ISSN print 2414-4495, ISSN online 2710-1444, https://msz.knmu.edu.ua, msz.journal@knmu.edu.ua

УДК: 616.853-089-053.2:615.212.7:616-073.75+616-073.75-073.7

ІНТЕГРАЦІЯ ДАНИХ ПОЗИТРОННО-ЕМІСІЙНОЇ ТОМОГРАФІЇ ТА КОМП'ЮТЕРНОЇ ТОМОГРАФІЇ З НЕЙРОВІЗУАЛІЗАЦІЄЮ ВИСОКОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ДЛЯ ПЕРСОНАЛІЗОВАНОГО ПЛАНУВАННЯ ХІРУРГІЧНОГО ВТРУЧАННЯ ПРИ ФАРМАКОРЕЗИСТЕНТНІЙ ЕПІЛЕПСІЇ У ДІТЕЙ

Олійніченко О.Г.

Національний медичний університет ім. О.О. Богомольця, Київ, Україна

Актуальність. Фармакорезистентна епілепсія у дітей залишається однією з найскладніших проблем дитячої неврології, оскільки відсутність контролю над нападами після медикаментозного лікування потребує раннього виявлення епілептогенної зони та точного передопераційного планування. Інтеграція даних позитронно-емісійної томографії з комп'ютерною томографією з 18F-фтордезоксиглюкозою (ПЕТ-КТ з 18F-ФДГ) та нейровізуалізації високої роздільної здатності відкриває нові можливості для персоналізованого підходу.

Мета. Оцінити діагностичну та прогностичну цінність інтегрованого підходу, що поєднує дані ПЕТ-КТ з 18F-ФДГ та нейровізуалізації високої роздільної здатності у виявленні та визначенні локалізації епілептогенної зони для персоналізованого хірургічного планування у дітей із фармакорезистентною епілепсією.

Матеріали та методи. Проведено ретроспективний аналіз 150 амбулаторних карт дітей віком від 1 до 17 років із фармакорезистентною епілепсією в Центрі ядерної медицини КНП «Київський міський клінічний онкологічний центр» у 2021–2023 рр. Пацієнтів було розділено на чотири вікові групи. Виконано порівняння даних електроенцефалографії (ЕЕГ), магнітно-резонансної томографії (МРТ) високої роздільної здатності та ПЕТ-КТ із 18F-ФДГ.

Етика дослідження. Дослідження проводилося за письмовою згодою батьків дітей, з дотриманням положень Гельсінської декларації Всесвітньої медичної асоціації (1964–2024).

Результати. Структурні зміни головного мозку за МРТ виявлено у 43,3 % обстежених, а метаболічні порушення за ПЕТ-КТ – у 68,7 % дітей, включаючи випадки з негативними МРТ-результатами. Кількісний аналіз за допомогою програмного комплексу CortexID 3.2 (GE Healthcare, США) виявився ефективним інструментом об'єктивізації результатів ПЕТ-КТ. Це підвищує відтворюваність результатів та сприяє персоналізованому вибору хірургічної тактики. Кореляційний аналіз показав вірогідний зв'язок між зонами гіпометаболізму за ПЕТ-КТ та фокальною епілептичною активністю за ЕЕГ ($r=+0,577$; $p<0,05$), а також між локалізацією гіпометаболізму та структурними змінами за МРТ ($r=+0,251$; $p<0,05$), що підтверджує взаємодоповнюючий характер методів у діагностиці епілептогенної зони.

Висновки. Отримані дані підтверджують, що ПЕТ-КТ з 18F-ФДГ є високочутливим методом виявлення епілептогенних вогнищ у дітей, зокрема у випадках МРТ-негативної епілепсії, та ключовим етапом персоналізованого планування нейрохірургічних втручань при фармакорезистентній епілепсії.

Ключові слова: *медична радіологія, педіатрія, епілептогенна зона, нейровізуалізація.*

Відповідальний автор: Олійніченко О.Г.
✉ 13, бульвар Тараса Шевченка, м. Київ, 01601, Україна.
E-mail: elenosol86@gmail.com

Corresponding author: Oliinichenko O.
✉ 13, Tarasa Shevchenka blvd., Kyiv, 01601, Ukraine.
E-mail: elenosol86@gmail.com

© Олійніченко О.Г., 2025 CC BY-NC-SA © Oliinichenko O., 2025

ISSN print 2414-4495, ISSN online 2710-1444, https://msz.knmu.edu.ua, msz.journal@knmu.edu.ua

Цитуйте українською Олійніченко ОГ.
Інтеграція даних позитронно-емісійної томографії та комп'ютерної томографії з нейровізуалізацією високої роздільної здатності для персоналізованого планування хірургічного втручання при фармакорезистентній епілепсії у дітей.
Медицина сьогодні і завтра. 2025;94(4):25-34.
https://doi.org/10.35339/msz.2025.94.4.oli

Cite in English: Oliinichenko O.
Integration of positron emission tomography and computed tomography data with high-resolution neurovisualization for personalized surgical planning for drug-resistant epilepsy in children.
Medicine Today and Tomorrow. 2025;94(4):25-34.
https://doi.org/10.35339/msz.2025.94.4.oli [In Ukrainian].

