭТ/МРТ в аксиальной плоскости, участок гипометаболизма ^{18}F -ФДГ в правой лобной доле в области ФКД (*окружность*); *б* — совмещенное изображение ПЭТ/МРТ в корональной плоскости, участок гипометаболизма ^{18}F -ФДГ в правой лобной доле в области ФКД (*окружность*); *в* — ИП T2-FLAIR в аксиальной плоскости. Небольшой участок снижения серо-белой демаркации, трансмантыйный признак в правой лобной доле (*окружность*); *г* — T2-ВИ в аксиальной плоскости. Небольшой участок снижения серо-белой демаркации, трансмантыйный признак в правой лобной доле (*окружность*); *д* — ИП T1-ВИ в аксиальной плоскости. Небольшой участок снижения серо-белой демаркации, трансмантыйный признак в правой лобной доле (*окружность*); *е* — гистологический препарат, окраска гематоксилином и эозином. Кортикальная дисламинация, дисморфные нейроны и баллонные клетки

Наиболее выраженные различия между методами отмечены в группе височной эпилепсии с МРТ-негативными результатами ($n = 40$) и в группе МРТ-негативной вневисочной эпилепсии ($n = 12$). В этих группах по данным МРТ эпилептогенные очаги отсутствовали, с помощью ПЭТ/МРТ эпилептогенные очаги были выявлены у 95 и 84,6 % пациентов соответственно (рис. 3).

Полученные данные демонстрируют ограничения метода структурной МРТ при височной и вневисочной эпилепсии и подчеркивают роль ПЭТ/МРТ в диагностике этих форм заболевания. Особенно значимым является то, что ПЭТ/МРТ показала стабильно высокую эффективность (90,5–98,2 %) во всех исследованных группах, независимо от локализации очага и результатов МРТ.

Количественный анализ метаболизма ^{18}F -ФДГ в группе здоровых добровольцев

В группе здоровых добровольцев выраженная межполушарная асимметрия SUV отсутствует — асимметрия не

превышает уровня 6 %, что не является статистически и клинически значимым. Наблюдается слабая правосторонняя тенденция (отрицательные значения AI), но она мала и не выходит за пределы естественной вариабельности. Показатели соответствуют нормальной симметрии мозга без выраженного латерального доминирования метаболизма.

В группе контроля статистический анализ выявил высокосignимые различия метаболической активности между исследуемыми ипсилатеральными регионами (височные, лобные, теменные и затылочные доли). Во всех случаях без исключения височные области демонстрировали более низкие значения всех параметров ПЭТ по сравнению с лобными, теменными и затылочными областями. Для SUVmax средние значения в лобных областях составили $13,0 \pm 2,3$, что на 34 % превышало показатели височных областей ($9,7 \pm 1,9$). Парный t-критерий показал высокостатистически значимое различие ($t = 10,728$, $p < 0,000002$, $d = 3,39$). Для SUVmean наблюдались наиболее выраженные различия. Лобные области показали значения

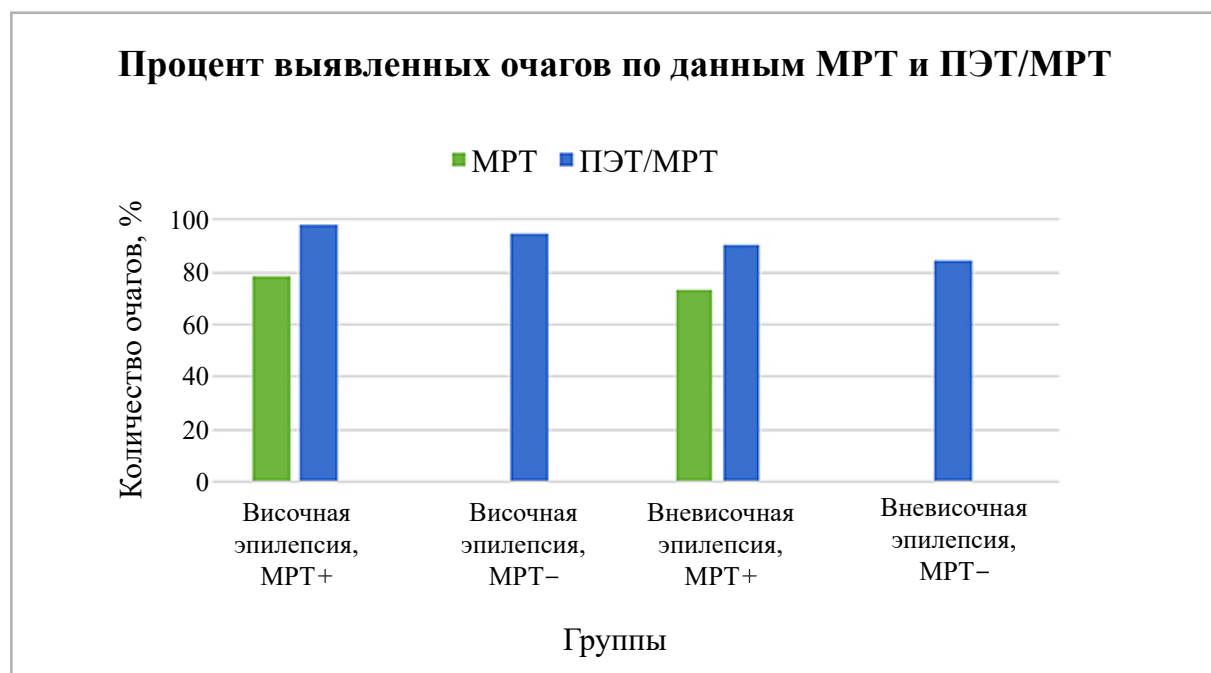


Рис. 3. Выявление очагов эпилепсии разными методами МРТ и ПЭТ/МРТ в подгруппах пациентов