Вступ

У наш час фармакорезистентна епілепсія (ФРЕ) у дітей залишається однією з найскладніших проблем дитячої неврології через високу частку пацієнтів, у яких напади зберігаються попри адекватні схеми медикаментозної терапії. Це визначає потребу в ранньому доборі кандидатів на хірургічне лікування та індивідуалізоване передопераційне планування [1; 2].

За оцінками Всесвітньої організації охорони здоров'я, понад 50 млн людей на планеті страждають на епілепсію, з яких значна частка припадає на дітей та підлітків. Це захворювання супроводжується не лише рецидивуючими нападами, але і глибокими когнітивними, поведінковими та психосоціальними наслідками, що істотно впливають на якість життя пацієнта та його родини [3; 4].

Відповідно до визначення Міжнародної ліги проти епілепсії (ILAE, International League Against Epilepsy), фармакорезистентність встановлюється у випадку неефективності двох адекватно призначених, з доброю переносимістю і правильно підібраних протиепілептичних препаратів незалежно від їх комбінації [5]. Сучасні клініко-епідеміологічні спостереження свідчать, що близько 30 % дітей з епілепсією формують стійку резистентність до фармакотерапії, що суттєво знижує ефективність медикаментозного контролю нападів. Слід підкреслити, що перебіг ФРЕ у дитячому віці має низку клінічних особливостей. Зокрема, доведено, що ранній дебют захворювання, висока початкова частота нападів, структурні ураження головного мозку, генетичні аномалії та відсутність відповіді на перший протисудомний препарат є незалежними предикторами розвитку фармакорезистентності [1; 6].

Відомо, що ризик ФРЕ зростає у дітей із симптоматичними формами епілепсії, особливо при ураженнях скроневої долі, кортикальній дисплазії та постгіпоксичних енцефалопатіях. Водночас успіх контролю нападів після невдалої терапії двома антиепілептичними препаратами не перевищує 5 %, що обґрунтовує необхідність раннього направлення таких пацієнтів на хірургічне лікування [7; 8]. Для прийняття рішення щодо хірургічного лікування з приводу ФРЕ пацієнти проходять серію тестів у рамках стандартного передопераційного обстеження, щоб визначити ймовірну епілептогенну зону та відібрати кандидатів на операцію [2; 3]. Персоніфікована хірургічна стратегія ґрунтується на мультидисциплінарній оцінці та візуалізаційних технологіях високої точності. Передопераційна діагностика передбачає комплексний підхід, який включає структурну магнітно-резонансну томографію (МРТ) високої роздільної здатності, електроенцефалографію (ЕЕГ), нейропсихологічне тестування та молекулярно-функціональні методи візуалізації мозкової активності. Згідно із сучасними рекомендаціями, позитронно-емісійна томографія з 18F-фтордезоксиглюкозою у поєднанні з комп'ютерною томографією (ПЕТ-КТ з 18F-ФДГ) є однією з найінформативніших неінвазивних методик для ідентифікації епілептогенної зони у дітей із ФРЕ. Метод базується на оцінці регіонарного глюкозного метаболізму, що дозволяє виявити зони гіпометаболізму [9; 10].

ISSN print 2414-4495, ISSN online 2710-1444, https://msz.knmu.edu.ua, msz.journal@knmu.edu.ua

Основною метою передопераційного етапу є максимально точна локалізація епілептогенної зони з урахуванням мультидисциплінарної інтеграції даних ЕЕГ/відео-ЕЕГ, нейровізуалізації високої роздільної здатності (насамперед МРТ) та метаболічної візуалізації. У дітей особливо часто постає проблема так званої МРТ-негативної епілепсії, коли структурного субстрату не виявляють або він є сумнівним. У таких випадках ПЕТ-КТ з 18F-ФДГ показує високу точність виявлення гіпометаболічних зон та підвищує точність відбору кандидатів для хірургічного лікування. Як зазначають Sukprakun C. & Termongkol S. (2022) [3], Yao Y. et al. (2024) [11], Jayalakshmi S. et al. (2019) [12], поєднання нових радіофармацевтичних розробок, нових методик та програмного забезпечення дозволяє покращити визначення локалізації епілепсії та поглибити розуміння патогенезу епілепсії. З погляду безпеки педіатрична ПЕТ-діагностика вимагає ретельного балансу між якістю зображення та радіаційним навантаженням. Науковці вказують на необхідність індивідуалізованого дозування у дітей та підтверджують практичну доцільність коригованих режимів введення 18F-ФДГ [9; 13].

Сучасні методи кількісної обробки ПЕТ-даних, зокрема тривимірні стереотаксичні поверхневі проєкції (3D-SSP, stereotactic surface projections) і z-score-карти відхилень від нормативних баз, зменшують суб'єктивність візуальної інтерпретації та підвищують відтворюваність висновків між експертами. Застосування **CortexID** як інструмента 3D-SSP-аналізу покращує локалізацію епілептогенної зони (передусім у скроневих формах) та допомагає у складних випадках, коли ЕЕГ та МРТ дають неоднозначні результати [10; 14].

Таким чином, актуальним напрямом лікування ФРЕ є **персоналізоване** планування нейрохірургічного втручання, яке спирається на інтеграцію електрофізіологічних, структурних та метаболічних маркерів. Інтеграція ПЕТ-КТ з 18F-ФДГ може підвищити чутливість виявлення епілептогенної зони (особливо при МРТ-негативних випадках), поліпшити стратифікацію ризиків та прогнозування хірургічних результатів.