9,5 ± 1,7 против 5,8 ± 1,1 в височных областях, что соответствует увеличению на 63,8 %. Статистическая значимость различий была максимальной ($t = 12,428$, $p < 0,000001$, $d = 3,93$). Для SUV_{peak} лобные области показали значения 9,6 ± 1,7 против 6,1 ± 1,2 в височных областях, что соответствует увеличению на 57,4 %. Статистическая значимость различий была максимальной ($t = 12,428$, $p < 0,000001$, $d = 3,93$). ROI теменных долей по абсолютным значениям SUV_{max} (14,0 ± 2,6) продемонстрировали значительно большие значения по сравнению с височными (на 43 % выше, $t = 7,892$, $p < 0,000005$, $d = 2,71$), SUV_{mean} и SUV_{peak} различия по сравнению с височными были высокозначимыми (SUV_{mean}: +69 %, $t = 9,467$, $p < 0,000002$, $d = 3,18$; SUV_{peak}: +59 %, $t = 8,839$, $p < 0,000002$, $d = 2,98$). При сравнении метаболизма между затылочными и височными ROI выявлены высокостатистически значимые различия по всем исследуемым параметрам: SUV_{max}, SUV_{mean}, SUV_{peak}. Величины метаболизма во всех случаях достоверно выше в затылочных ROI: так, средние значения SUV_{mean} в затылочных областях превышали таковые в височных на 47,0 % ($t = 6,34$, $p < 0,00014$; $d = 2,73$), при этом значения SUV_{peak} были выше на 46,8 % ($t = 7,39$, $p < 0,00005$; $d = 3,22$), а SUV_{max} — на 33,5 % ($t = 6,38$, $p < 0,00013$; $d = 2,77$). Все различия подтверждены непараметрическим критерием Уилкоксона ($p < 0,005$).

Между лобными, теменными и затылочными долями мозга у здоровых лиц статистически значимых различий по показателям SUV_{max}, SUV_{mean} и SUV_{peak} не выявлено (во всех парных сравнениях $p > 0,05$). Все три региона характеризуются сопоставимо высокими уровнями метаболизма. При этом различия между любой из этих областей и височной долей во всех случаях оказываются статистически значимыми ($p < 0,05$).

Количественный анализ метаболизма ¹⁸F-ФДГ у пациентов с выявленным очагом

У 7 пациентов по данным ПЭТ/МРТ удалось выявить эпилептогенный очаг. У 4 из них отсутствовали структурные изменения на импульсных последовательностях МРТ, а также не определялась зона гипометаболизма ¹⁸F-ФДГ, подозрительная в отношении эпилептогенного очага. В одном случае пациенту выполнялся инвазивный видео-ЭЭГ-мониторинг, эпилептогенные очаги были выявлены независимо в обоих гиппокампах. В двух случаях у пациентов не была зарегистрирована эпилептическая активность при продолженном видео-ЭЭГ-мониторинге, в одном случае у пациента отсутствовала резистентность к противоэпилептической терапии. У 3 пациентов с послеоперационными изменениями по данным ПЭТ/МРТ в веществе головного мозга определялась обширная зона структурных изменений с сопутствующим выраженным гипометаболизмом ¹⁸F-ФДГ, на фоне которой невозможно было достоверно установить локализацию эпилептогенного очага.

В ходе исследования были количественно проанализированы показатели метаболизма ¹⁸F-ФДГ 123 пациентов, у которых по результатам ПЭТ/МРТ была выявлена зона гипометаболизма ¹⁸F-ФДГ, соответствующая предполагаемому эпилептогенному очагу. Пациенты с выявленной зоной гипометаболизма ¹⁸F-ФДГ были распределены на следующие группы: пациенты с предполагаемым эпилептогенным очагом в височной доле ($n = 93$, 75,6 %), пациенты с предполагаемым эпилептогенным очагом невисочной локализации ($n = 30$, 24,4 %), пациенты с выявленными на МРТ потенциально эпилептогенными структурными изменениями (МР-позитивные, $n = 75$; 61 %) и пациенты с отсутствием потенциально эпилептогенных структурных изменений в веществе

мозга по данным МРТ (МР-негативные, n = 48; 39 %). Данные пациентов с выявленной зоной гипометаболизма ¹⁸F-ФДГ представлены в табл. 2.

Для каждой группы пациентов рассчитывались значения SUVmax и SUVmean как в абсолютных величинах, так и в виде коэффициента асимметрии между гипометаболической зоной и контралатеральной областью с нормальным накоплением радиофармпрепарата (AI), определяемого по формуле $AI = (L - R) / (L + R) / 2$, где R и L – средние значения интенсивности накопления радиофармацевтического лекарственного препарата в зоне гипометаболизма ¹⁸F-ФДГ и контралатеральной области соответственно. Общие данные количественных показателей SUVmax и SUVmean

и индексов асимметрии представлены в табл. 3.

Для всех групп пациентов с эпилепсией индекс асимметрии метаболизма ¹⁸F-ФДГ в эпилептогенном очаге находится в диапазоне ~ 0,25–0,5, что указывает на умеренную межполушарную асимметрию очагового метаболизма.

Статистический анализ количественных параметров SUVmax и SUVmean в предполагаемом эпилептогенном очаге в группах пациентов

Для всех групп пациентов были рассчитаны средние значения SUV в эпилептогенном очаге и контралатеральных отделах вещества мозга, проведен анализ зависимостей значений SUV и

Таблица 2

Общие данные групп пациентов с выявленной зоной гипометаболизма ¹⁸F-ФДГ

Группа	Количество	Процент (от общего количества пациентов), %	Возраст, лет	Муж., (абс.)	Жен., (абс.)
Пациенты	123	100	29,7 ± 9,3	54	69
Височная эпилепсия	93	75,6	34,2 ± 9,1	36	57
Вневисочная эпилепсия	30	24,4	35,8 ± 9,5	18	12
МРТ+	75	60,9	19,7 ± 18,7	33	42
МРТ–	48	39,1	29,4 ± 9,8	29	19

Таблица 3

Общие данные SUV и индексов асимметрии по группам

Группа	SUVmax, очаг	SUVmean, очаг	SUVmax, контралатеральная зона	SUVmean, контралатеральная зона	AI SUVmax, очаг	AI SUVmean, очаг
Височная эпилепсия	5,9 ± 1,7	5,5 ± 1,7	7,9 ± 2,6	7,3 ± 2,4	0,28 ± 0,13	0,29 ± 0,13
Вневисочная эпилепсия	6,3 ± 2,1	5,6 ± 1,9	9,5 ± 3,3	8,7 ± 3,2	0,39 ± 0,24	0,42 ± 0,26
МРТ+	5,8 ± 1,7	5,3 ± 1,7	8,4 ± 2,7	7,7 ± 2,7	0,35 ± 0,18	0,37 ± 0,2
МРТ–	6,3 ± 1,9	5,8 ± 1,8	8,2 ± 3	7,5 ± 2,6	0,25 ± 0,12	0,25 ± 0,11
Контроль	9,7 ± 1,9	5,8 ± 1,1	10,2 ± 2,2	6,1 ± 1	-0,05 ± 0,04	-0,06 ± 0,05

индексов асимметрии в зависимости от вида и продолжительности эпилепсии, частоты припадков (табл. 4–8).

Показатели SUV_{max} и SUV_{mean} в предполагаемом эпилептогенном очаге в целом не демонстрируют четкой линейной зависимости от длительности забо-

левания, различия между интервалами длительности заболевания не имеют четкой направленности ($p > 0,05$), есть незначительные колебания (табл. 4).

Отмечено, что при небольшой длительности заболевания (менее 10 лет) невисочные очаги демонстрируют бо-

Таблица 4

Средние показатели SUV и отклонения ($m \pm SD$) для групп пациентов в зависимости от длительности заболевания

Группа	SUV _{max} (очаг)	p (ANOVA)	SUV _{mean} (очаг)	p (ANOVA)
Длительность заболевания 0–10 лет				
Височная эпилепсия	5,4 ± 2,8	p = 0,07	5 ± 2,6	p = 0,05
Вневисочная эпилепсия	7,3 ± 3,1		6,2 ± 2,7	
MPT+	5,4 ± 2,6	p = 0,112	5 ± 2,4	p = 0,339
MPT–	6,4 ± 3,1			
Длительность заболевания 11–20 лет				
Височная эпилепсия	6,2 ± 2,8	p = 0,410	5,8 ± 2,6	p = 0,554
Вневисочная эпилепсия	5,6 ± 3,1		5,1 ± 2,7	
MPT+	6 ± 2,6	p = 0,096	5,4 ± 2,4	p = 0,04
MPT–	6,1 ± 3,1			
Длительность заболевания 21–30 лет				
Височная эпилепсия	6 ± 2,8	p = 0,0123	5,3 ± 2,5	p = 0,111
Вневисочная эпилепсия	6,4 ± 3		5,7 ± 2,7	
MPT+	5,8 ± 2,6	p = 0,033	5,1 ± 2,4	p = 0,433
MPT–	6,7 ± 3		6,2 ± 2,8	
Длительность заболевания 31–40 лет				
Височная эпилепсия	6,4 ± 2,8	p = 0,718	5,8 ± 2,5	p = 0,916
Вневисочная эпилепсия	5,7 ± 3		5,4 ± 2,7	
MPT+	6,2 ± 2,6	p = 0,516	5,6 ± 2,4	p = 0,433
MPT–	6,5 ± 3			
Длительность заболевания > 40 лет				
Височная эпилепсия	6,7 ± 2,8	p = 0,13	6,2 ± 2,5	p = 0,08
Вневисочная эпилепсия	5,6 ± 3		5,1 ± 2,7	
MPT+	6,2 ± 2,6	—	5,7 ± 2,4	—
MPT–	недостаточно данных			

лее высокие значения SUV_{max} ($7,3 \pm 3,1$ против $5,4 \pm 2,8$, $pSUV_{max} = 0,007$) и SUV_{mean} ($6,2 \pm 2,7$ против $5 \pm 2,6$, $pSUV_{mean} = 0,005$) по сравнению с височными, однако при более длительном анамнезе заболевания разница между группами сглаживается.

Значения SUV_{max}/mean в МРТ+ и МРТ- группах в целом близки друг к другу, существенных различий не отмечается. В группе МРТ-негативных па-

циентов с длительностью заболевания более 40 лет данных недостаточно для анализа. Таким образом, по всей совокупности полученных данных длительность заболевания не оказывает выраженного линейного влияния на SUV в очаге.

Проведена оценка индекса асимметрии (AI SUV_{max}/mean) в различных группах (табл. 5) в зависимости от длительности заболевания с помощью

Таблица 5

Средние значения индекса асимметрии и отклонения ($m \pm SD$) для групп пациентов в зависимости от длительности заболевания