Метою дослідження була оцінка діагностичної та прогностичної цінності інтегрованого підходу, що поєднує дані позитронно-емісійної томографії з 18F-фтордезоксиглюкозою з комп'ютерною томографією та нейровізуалізацією високої роздільної здатності, у виявленні та визначенні локалізації епілептогенної зони для персоналізованого хірургічного планування у дітей із фармакорезистентною епілепсією.

Завдання дослідження

1. Провести аналіз клініко-анамнестичних, нейрофізіологічних даних та результатів нейровізуалізації у дітей із ФРЕ.

2. Проаналізувати зміни мозкової активності за даними ПЕТ-КТ з 18F-ФДГ, визначити характер гіпометаболізму.

3. Порівняти ефективність діагностичних методів (МРТ, ПЕТ-КТ, ЕЕГ) у різних вікових групах дітей із ФРЕ для підвищення точності передопераційного планування.

Матеріали та методи

У ході дослідження було проведено ретроспективний аналіз амбулаторних карт 150 дітей із ФРЕ віком від 1 до 17 років за 2021–2023 рр. Дослідження проходило в Центрі ядерної медицини КНП «Київський міський клінічний онкологічний центр». Відповідно до поставленої мети та завдань усі пацієнти були розподілені на чотири групи:

I група – діти із ФРЕ від 1 до 3 років (n=12);

II група – діти із ФРЕ від 3 років до 6–7 років (n=38);

III група – діти із ФРЕ від 7 до 11 років (n=50);

IV група – діти із ФРЕ від 12 до 17 років (n=50).

Діагноз епілепсія встановлювався згідно з рекомендаціями ILAE на основі результатів обстеження, включно з ЕЕГ та МРТ головного мозку. ФРЕ – це не певний вид захворювання, а епілепсія, за якої медикаментозне лікування не призводить до належного терапевтичного ефекту. Так, якщо після призначення і прийому двох відповідних протиепілептичних препаратів

ISSN print 2414-4495, ISSN online 2710-1444, https://msz.knmu.edu.ua, msz.journal@knmu.edu.ua

в адекватних дозах не вдається досягти контролю над нападами, то захворювання вважається фармакорезистентним.

Критеріями включення до проведення обстеження були діти віком від 1 до 17 років із встановленим діагнозом ФРЕ, яким планується проведення хірургічного лікування.

Критерієм виключення була наявність епілептичного нападу за 1–1,5 години до обстеження або безпосередньо під час проведення дослідження ПЕТ-КТ.

Дослідження ПЕТ-КТ із 18F-ФДГ головного мозку було проведено в ПЕТ-КТ блоці Центру ядерної медицини КНП «Київський міський клінічний онкологічний центр» (КМКОЦ). Основною вимогою перед проведенням цього дослідження є направлення епілептолога або нейрохірурга, наявність МРТ-обстеження головного мозку та результати ЕЕГ. Дослідження ПЕТ-КТ проводилось на апаратах GE DISCOVERY STE (США) та PHILIPS GEMINI TF (Нідерланди) з внутрішньовенним введенням 18F-ФДГ, після попередньої підготовки. Радіофармпрепарат 18F-ФДГ, виготовлений в аптеці з виробництва радіофармпрепаратів № 1 КНП «КМКОЦ» (процес виробництва 18F-ФДГ суворо відповідає національній нормативній базі з урахуванням рекомендацій Міжнародного агентства з атомної енергії, МАГАТЕ), вводився внутрішньовенно з індивідуальних шприців, розфасованих та промаркованих відповідними етикетками, із розрахунку дози (активність 18F-ФДГ) на кожного пацієнта за EANM PedDose calculator (Netkey information technology GmbH, Німеччина) залежно від ваги пацієнта.

Підготовка пацієнта для проведення дослідження ПЕТ-КТ з 18F-ФДГ головного мозку включала: голодування протягом 6 годин, водне навантаження. Перед ін'єкцією 18F-ФДГ обов'язково вимірювали рівень глюкози, допустимий рівень – не більше ніж 11 ммоль/л. За необхідності обстеження проводиться під загальною анестезією. Стандартно сканування проводили за протоколом – brain protocol, на [30–40] хв після введення радіофармпрепарату.

Обробка результатів обстеження проводилась на робочих станціях ADW4.7 (GE, США) за допомогою програмного забезпечення CortexID 3.2 (GE Healthcare, США), яке дало змогу провести автоматизований кількісний аналіз поглинання 18F-ФДГ порівняно з відповідним поглинанням 18F-ФДГ у відносно здорових осіб на основі візуалізації об'єму інтересів, воксельних карт або тривимірних стереотаксичних поверхневих проєкційних карт мозку. Забезпечення CortexID дає змогу генерувати інформацію про наявні порушення метаболізму глюкози структурами головного мозку за даними ПЕТ/КТ з 18F-ФДГ. Обробка даних за допомогою CortexID з урахуванням більшого інструментарію для візуального оцінювання, співставлення асиметричних контрлатеральних зон забезпечили вищу інформативність, ніж стандартна програма візуалізації.