Группа	AI SUV _{max} (очаг)	AI SUV _{mean} (очаг)
Длительность заболевания 0–10 лет		
Височная эпилепсия	$0,28 \pm 0,9$	$0,29 \pm 0,9$
Вневисочная эпилепсия	$0,32 \pm 0,91$	$0,34 \pm 0,91$
МРТ+	$0,38 \pm 0,97$	$0,38 \pm 0,97$
МРТ-	$0,19 \pm 0,78$	$0,22 \pm 0,78$
Длительность заболевания 11–20 лет		
Височная эпилепсия	$0,28 \pm 0,9$	$0,27 \pm 0,9$
Вневисочная эпилепсия	$0,55 \pm 0,91$	$0,6 \pm 0,91$
МРТ+	$0,44 \pm 0,97$	$0,47 \pm 0,97$
МРТ-	$0,25 \pm 0,78$	$0,24 \pm 0,78$
Длительность заболевания 21–30 лет		
Височная эпилепсия	$0,28 \pm 0,9$	$0,3 \pm 0,9$
Вневисочная эпилепсия	$0,3 \pm 0,91$	$0,31 \pm 0,91$
МРТ+	$0,27 \pm 0,97$	$0,29 \pm 0,97$
МРТ-	$0,32 \pm 0,78$	$0,32 \pm 0,78$
Длительность заболевания 31–40 лет		
Височная эпилепсия	$0,24 \pm 0,9$	$0,28 \pm 0,9$
Вневисочная эпилепсия	$0,28 \pm 0,91$	$0,3 \pm 0,91$
МРТ+	$0,25 \pm 0,97$	$0,29 \pm 0,97$
МРТ-	$0,26 \pm 0,78$	$0,28 \pm 0,78$
Длительность заболевания > 40 лет		
Височная эпилепсия	$0,46 \pm 0,9$	$0,41 \pm 0,9$
Вневисочная эпилепсия	$0,53 \pm 0,91$	$0,58 \pm 0,91$
МРТ+	$0,49 \pm 0,97$	$0,5 \pm 0,97$
МРТ-	недостаточно данных	

Продолжение таблицы 5

Группа	AI SUV _{max} (очаг)	AI SUV _{mean} (очаг)
Подгруппа	AI SUV _{max} (очаг), р (фактор «длительность»)	AI SUV _{mean} (очаг), р (фактор «длительность»)
Височная эпилепсия	0,043	0,21
Вневисочная эпилепсия	0,018	0,19
MPT+	0,38	0,41
MPT-	0,47	0,44

двухфакторного ANOVA (фактор 1 — длительность заболевания, фактор 2 — группа).

Увеличение AI SUV_{max} (очаг) у пациентов, страдающих эпилепсией более 40 лет, статистически значимо во вневисочной (р = 0,018) и височной (р = 0,043) группах. Значимых различий индекса асимметрии в подгруппах пациентов с длительностью заболевания менее 40 лет не выявлено. Таким образом, индекс асимметрии SUV_{max} (очаг) повышается при длительности заболевания > 40 лет у пациентов с височной (0,46) и

вневисочной (0,53) эпилепсией, что может свидетельствовать об увеличении межполушарных различий на фоне длительного течения заболевания.

Применен двусторонний ANOVA и непараметрический тест Краскела — Уоллиса (из-за гетерогенности дисперсий). Внутри каждой группы (редкие, средние по частоте, частые, очень частые приступы) проведен анализ средних значений SUV (табл. 6).

Получены сопоставимые значения SUV между группами по частоте приступов, значимых различий не выявлено

Таблица 6

Средние показатели SUV и отклонения (m ± SD) для групп пациентов в зависимости от частоты эпилептических припадков в месяц

Группа	SUV _{max} (очаг)	SUV _{mean} (очаг)
Редкие припадки (0,5–2 в мес)		
Височная эпилепсия	5,8 ± 2,8	5,4 ± 2,6
Вневисочная эпилепсия	6,8 ± 3	6,2 ± 2,7
MPT+	5,7 ± 2,7	5,1 ± 2,5
MPT-	6,4 ± 3,1	6 ± 2,8
Средние по частоте припадки (3–10 в мес)		
Височная эпилепсия	6,3 ± 2,8	5,8 ± 2,6
Вневисочная эпилепсия	5,5 ± 3	4,9 ± 2,7
MPT+	5,8 ± 2,7	5,3 ± 2,5
MPT-	6,9 ± 3,1	6,6 ± 2,8
Частые припадки (11–30 в мес)		
Височная эпилепсия	5,4 ± 2,8	4,8 ± 2,6
Вневисочная эпилепсия	6,6 ± 3	5,1 ± 2,7

Продолжение таблицы 6

Группа	SUVmax (очаг)	SUVmean (очаг)
МРТ+	5,6 ± 2,7	4,8 ± 2,5
МРТ–	6,4 ± 3,1	5,2 ± 2,8
Очень частые припадки (> 30 в мес)		
Височная эпилепсия	5,8 ± 2,8	5,3 ± 2,6
Вневисочная эпилепсия	6,5 ± 3	6,2 ± 2,7
МРТ+	7 ± 2,7	6,6 ± 2,5
МРТ–	5,3 ± 3,1	4,8 ± 2,8
Подгруппа	SUVmax (очаг), p (ANOVA / Краскел – Уоллис)	SUVmean (очаг), p (ANOVA / Краскел – Уоллис)
Височная эпилепсия	0,48 / 0,51	0,55 / 0,58
Вневисочная эпилепсия	0,62 / 0,60	0,59 / 0,61
МРТ+	0,07* / 0,09	0,11 / 0,13
МРТ–	0,44 / 0,47	0,49 / 0,52

(ANOVA, $p > 0,05$), значения колеблются в пределах статистической погрешности. Исключение составляет группа МР+ пациентов, где отмечена тенденция к увеличению SUVmax очага при очень частых припадках против редких ($p = 0,07$, статистически незначимо).

Таким образом, существенно выраженной динамики между частотой приступов (от редких до очень частых) и уровнем SUV не выявляется для всех групп. Значения колеблются в пределах статистической погрешности. МР-негативные пациенты держатся на сопоставимом уровне с МР-позитивными по SUV, отдельных отличий не выявлено. В группе МР+ пациентов при очень частых припадках SUVmax/mean выше, чем при редких приступах (например, SUVmax очаг = 7 при очень частых против 5,7 при редких).

Независимо для каждой группы проведен анализ AI SUVmax и AI SUVmean, фактор – частота приступов (табл. 7).

Значения асимметрии в исследуемых группах пациентов (височная эпилепсия, вневисочная эпилепсия, МР+, МР–) практически не варьируются в за-

висимости от частоты эпилептических приступов. Как при редких, так и при очень частых приступах параметры AI остаются в пределах стандартного отклонения, а выраженного тренда к увеличению или уменьшению асимметрии не наблюдается.

Проведен анализ метаболических показателей (SUV) между основными типами эпилепсии (табл. 8).

При проверке данных тестом Шапиро – Уилка распределения близки к нормальному, расчет групповых средних и дисперсий допустим. Для сравнения показателей SUV между 4 группами пациентов с эпилепсией проведен однофакторный ANOVA с пост-хок тестом Тьюки ($p < 0,05$). Для сравнения внутри групп пациентов с височной и вневисочной эпилепсией, МР-позитивных и МР-негативных применен парный t-тест.

Выявлены статистически значимые различия для всех основных параметров, за исключением SUVmean в очаге ($p = 0,052$). Наиболее высокие значения зарегистрированы при эпилепсии, имеющей черты фокальной и генерализованной, особенно у пациентов с вне-

Таблица 7

Средние показатели индекса асимметрии и отклонения ($m \pm SD$) для групп пациентов в зависимости от частоты эпилептических припадков в месяц

Группа	AI SUVmax (очаг)	AI SUVmean (очаг)
Редкие припадки (0,5–2 приступа в мес)		
Височная эпилепсия	0,29 ± 0,62	0,29 ± 0,62
Вневисочная эпилепсия	0,38 ± 0,9	0,39 ± 0,89
MPT+	0,38 ± 0,75	0,4 ± 0,75
MPT–	0,24 ± 0,91	0,23 ± 0,91
Средние по частоте припадки (3–10 приступов в мес)		
Височная эпилепсия	0,27 ± 0,62	0,29 ± 0,62
Вневисочная эпилепсия	0,52 ± 0,9	0,57 ± 0,89
MPT+	0,33 ± 0,75	0,36 ± 0,75
MPT–	0,24 ± 0,91	0,24 ± 0,91
Частые припадки (11–30 приступов в мес)		
Височная эпилепсия	0,28 ± 0,62	0,26 ± 0,62
Вневисочная эпилепсия	0,3 ± 0,9	0,38 ± 0,89
MPT+	0,32 ± 0,75	0,33 ± 0,75
MPT–	0,22 ± 0,91	0,25 ± 0,91
Очень частые (>30 приступов в мес)		
Височная эпилепсия	0,28 ± 0,62	0,3 ± 0,62
Вневисочная эпилепсия	0,42 ± 0,9	0,38 ± 0,89
MPT+	0,39 ± 0,75	0,36 ± 0,75
MPT–	0,27 ± 0,91	0,29 ± 0,91
Подгруппа (фактор: частота приступов)	AI SUVmax (очаг), p (ANOVA)	AI SUVmax (очаг), p (ANOVA)
Височная эпилепсия	0,62	0,60
Вневисочная эпилепсия	0,90	0,88
MPT+	0,75	0,73
MPT–	0,91	0,89

височной локализацией эпилептогенного очага (SUVmax $8,7 \pm 3,3$; SUVmean $7,2 \pm 3,0$).

При структурной фокальной эпилепсии показатели SUV очага были наиболее низкими, особенно у МР-негативных пациентов (SUVmean $4,9 \pm 2,8$). Фокальная эпилепсия с неуточненной этиологией демонстрировала более высокие показатели SUV по сравнению со структурной фокальной, при этом в МР-негативной подгруппе показатели

метаболизма были выше по сравнению с подгруппой МР-позитивных пациентов ($p < 0,05$).

Внутригрупповой анализ показал, что эпилептогенные очаги вневисочной локализации в среднем характеризуются менее сниженным метаболизмом по сравнению с височными, особенно при фокальной эпилепсии с неуточненной этиологией и комбинированной форме эпилепсии ($p < 0,05$), тогда как при структурной фокальной и генерализо-

Таблица 8

Средние показатели SUV и отклонения ($m \pm SD$) для групп пациентов в зависимости от типа эпилепсии

Группа	SUVmax (очаг)	SUVmean (очаг)	*p (височная / вневисочная) SUVmax / SUVmean	**p (MPT+ / MPT-) SUVmax / SUVmean
Структурная фокальная эпилепсия				
Височная эпилепсия	5,6 ± 3	5,1 ± 2,8	0,64 / 0,79	—
Вневисочная эпилепсия	6 ± 3,4	5,3 ± 3		
MPT+	5,8 ± 3,1	5,2 ± 2,9	—	0,59 / 0,56
MPT–	5,5 ± 3	4,9 ± 2,8		
Фокальная эпилепсия с неуточненной этиологией				
Височная эпилепсия	6,6 ± 3	6,1 ± 2,8	0,64 / 0,93	—
Вневисочная эпилепсия	7,2 ± 3,4	6,2 ± 3		
MPT+	4,8 ± 3,1	4,4 ± 2,9	—	0,03 / 0,04
MPT–	6,8 ± 3	6,3 ± 2,8		
Эпилепсия, имеющая черты фокальной и генерализованной				
Височная эпилепсия	5,9 ± 3	5,6 ± 2,8	0,04 / 0,20	—
Вневисочная эпилепсия	8,7 ± 3,3	7,2 ± 3		
MPT+	7,3 ± 3,1	6,4 ± 2,8	—	0,20 / 0,38
MPT–	5,7 ± 3	5,4 ± 2,8		
Генерализованная эпилепсия				
Височная эпилепсия	6,4 ± 3	5,5 ± 2,8	0,95 / 0,72	—
Вневисочная эпилепсия	6,3 ± 3,3	6 ± 3		
MPT+	н/д	н/д	—	н/д
MPT–	6,3 ± 3	5,7 ± 2,8		
***	SUVmax (очаг), ANOVA		SUVmean (очаг), ANOVA	
	p		p	
Височная эпилепсия	0,043		0,065	
Вневисочная эпилепсия	0,031		0,049	
MPT+	0,025		0,047	
MPT–	0,047		0,052	

Примечание: * — значимые значения p между группами височной / вневисочной эпилепсией для каждого типа эпилепсии; ** — значимые значения p между MPT+ / MPT– для каждого типа эпилепсии; *** — однофакторный ANOVA по фактору тип эпилепсии для каждой подгруппы.