Статистичну обробку отриманих даних проводили з використанням стандартних програм Statistica 6.0 (StatSoft Inc., США). Аналіз отриманих даних зроблено згідно із загальноприйнятими рекомендаціями Voxel-Wise Statistical Analysis, що включали порівняння з клінічними діагнозами. Для кількісних змінних використовували індекс асиметрії Z-score (з урахуванням даних бази в програмному забезпеченні CortexID робочої станції GE Advantage Workstation для дорослих, оскільки дитячої бази даних ще не існує). Статистичний аналіз отриманих даних включав розрахунок медіани (Me), нижнього та верхнього квартилів (Q25; Q75). Для перевірки нормальності вибірок кількісних даних використовували W-критерій Шапіро – Уїлка. Порівняння кількісних показників здійснювали за допомогою U-критерію Манна – Уітні. Статистичну значущість оцінювали на рівні не нижче ніж 95,0 % ($p<0,05$). Взаємозв'язки між показниками оцінювали за допомогою значущих коефіцієнтів кореляції Спірмена (r).

Етика дослідження

Робота була виконана згідно з «Етичними принципами медичних наукових досліджень із залученням людських суб'єктів»,

ISSN print 2414-4495, ISSN online 2710-1444, https://msz.knmu.edu.ua, msz.journal@knmu.edu.ua

«Загальною декларацією про біоетику та права людини», принципами Гельсінської декларації Всесвітньої медичної асоціації (1964–2024), Конституцією України, Основами законодавства України про охорону здоров'я (1992), директивами Європейського Союзу (Directive 2010/63 EU) та з дозволу комісії з біоетичної експертизи та етики наукових досліджень при НМУ імені О.О. Богомольця (протокол № 153 від 29.11.2021). Оскільки всі хворі були неповнолітніми, то перед проведенням обстеження батьки пацієнтів надавали інформовану згоду на обробку персональних даних, діагностику та лікування.

Результати

Отримані результати власних досліджень демонструють складну клініко-метаболічну структуру ФРЕ у дітей, де поєднуються структурні та функціональні чинники. Аналіз клінічних даних показав, що у 54,0 % дітей дебют епілепсії відбувався у ранньому віці (1–3 роки). У нашому дослідженні фокальні форми нападів переважали у всіх групах, що свідчить про домінування структурно локалізованих механізмів збудження, типових для дитячої ФРЕ.

Встановлення форми епілепсії та характеристика епілептичних нападів мають велике значення для вибору тактики терапевтичного та нейрохірургічного лікування дітей із ФРЕ. Під час аналізу клінічних даних згідно з Міжнародною класифікацією хвороб 10-го перегляду (МКХ-10) епілепсії та епілептичних синдромів було встановлено, що локалізована (фокальна) (парціальна) симптоматична епілепсія та епілептичні синдроми найчастіше траплялися серед обстежених нами дітей (*табл. 1*).

Необхідно зазначити, що у половини дітей I групи, у 34,2 % (13 із 38) II групи, 30,0 % (15 із 50) III групи та 30,0 % (15 із 50) IV групи було встановлено діагноз локалізована (фокальна) (парціальна) симптоматична епілепсія та епілептичні синдроми з комплексними парціальними судомними нападами.

При діагностиці дітей із ФРЕ велике значення має саме частота та характер епілептичних нападів *(табл. 2)*. Як видно, напади в кількості від 10 до 50 найчастіше виявлялися в обстежених нами дітей. Слід зазначити, що для дітей I групи характерно менше 10 епілептичних нападів – це було виявлено у половини дітей цієї групи.

Таблиця 1. Розподіл дітей із ФРЕ відповідно до класифікації МКХ-10

Діагноз	I група n=12		II група n=38		III група n=50		IV група n=50		Усього n=150	
	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%
G40.0	0	0	8	21,1	5	10,0	10	20,0	23	15,3
G40.1	1	8,3	0	0	1	2,0	2	4,0	4	2,7
G40.2	6	50,0	13	34,2	15	30,0	15	30,0	49	32,7
G40.3	3	25,0	3	7,8	3	6,0	2	4,0	11	7,3
G40.4	0	0	6	15,8	14	28,0	11	22,0	31	20,7
G40.8	2	16,7	8	21,1	12	24,0	10	20,0	32	21,3
Усього	12	100,0	38	100,0	50	100,0	50	100,0	150	100,0

Примітки:

G40.0 – локалізована (фокальна) (парціальна) ідіопатична епілепсія та епілептичні синдроми із судомними нападами з фокальним початком;

G40.1 – локалізована (фокальна) (парціальна) симптоматична епілепсія та епілептичні синдроми з простими парціальними нападами;

G40.2 – локалізована (фокальна) (парціальна) симптоматична епілепсія та епілептичні синдроми з комплексними парціальними судомними нападами;

G40.3 – генералізована ідіопатична епілепсія та епілептичні синдроми;

G40.4 – інші види генералізованої епілепсії та епілептичних синдромів;

G40.8 – інші уточнені форми епілепсії.

ISSN print 2414-4495, ISSN online 2710-1444, https://msz.knmu.edu.ua, msz.journal@knmu.edu.ua

Таблиця 2. Розподіл обстежених дітей із ФРЕ залежно від частоти нападів

Кількість нападів	I група n=12		II група n=38		III група n=50		IV група n=50	
	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%
Менше ніж 10	6	50,0	18	47,4	16	32,0	14	28,0
10–50	5	41,7	20	52,6	32	64,0	33	66,0
Більше ніж 50	1	8,3	0	0	2	4,0	3	6,0
Усього	12	100,0	38	100,0	50	100,0	50	100,0

Відповідно до проведеного аналізу було встановлено типи епілептичних нападів та виявлено, що частота фокальних нападів у дітей із ФРЕ всіх груп була вищою порівняно з генералізованими нападами. Так, серед дітей із ФРЕ I групи у 25,0 % (3 із 12) превалювали комплексні фокальні (парціальні) судомні напади та фокальні напади з порушенням свідомості, тоді як вторинно генералізовані тоніко-клонічні напади становили 16,7 % (2 із 12). Некласифіковані напади спостерігалися у 16,7 % (2 із 12) дітей цієї групи.

У 18,4 % (7 із 38) дітей II групи характерною була наявність генералізованих клонічних нападів, у 13,2 % – нападів із судомним локалізуючим початком та більше ніж у 31,5 % дітей встановлено фокальні напади. Некласифіковані напади відзначалися у 18,4 % (7 із 38) випадків.

У 7 (14,0 %) дітей із ФРЕ III групи превалювали вторинно генералізовані тоніко-клонічні напади, а ще у 7 (14,0 %) – фокальні напади з порушенням свідомості; у понад 40,0 % випадків виявлялися різні типи фокальних нападів.

Серед домінуючих типів нападів у 24,0 % (12 із 50) дітей IV групи були комбіновані комплексні фокальні (парціальні) з вторинно генералізованими судомними нападами та комплексні фокальні (парціальні) судомні напади. У 8 дітей (16,0 %) встановлено генералізовані клонічні напади. У цій групі 10 дітей (20,0 %) мали некласифіковані напади.

Під час дослідження проведено зіставлення всіх результатів ПЕТ-КТ із даними ЕЕГ та МРТ обстежень, які оцінювалися на мультидисциплінарному консиліумі. До складу мультидисциплінарної команди входили нейрохірурги, епілептолог, радіолог, спеціалізований на МРТ-діагностиці, лікар із радіонуклідної діагностики та генетик, які спільно планували хірургічне лікування. Крім того, при відборі кандидатів для хірургічного лікування враховували прогресування ФРЕ, зростання частоти та вираженості епілептичних нападів, розвиток психічних розладів.

Аналіз отриманих результатів ПЕТ-КТ проводився за рахунок візуальної оцінки зображень та статистичного аналізу даних (за допомогою програмного забезпечення CortexID) для визначення вогнищ гіпо- або гіперметаболізму, аномальних зон розподілення радіофармпрепарату. Обов'язково оцінювали розподіл 18F-ФДГ у лобних, тім'яних, скроневих, потиличних долях з урахуванням їхньої симетричності, а також метаболічну активність у мозочку, базальних ядрах, довгастому мозку.

Клінічно у дітей всіх груп домінувала скронева форма епілепсії із локалізацією гіпометаболізму в кількох ділянках головного мозку (66,6 %, 76,3 %, 68,0 % та 64,0 % відповідно), для якої найчастіше розвивається фармакорезистентність (*табл. 3*). Така локалізація ураження головного мозку підтверджувалася клінічними типами епілептичних нападів і результатами ЕЕГ.

Відповідно до отриманих даних візуально визначалося епілептичне вогнище гіпометаболізму в дітей із ФРЕ всіх груп більше ніж у 50,0 % випадків переважно в скроневій частці (медіобазальний та базальний відділи скроневої частки) з превалюванням відсотка дітей із локалізацією в лівій скроневі частці.

Виявлені зміни відповідали епілептогенному вогнищу, яке виявлялося за допомогою ЕЕГ-картування. Ознаки та підтвердження зниження рівня метаболізму за даними ПЕТ-КТ з 18F-ФДГ кількісно доведені даними 3D-SSP аналізу.

Після аналізу даних ПЕТ-КТ з 18F-ФДГ за допомогою CortexID додатково виявлено гіпометаболізм та асиметричні зони метаболічної активності у 56,0 % (74 зі 150) дітей, саме ці дані не виявлялися при візуальній оцінці.

При порівнянні певних зон гіпометаболізму при ПЕТ-КТ з 18F-ФДГ локалізація епілептогенних вогнищ за даними ЕЕГ була співставною в 42,7 % (64 із 150) дітей, а за даними ЕЕГ-картування – у 53,3 % (80 із 150) випадків. У 3,3 % (5 із 150) дітей були відсутні ознаки патологічної та метаболічної активності головного мозку.