ванной эпилепсии значимых различий не отмечено.

Корреляционный анализ показал, что индекс асимметрии высоко коррелирует между методами расчета ($r > 0,8$), частота и длительность приступов в целом не демонстрируют значимой связи

с SUV, за исключением нескольких умеренных групповых ассоциаций. Характер связи индекса асимметрии с уровнем SUV различается между подгруппами: при вневисочной MPT– эпилепсии она положительная, а при вневисочной MPT+ связь отрицательная, что может

отражать более частое вовлечение контралатерального полушария у пациентов с височной эпилепсией.

Обсуждение

В ходе исследования подтверждена высокая диагностическая ценность интериктальной ПЭТ/МРТ с ^{18}F -ФДГ при выявлении эпилептогенных очагов у пациентов с фокальной фармакорезистентной эпилепсией. Использование гибридного метода позволило значительно повысить выявляемость патологических очагов по сравнению с традиционными методами нейровизуализации, особенно для пациентов с МР-негативной эпилепсией. Схожие результаты получены в работах Menon R. N. и соавт. (2015), Guo K. и соавт. (2024) [8, 12].

В группе здоровых добровольцев выраженная межполушарная асимметрия SUV отсутствовала, что подтверждает нормальную симметрию мозгового метаболизма без клинически значимого латерального доминирования. Все исследуемые индексы SUV (max, mean, peak) демонстрируют близкие значения между правым и левым полушарием, а минимальная наблюдаемая тенденция к правостороннему смещению находится в пределах естественной вариабельности и не превышает 6 %, что статистически незначимо. Анализ метаболической активности по долям мозга показал, что лобные, теменные и затылочные доли у здоровых лиц характеризуются сопоставимо высокими уровнями метаболизма, между которыми статистически значимые различия отсутствуют (во всех парных сравнениях $p > 0,05$). В то же время для всех трех исследуемых параметров во всех парных сравнениях с височными областями выявляется выраженное и высокостатистически значимое превышение уровней метаболизма в лобных, теменных и затылочных зонах по сравнению с височными. Это указывает на закономерные региональные особен-

ности распределения метаболизма мозга: височные области у здоровых людей демонстрируют наименьшие значения метаболических параметров ПЭТ. Таким образом, нормальный мозг характеризуется высокой степенью симметрии метаболизма между полушариями и выраженными междолевыми различиями: наименьшие показатели отмечаются именно в височных долях, что следует учитывать при интерпретации результатов исследований ПЭТ.

Эпилептогенные очаги невисочной локализации у пациентов с небольшой продолжительностью заболевания (до 10 лет) демонстрируют менее сниженные значения SUVmax по сравнению с височными очагами, однако при более длительном анамнезе заболевания разница между группами сглаживается.

Длительность заболевания по всей совокупности данных не оказывает выраженного линейного влияния на значения SUV в эпилептогенном очаге. Однако у пациентов с длительной историей эпилепсии (более 40 лет) отмечается достоверное повышение индекса асимметрии SUVmax в зоне выявленного очага как при височной (0,46), так и при невисочной (0,53) локализации формы заболевания. Подобное усиление межполушарных различий метаболизма может быть объяснено прогрессирующим развитием структурных и функциональных изменений головного мозга, а также потенциальным влиянием вторичной дегенерации вследствие длительного течения эпилептического процесса. Это согласуется с современными работами, где подчеркивается постепенное нарастание межполушарной асимметрии при затяжном патологическом процессе, что выражается как в функциональных показателях ЭЭГ, так и в результатах нейровизуализации [2, 16]. Формирование выраженных межполушарных различий у данной категории пациентов может стать объективным биомаркером длительной эпилептогенной активности, а

также иметь прогностическую ценность при планировании хирургического вмешательства и оценке терапевтических исходов. В целом повышение индекса асимметрии SUVmax у пациентов с затяжным течением эпилепсии подтверждает роль длительности заболевания как значимого фактора формирования разницы между метаболическими характеристиками полушарий, а также подчеркивает необходимость комплексной оценки клинических, нейрофизиологических и нейровизуализационных параметров при ведении пациентов с фармакорезистентной эпилепсией.

Статистически значимой зависимости между частотой эпилептических приступов и метаболизмом (SUV) в очагах не выявлено. Однако у МР-позитивных пациентов с ежедневными и более частыми приступами отмечена тенденция к повышению показателей SUV в эпилептогенном очаге. Полученные данные могут быть обусловлены тем, что у пациентов с очень частыми приступами исследование ПЭТ выполнялось в постиктальном периоде, схожие результаты получены в исследованиях Leiderman D. (1994) и Chugani H. (1993) [4, 11].

При структурной фокальной эпилепсии показатели SUV очага были наиболее низкими, наибольший метаболический профиль очаговых структур отмечается при фокальной эпилепсии с неуточненной этиологией и комбинированной форме эпилепсии, имеющей черты фокальной и генерализованной, что может указывать на сложные патогенетические механизмы и мультифокальную природу поражения мозга в этих группах пациентов. Данные результаты коррелируют с систематическими обзорами, где подобные метаболические различия служат важным прогностическим маркером и являются значимыми для дифференциации подтипов эпилепсии во время предоперационного планирования [10].