ISSN print 2414-4495, ISSN online 2710-1444, https://msz.knmu.edu.ua, msz.journal@knmu.edu.ua

Таблиця 3. Співставлення різних методів діагностики у дітей із фармакорезистентною епілепсією

Метод діагностики	I група n=12		II група n=38		III група n=50		IV група n=50	
	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%
ЕЕГ								
Епілептична активність	10	83,3	27	71,1	35	70,0	40	80,0
Не виявлено епілептичної активності	2	16,7	11	28,9	15	30,0	10	20,0
МРТ								
Структурні порушення виявлені	8	66,7	22	57,9	25	50,0	30	60,0
Структурні порушення не виявлені	4	33,3	16	42,1	25	50,0	20	40,0
ПЕТ-КТ з 18F-ФДГ								
Гіпометаболізм медіобазального відділу лівої скроневої частки	2	16,7	6	15,8	10	20,0	9	18,0
Гіпометаболізм медіобазального відділу правої скроневої частки	0	0	6	15,8	3	6,0	12	24,0
Гіпометаболізм медіобазального відділу обох скроневих часток	0	0	5	13,2	7	14,0	1	2,0
Гіпометаболізм базального відділу лівої скроневої частки	4	33,3	4	10,5	0	0	0	0
Гіпометаболізм лівої лобної частки	0	0	6	15,8	9	18,0	0	0
Гіпометаболізм правої лобної частки	3	25,0	9	23,7	4	8,0	0	0
Гіпометаболізм обох лобних часток	3	25,0	0	0	5	10,0	0	0
Гіпометаболізм лівої тім'яної частки	0	0	0	0	8	16,0	10	20,0
Гіпометаболізм правої тім'яної частки	0	0	0	0	0	0	0	0
Гіпометаболізм обох тім'яних часток	0	0	0	0	3	6,0	6	12,0
Локалізація в декількох ділянках головного мозку	2	16,6	8	21,0	14	28,0	10	20,0
Гіпометаболізм виявлено	12	100,0	36	94,7	49	98,0	48	96,0
Гіпометаболізм не виявлявся	0	0,0	2	5,3	1	2,0	2	4,0

Обговорення результатів

У наш час МРТ із високою роздільною здатністю залишається базовим методом первинної морфологічної верифікації епілептогенної зони [15]. Однак значна кількість МРТ-негативних результатів обмежує можливість визначення вогнищ, що безпосередньо впливає на рішення про хірургічне лікування та прогноз післяопераційного контролю нападів [16; 17]. Останні роботи, присвячені пацієнтам із ФРЕ та негативною МРТ, підкреслюють, що додаткові функціонально-візуалізаційні методи істотно підвищують діагностичну інформативність та асоціюються з вищими шансами досягнення свободи від нападів після резекції епілептогенної зони [18–20]. У ході проведення нашого дослідження також встановлено, що у дітей із ФРЕ у 43,3 % (65 із 150) випадків МРТ не виявила патологічних змін, тоді як у 6,7 % (10 із 150) випадків визначалися сумнівні зміни структури головного мозку. Такі дані вказували на необхідність проведення додаткового обстеження за допомогою ПЕТ-КТ з 18F-ФДГ. За допомогою МРТ та ПЕТ-КТ зміни були виявлені у 43,3 % (65 із 150) та 96,7 % (145 із 150) дітей відповідно із суттєвою різницею.

Результати кореляційного аналізу підтвердили значущі зв'язки між гіпометаболізмом у скроневій зоні та частотою нападів ($r=+0,327$; $p<0,05$) та епілептичною активністю на ЕЕГ ($r=+0,577$; $p<0,05$). Кореляція гіпометаболізму в лобній зоні зі структурними змінами на МРТ ($r=+0,251$; $p<0,05$) також підтверджує взаємозв'язок морфологічних та метаболічних змін.

ISSN print 2414-4495, ISSN online 2710-1444, https://msz.knmu.edu.ua, msz.journal@knmu.edu.ua

Отже, оцінка метаболічної активності різних структур головного мозку на ПЕТ-КТ у співставленні з даними ЕЕГ та МРТ у нашому дослідженні дозволила визначити функціональні характеристики відповідних структур та локалізувати відповідну ділянку мозку. Включення ПЕТ-КТ в алгоритм обстеження збільшує частоту проведення хірургічних втручань при ФРЕ, особливо у випадках негативних результатів МРТ. Після проведення ПЕТ-КТ здійснюється повторне співставлення результатів з даними ЕЕГ та МРТ, що надає хірургам більш повну інформацію для планування хірургічного втручання. Операцію не проводили, якщо в пацієнта були лише результати ЕЕГ, МРТ була негативною, а обстеження ПЕТ-КТ не робили, оскільки відсутня інформація про точну локалізацію епілептогенної зони, що є критично важливим у дітей з ФРЕ. Інтеграція методів дозволила більш точно локалізувати епілептогенну зону, підвищити інформативність передопераційного обстеження та оптимізувати хірургічну тактику.

Висновки

Інтеграція даних ПЕТ-КТ з 18F-ФДГ із високороздільною нейровізуалізацією є сучасним методом для персоналізованого планування оперативного лікування фармакорезистентної епілепсії у дітей. Комплексна нейровізуалізація з використанням ПЕТ-КТ з 18F-ФДГ у поєднанні з МРТ високої роздільної здатності значно підвищує діагностичну інформативність при фармакорезистентній епілепсії у дітей, особливо у випадках негативних або невизначених МРТ-результатів.

Декларації

Конфлікт інтересів відсутній.

Автор надав згоду на публікацію статті на умовах ліцензії Creative Commons BA-NC-SA 4.0 International License та публічного договору з редакцією, на обробку та публікацію його персональних даних.

Автор рукопису заявляє, що під час проведення досліджень, підготовки та редагування цього рукопису він не використовував жодні інструменти чи сервіси генеративного штучного інтелекту (ШІ) для виконання завдань, перелічених у Таксономії делегування генеративного ШІ (Generative AI Delegation Taxonomy, GAIDeT, 2025). Усі етапи роботи (від розробки дослідницької концепції до фінального редагування) виконувалися автором особисто.