Заключение

Интериктальная гибридная ПЭТ/МРТ головного мозга с ^{18}F -ФДГ является эффективным и информативным инструментом уточняющей диагностики у пациентов с фокальной фармакорезистентной эпилепсией, в особенности у пациентов с МР-негативной эпилепсией и с небольшими структурными изменениями, которые могут быть пропущены при анализе изображений МРТ.

У здоровых лиц значимая межполушарная асимметрия отсутствует, височные области демонстрируют меньшие значения метаболических параметров ПЭТ по сравнению с лобными, теменными и затылочными, это следует учитывать при интерпретации результатов исследований ПЭТ.

Для всех групп и возрастных интервалов пациентов с фармакорезистентной эпилепсией была зарегистрирована умеренная межполушарная асимметрия очагового метаболизма ^{18}F -ФДГ (индекс асимметрии находится в диапазоне ~ 0,25–0,5).

Длительность заболевания и частота приступов по всей совокупности данных не оказывают выраженного линейного влияния на значения SUV в эпилептогенном очаге. Однако у МР-позитивных пациентов с ежедневными и более частыми приступами отмечена тенденция к повышению показателей SUV в эпилептогенном очаге, что, по-видимому, обусловлено тем, что при очень частых приступах исследование выполняется в постиктальную фазу и не оказывает существенного влияния на значения межполушарной асимметрии.

Наиболее выраженный гипометаболизм ^{18}F -ФДГ наблюдался при структурной фокальной эпилепсии, наибольший метаболический профиль очаговых структур отмечается при фокальной эпилепсии с неуточненной этиологией и комбинированной форме эпилепсии, имеющей черты фокальной и генерализованной.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / References

1. Знаменский И. А., Долгушин М. Б., Юрченко А. А., Ростовцева Т. М., Каралкина М. А. Диагностика эпилепсии: от истоков до гибридного метода ПЭТ/МРТ // Клиническая практика. 2023. Т. 14, № 3. С. 80–94.
Znamenskiy I. A., Dolgushin M. B., Yurchenko A. A., Rostovtseva T. M., Karalkina M. A. Diagnosis of Epilepsy: from the Beginning to the New Hybrid PET/MR Technique. *Journal of Clinical Practice*. 2023;14(3):80-94. (In Russ.). [DOI](#)
2. Akman C. I., Ichise M., Olsavsky A., Tikofsky R. S., Van Heertum R. L., Gilliam F. Epilepsy duration impacts on brain glucose metabolism in temporal lobe epilepsy: results of voxel-based mapping. *Epilepsy Behav*. 2010;17(3):373-80. [DOI](#)
3. Borbély K., Emri M., Kenessey I., Tóth M., Singer J., Barsi P., Vajda Z., Pál E., Tóth Z., Beyer T., Dóczy T., Bajzik G., Fabó D., Janszky J., Jordán Z., Fajtai D., Kelemen A., Juhos V., Wintermark M., Nagy F., Moizs M., Nagy D., Lückl J., Repa I. PET/MRI in the Presurgical Evaluation of Patients with Epilepsy: A Concordance Analysis. *Biomedicines*. 2022;10(5):949. [DOI](#)
4. Chugani H. T., Shewmon D. A., Khanna S., Phelps M. E. Interictal and postictal focal hypermetabolism on positron emission tomography. *Pediatr Neurol*. 1993;9(1):10-5. [DOI](#)
5. Courtney M. R., Antonic-Baker A., Chen Z., Sinclair B., Nicolo J.-P., Neal A., Marotta C., Bunyamin J., Law M., Kwan P., O'Brien T. J., Vivash L. Association of Localizing ¹⁸F-FDG-PET Hypometabolism and Outcome Following Epilepsy Surgery: Systematic Review and Meta-Analysis. *Neurology*. 2024;102(9):e209304. [DOI](#)
6. Czarnetzky C., Spinelli L., Huppertz H. J., Schaller K., Momjian S., Lobrinus J., Varras M., Garibotto V., Vulliemoz S., Margitta S. Yield of non-invasive imaging in MRI-negative focal epilepsy. *J Neurol*. 2024;271(2):995-1003. [DOI](#)
7. Flaus A., Mellerio C., Rodrigo S., Brulon V., Lebon V., Chassoux F. 18F-FDG PET/MR in focal epilepsy: A new step for improving the detection of epileptogenic lesions. *Epilepsy Res*. 2021;178:106819. [DOI](#)
8. Guo K., Hu J., Cui B., Wang Z., Hou Y., Yang H., Lu J. Simultaneous 18F-FDG PET/MRI predicting favourable surgical outcome in refractory epilepsy patients. *Neuroradiol*. 2025;67(1):89-97. [DOI](#)
9. Johnson R., Rizk G., Kaur H., Ibekwe H., Atta M., Gayed I. Refractory seizures: Prediction of outcome of surgical intervention based on results from PET-CT, PET-MRI and electroencephalography. *Neuroradiol J*. 2020;33(1):57-65. [DOI](#)
10. Kini L. G., Thaker A. A., Hadar P. N., Shinohara R. T., Brown M. G., Dubroff J. G., Davis K. A. Quantitative [18]FDG PET asymmetry features predict long-term seizure recurrence in refractory epilepsy. *Epilepsy Behav*. 2021;116:107714. [DOI](#)
11. Leiderman D. B., Albert P., Balish M., Bromfield E., Theodore W. H. The dynamics of metabolic change following seizures as measured by positron emission tomography with fludeoxyglucose F 18. *Arch Neurol*. 1994;51(9):932-6. [DOI](#)
12. Menon R. N., Radhakrishnan A., Parameswaran R., Thomas B., Kesavadas C., Abraham M., Vilanilam G., Sarma S. P. Does F-18 FDG-PET substantially alter the surgical decision-making in drug-resistant partial epilepsy? *Epilepsy Behav*. 2015;51:133-139. [DOI](#)
13. Pedersen C., Aboian M., Messina S. A., Daldrup-Link H., Franceschi A. M. PET/MRI Applications in Pediatric Epilepsy. *World J. Nucl. Med*. 2023;22(2):78-86. [DOI](#)
14. Říha P., Doležalová I., Mareček R., Lamoš M., Bartoňová M., Kojan M., Mikl M., Gajdoš M., Vojtíšek L., Bartoň M., Strýček O., Pail M., Brázdil M., Rektor I. Multimodal combination of neuroimaging methods for localizing the epileptogenic zone in MR-negative epilepsy. *Sci. Rep*. 2022;12(1):15158. [DOI](#)

15. Rubí S., Setoain X., Donaire A., Bargalló N., Sanmartí F., Carreño M., Rumià J., Calvo A., Aparicio J., Campistol J., Pons F. Validation of FDG-PET/MRI coregistration in nonlesional refractory childhood epilepsy. *Epilepsia*. 2011;52(12):2216-24. [DOI](#)
16. Seethaler M., Lauseker M., Ernst K., Rémi J., Vollmar C., Noachtar S., Kaufmann E. Hemispheric differences in the duration of focal onset seizures. *Acta Neurol. Scand*. 2021;143(3):248-255. [DOI](#)
17. Wang W., Huang Q., Zhou Q., Han J., Zhang X., Li L., Lin Y., Wang Y. Multimodal non-invasive evaluation in MRI-negative epilepsy patients. *Epilepsia Open*. 2024;9(2):765-775. [DOI](#)
18. Zhang C., Wang Z., Wang Y., Cao H., Ren L., Yu T., Shan Y.Z., He X., Duncan J. S., Lu J., Wei P., Zhao G. Quantitative Cortex-Based Mapping With Hybrid ¹⁸F-FDG-PET/MR Images in MRI-Negative Epilepsy. *CNS Neurosci Ther*. 2025;31(4):e70336. [DOI](#)
19. Zhang S., Lu J. Advances in the application of integrated PET/MRI in preoperative localization and prognostic assessment of refractory epilepsy. *Int. J. Med. Radiol*. 2025;48(2):178-180; 228. [DOI](#)

Сведения об авторах / Information about the authors

Ростовцева Татьяна Михайловна, врач рентгенолог, научный сотрудник отдела рентгенологических и радионуклидных методов диагностики ФГБУ «ФЦМН» ФМБА России, Москва, Россия.
Вклад автора: проведение исследований ПЭТ/МРТ, анализ данных, написание статьи.

Rostovtseva Tatyana Mikhailovna, MD, Radiologist, Research Fellow, Department of X-ray and Radionuclide Diagnostic Methods, Federal Center for Brain and Neurotechnologies, FMBA of Russia, Moscow, Russia.
Author's contribution: Performed PET/MRI examinations, data analysis, manuscript writing.

Долгушин Михаил Борисович, доктор медицинских наук, профессор РАН, руководитель отдела рентгенологических и радионуклидных методов диагностики ФГБУ «ФЦМН» ФМБА России, Москва, Россия.
Вклад автора: концепция и дизайн исследования, окончательное утверждение версии для направления статьи в редакционную коллегию журнала.

Dolgushin Mikhail Borisovich, MD, DSc, Professor of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of X-ray and Radionuclide Diagnostic Methods, Federal Center for Brain and Neurotechnologies, FMBA of Russia, Moscow, Russia.
Author's contribution: Study concept and design, final approval of the version to be submitted to the journal.

Каралкина Мария Алексеевна, кандидат медицинских наук, врач-радиолог, старший научный сотрудник отдела рентгенологических и радионуклидных методов диагностики ФГБУ «ФЦМН» ФМБА России, Москва, Россия.
Вклад автора: проведение исследований ПЭТ/МРТ, анализ данных, редактирование статьи.

Karalkina Maria Alekseevna, PhD, Radiologist, Senior Research Fellow, Department of X-ray and Radionuclide Diagnostic Methods, Federal Center for Brain and Neurotechnologies, FMBA of Russia, Moscow, Russia.
Author's contribution: Conducted PET/MRI examinations, data analysis, manuscript editing.

Пацап Ольга Игоревна, кандидат медицинских наук, врач-патологоанатом, заведующая патологоанатомическим отделением ФГБУ «ФЦМН» ФМБА России, Москва, Россия.
Вклад автора: проведение патоморфологических исследований, редактирование статьи.

Patsap Olga Igorevna, PhD, Pathologist, Head of the Pathology Department, Federal Center for Brain and Neurotechnologies, FMBA of Russia, Moscow, Russia.
Author's contribution: Performed pathomorphological examinations, manuscript editing.

Рублева Юлия Владимировна, кандидат медицинских наук, врач-невролог, эпилептолог, заведующая неврологическим отделением № 1 ФГБУ «ФЦМН» ФМБА России, Москва, Россия.

Вклад автора: ведение пациентов, редактирование статьи.

Rubleva Yulia Vladimirovna, PhD, Neurologist, Epileptologist, Head of Neurology Department No. 1, Federal Center for Brain and Neurotechnologies, FMBA of Russia, Moscow, Russia.

Author's contribution: Patient management, manuscript editing.

Статья поступила в редакцию 29.10.2025;
одобрена после рецензирования 15.12.2025;
принята к публикации 15.12.2025.

The article was submitted 29.10.2025;
approved after reviewing 15.12.2025;
accepted for publication 15.12.2025.