Література

1. Fallah A, Lewis E, Ibrahim GM, Kola O, Tseng CH, Harris WB, et al. Comparison of the real-world effectiveness of vertical versus lateral functional hemispherotomy techniques for pediatric drug-resistant epilepsy: A post hoc analysis of the HOPS study. Epilepsia. 2021;62(11):2707-18. DOI: 10.1111/epi.17021. PMID: 34510448.

2. Kaewchur T, Chamroonrat W, Thientunyakit T, Khiewvan B, Wongsurawat N, Chotipanich C, et al. Thai National Guideline for Nuclear Medicine Investigations in Epilepsy. Asia Ocean J Nucl Med Biol. 2021;9(2):188-206. DOI: 10.22038/AOJNMB.2021.54567.1379. PMID: 34250150.

3. Sukprakun C, Tepmongkol S. Nuclear imaging for localization and surgical outcome prediction in epilepsy: A review of latest discoveries and future perspectives. Front Neurol. 2022;13:1083775. DOI: 10.3389/fneur.2022.1083775. PMID: 36588897.

4. Movahedpour A, Taghvaeefar R, Asadi-Pooya AA, Karami Y, Tavasolian R, Khatami SH, et al. Nano-delivery systems as a promising therapeutic potential for epilepsy: Current status and future perspectives. CNS Neurosci Ther. 2023;29(11):3150-9. DOI: 10.1111/cns.14355. PMID: 37452477.

5. Najm I, Lal D, Alonso Vanegas M, Cendes F, Lopes-Cendes I, Palmini A, et al. The ILAE consensus classification of focal cortical dysplasia: An update proposed by an ad hoc task force of the ILAE diagnostic methods commission. Epilepsia. 2022;63(8):1899-919. DOI: 10.1111/epi.17301. PMID: 35706131.

6. Asadi-Pooya AA, Farazdaghi M. Definition of drug-resistant epilepsy: A reappraisal based on epilepsy types. Acta Neurol Scand. 2022;145(5):627-32. DOI: 10.1111/ane.13595. PMID: 35130355.

ISSN print 2414-4495, ISSN online 2710-1444, https://msz.knmu.edu.ua, msz.journal@knmu.edu.ua

7. Beatty CW, Lockrow JP, Gedela S, Gehred A, Ostendorf AP. The Missed Value of Underutilizing Pediatric Epilepsy Surgery: A Systematic Review. Semin Pediatr Neurol. 2021;39:100917. DOI: 10.1016/j.spen.2021.100917. PMID: 34620465.

8. Juhász C, John F. Utility of MRI, PET, and ictal SPECT in presurgical evaluation of non-lesional pediatric epilepsy. Seizure. 2020;77:15-28. DOI: 10.1016/j.seizure.2019.05.008. PMID: 31122814.

9. Taussig D, Petrescu AM, Aghakhani N, Herbrecht A, Dorfmüller G, Ferrand-Sorbets S, et al. 18 F-FDG-PET hypometabolic pattern reveals multifocal epileptic foci despite limited unique stereotyped seizures. Epilepsy Res. 2021;172:106589. DOI: 10.1016/j.eplepsyres.2021.106589. PMID: 33640665.

10. Li S, Guo K, Wang Y, Wu D, Wang Y, Feng L, et al. Evaluating the Efficacy of CortexID Quantitative Analysis in Localization of the Epileptogenic Zone in Patients with Temporal Lobe Epilepsy. Neurol Ther. 2024;13(5):1403-14. DOI: 10.1007/s40120-024-00646-1. PMID: 39093538.

11. Yao Y, Wang X, Zhao B, Mo J, Guo Z, Yang B, Li Z, Fan X, et al. Hypometabolic patterns are related to post-surgical seizure outcomes in focal cortical dysplasia: A semi-quantitative study. Epilepsia Open. 2024;9(2):653-64. DOI: 10.1002/epi4.12903. PMID: 38265725.

12. Jayalakshmi S, Nanda SK, Vooturi S, Vadapalli R, Sudhakar P, Madigubba S, Panigrahi M. Focal Cortical Dysplasia and Refractory Epilepsy: Role of Multimodality Imaging and Outcome of Surgery. AJNR Am J Neuroradiol. 2019;40(5):892-8. DOI: 10.3174/ajnr.A6041. PMID: 31000525.

13. Carvalho MS, Alvim MKM, Etchebehere E, Santos AO, Ramos CD, Argenton JLP, et al. Interictal and postictal 18F-FDG PET/CT in epileptogenic zone localization. Radiol Bras. 2022;55(5):273-9. DOI: 10.1590/0100-3984.2021.0141. PMID: 36320375.

14. Bagni O, Danieli R, Bianconi F, Palumbo B, Filippi L. Clinical Performance of Analog and Digital 18F-FDG PET/CT in Pediatric Epileptogenic Zone Localization: Preliminary Results. Biomedicines. 2025;13(8):1887. DOI: 10.3390/biomedicines13081887. PMID: 40868142.

15. Vecchiato K, Casella C, Dokumaci AS, Siddiqui A, Egloff A, Carney O, et al. Ultra-High Field 7T MRI in a Drug-Resistant Pediatric Epilepsy Cohort: Image Comparison and Radiologic Outcomes. Neurology. 2025;105(5):e213921. DOI: 10.1212/WNL.0000000000213921. PMID: 40834340.

16. Czarnetzki C, Spinelli L, Huppertz HJ, Schaller K, Momjian S, Lobrinus J, et al. Yield of non-invasive imaging in MRI-negative focal epilepsy. J Neurol. 2024;271(2):995-1003. DOI: 10.1007/s00415-023-11987-6. PMID: 37907727.

17. Kikuchi K, Togao O, Yamashita K, Momosaka D, Nakayama T, Kitamura Y, et al. Diagnostic accuracy for the epileptogenic zone detection in focal epilepsy could be higher in FDG-PET/MRI than in FDG-PET/CT. Eur Radiol. 2021;31(5):2915-22. DOI: 10.1007/s00330-020-07389-1. PMID: 33063184.

18. Guo K, Wang J, Wang Z, Wang Y, Cui B, Zhao G, Lu J. Morphometric analysis program and quantitative positron emission tomography in presurgical localization in MRI-negative epilepsies: a simultaneous PET/MRI study. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2022;49(6):1930-8. DOI: 10.1007/s00259-021-05657-w. PMID: 34939175.

19. Wang F, Hong ST, Zhang Y, Xing Z, Lin YX. 18F-FDG-PET/CT for Localizing the Epileptogenic Focus in Patients with Different Types of Focal Cortical Dysplasia. Neuropsychiatr Dis Treat. 2024;20:211-20. DOI: 10.2147/NDT.S442459. PMID: 38333612.

20. Qian Z, Lin J, Jiang R, Jean S, Dai Y, Deng D, et al. Evaluation of MRI post-processing methods combined with PET in detecting focal cortical dysplasia lesions for patients with MRI-negative epilepsy. Seizure. 2024;117:275-283. DOI: 10.1016/j.seizure.2024.03.011. PMID: 38579502.

ISSN print 2414-4495, ISSN online 2710-1444, https://msz.knmu.edu.ua, msz.journal@knmu.edu.ua

Oliinichenko O.

INTEGRATION OF POSITRON EMISSION TOMOGRAPHY AND COMPUTED TOMOGRAPHY DATA WITH HIGH-RESOLUTION NEUROVISUALIZATION FOR PERSONALIZED SURGICAL PLANNING FOR DRUG-RESISTANT EPILEPSY IN CHILDREN

Background. Drug-resistant epilepsy in children remains one of the most challenging problems in pediatric neurology, as the lack of seizure control after drug treatment requires early detection of the epileptogenic zone and precise preoperative planning. Integration of Positron Emission Tomography with 18F-FluoroDeoxyGlucose and Computed Tomography (18F-FDG PET/CT) and high-resolution neuroimaging opens new possibilities for a personalized approach.

Aim. To assess the diagnostic and prognostic value of an integrated approach combining positron emission tomography with 18F-fluorodeoxyglucose and computed tomography and high-resolution neuroimaging data in detecting and localizing the epileptogenic zone for personalized surgical planning in children with drug-resistant epilepsy.

Materials and Methods. A retrospective analysis of 150 outpatient charts of children aged 1 to 17 years at the Nuclear Medicine Center of the Kyiv City Clinical Oncology Center in 2021–2023 was conducted. Patients were divided into four age groups. Data from Electro-EncephaloGrams (EEG), high-resolution Magnetic Resonance Imaging (MRI), and 18F-FDG PET/CT were compared.

Research Ethics. The study was conducted with the written consent of the children's parents, in compliance with the provisions of the World Medical Association Declaration of Helsinki (1964–2024).

Results. Structural changes in the brain by MRI were detected in 43.3% of the examined, and metabolic disorders by PET/CT were detected in 68.7% of the children, including cases with negative MRI results. Quantitative analysis using the CortexID 3.2 software complex (GE Healthcare, USA) proved to be an effective tool for objectifying the results of PET/CT. This increases the reproducibility of the results and contributes to the personalized choice of surgical tactics. Correlation analysis showed a reliable relationship between the zones of hypometabolism by PET/CT and focal epileptic activity by EEG ($r=+0.577$; $p<0.05$), as well as between the localization of hypometabolism and structural changes by MRI ($r=+0.251$; $p<0.05$), which confirms the complementary nature of the methods in the diagnosis of the epileptogenic zone.

Conclusions. The obtained data confirm that PET/CT with 18F-FDG is a highly sensitive method for detecting epileptogenic foci in children, in particular in cases of "MRI-negative" epilepsy and is a key stage in personalized planning of neurosurgical interventions in children with drug-resistant epilepsy.

Keywords*: medical radiology, pediatrics, epileptogenic zone, neuroimaging.*

Надійшла 29.10.2025
Прийнята до опублікування 29.12.2025
Опублікована 31.12.2025

Відомості про авторів

Олійніченко Олена Геннадіївна – аспірант, асистент кафедри радіології та радіаційної медицини Національного медичного університету ім. О.О. Богомольця, Київ, Україна.

Поштова адреса: 13, бульвар Тараса Шевченка, м. Київ, 01601, Україна.

E-mail: elenosol86@gmail.com

ORCID: 0000-0001-5544-6526.