

Г.О. Козловська
К.О. Демченко
А.О. Гриценко

Дніпровський державний
медичний університет,
Дніпро, Україна

Надійшла: 20.09.2025

Прийнята: 15.10.2025

DOI: <https://doi.org/10.26641/1997-9665.2025.3.196-201>

УДК: 612.82:004.93'1

КОНЕКТОМ ЛЮДИНИ: НОВІ ПІДХОДИ ДО КАРТУВАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Kozlovskaya G.O. , Demchenko K.O.  ✉, Hrytsenko A.O.  The human connectome: new approaches to mapping neural networks.

Dnipro State Medical University, Dnipro, Ukraine.

ABSTRACT. Background. The study of the human connectome, that is, the comprehensive map of structural and functional connections of the brain, is one of the key areas of modern neuroscience. Understanding the organization of neural networks opens new perspectives for diagnosing and treating neurological and psychiatric disorders, as well as for developing innovative approaches in neurotechnology. Recent decades have been characterized by the rapid advancement of imaging methods and computer modeling, which significantly expand our knowledge of brain network architecture. **Objective.** The aim of this article is to analyze modern methods of mapping the human connectome and to determine their advantages, limitations, and prospects for development. **Methods.** A review of publications in PubMed, Scopus, and Web of Science over the past two decades was conducted, focusing on structural and functional connectomics. Particular attention was paid to diffusion tensor imaging (DTI), functional magnetic resonance imaging (fMRI), magnetoencephalography (MEG), electroencephalography (EEG), as well as new approaches that combine multimodal techniques with artificial intelligence algorithms. **Results.** Structural connectomics is primarily based on DTI and tractography, which allow visualization of the brain's major pathways, though with limited accuracy for smaller fibers. Functional connectomics relies on fMRI, EEG, and MEG, which capture synchronization of activity across brain regions in real time. The integration of structural and functional data provides a more complete picture of brain function. A promising direction is the application of artificial intelligence for analyzing large datasets, which enables the discovery of new patterns in neural network connectivity. **Conclusions.** Modern methods of human connectome mapping provide the foundation for a deeper understanding of the brain's neural organization and hold significant potential in clinical neuroscience. Further development of multimodal technologies and machine learning algorithms will contribute to the creation of more accurate connectome models, which will help optimize diagnosis, prognosis, and treatment of nervous system disorders.

Key words: connectome, neural networks, diffusion tensor imaging, functional MRI, artificial intelligence, brain networks, neuroimaging.

Kozlovskaya G.O., Demchenko K.O., Hrytsenko A.O. [The human connectome: new approaches to mapping neural networks]. *Morphologia*. 2025;19(3):196-201. Ukrainian.

DOI: <https://doi.org/10.26641/1997-9665.2025.3.196-201>

 Kozlovskaya G.O. 0000-0003-4422-704X;  Demchenko K.O. 0009-0001-0102-5117;

 Hrytsenko A.O. 0009-0007-6229-199X

✉ whitekler20@gmail.com

© Dnipro State Medical University, «Morphologia»

Вступ

Дослідження організації мозку є одним із найбільш складних і водночас пріоритетних завдань сучасної науки. Складність полягає у винятковій багаторівневій структурі нервової системи, де кожен елемент — від окремого нейрона до цілих функціональних систем — пов'язаний складною мережею зв'язків. Для опису цього багатопланового феномену у 2005 році було запропоновано термін «конектом» [1], що за аналогією з «геномом» позначає повну карту структурних і

функціональних зв'язків мозку людини. Відтоді конектоміка сформувалася як окрема галузь нейронаук, яка поєднує методи нейроанатомії, нейрофізіології, біоінформатики, обчислювальної нейронауки та медичної інформатики [4].

Значення дослідження конектому полягає у можливості комплексно розуміти принципи організації мозкової діяльності. Карта зв'язків мозку не лише описує шляхи поширення нервових імпульсів, а й дозволяє зрозуміти, як формуються ког-

нітивні функції, пам'ять, емоційні реакції та поведінкові стратегії. Важливим є й прикладний аспект: зміни у структурі та функціонуванні конектому лежать в основі низки патологічних станів, включно з хворобою Альцгеймера, епілепсією, шизофренією, розладами аутистичного спектра та наслідками інсультів [5–7].

Поштовхом для активного розвитку конектомики стали технологічні інновації у сфері нейровізуалізації. Впровадження дифузійної тензорної томографії (DTI) та методів трактографії дало змогу описати анатомічні тракти білої речовини [2], тоді як функціональна магнітно-резонансна томографія (fMRI) відкрила шлях до вивчення синхронізації активності різних ділянок мозку [6]. Електро- та магнітоенцефалографія (EEG, MEG) забезпечили можливість дослідження динаміки нейронних процесів із високою часовою роздільністю [7,8]. Сьогодні перспективними вважаються мульти-модальні підходи, які інтегрують кілька методів одночасно, а також застосування штучного інтелекту для аналізу великих даних [9–12].

Важливу роль у розвитку цієї галузі відіграли міжнародні ініціативи. Зокрема, Human Connectome Project (HCP), започаткований у США у 2009 році, поставив собі за мету створити високоточну карту структурних та функціональних зв'язків мозку на великій вибірці здорових добровольців [3]. Подібні програми реалізуються в Європі (наприклад, Human Brain Project) та в Азії. Відкритий доступ до даних цих проєктів забезпечив дослідникам усього світу унікальну можливість проводити незалежні аналізи й розробляти нові підходи до вивчення мозкових мереж [10].

Таким чином, конектоміка сьогодні є міждисциплінарним напрямом, що поєднує фундаментальні дослідження та клінічні застосування. Вона дозволяє не лише розширювати уявлення про природу свідомості та когнітивних процесів, але й відкриває шлях до персоналізованої медицини, де карти мозкових мереж конкретного пацієнта можуть слугувати основою для діагностики та планування індивідуалізованого лікування [12].

Мета

Метою даної оглядової статті є систематизувати наукові дані щодо методів картування конектому людини, оцінити їх можливості й обмеження та окреслити перспективи подальшого застосування у фундаментальних та клінічних дослідженнях.

Матеріали та методи

Для написання оглядової статті було проведено систематичний пошук наукової літератури у провідних міжнародних базах даних — PubMed, Scopus, Web of Science — за період з 2000 по 2025 роки. Вибір цього часового проміжку зумовлений тим, що саме початок XXI століття став етапом

активного розвитку сучасних методів нейровізуалізації та появи самого терміну «конектом» [1].

Критерії пошуку

Пошук здійснювався за комбінацією ключових слів:

“human connectome”, “brain networks”, “structural connectivity”, “functional connectivity”, “diffusion tensor imaging (DTI)”, “functional magnetic resonance imaging (fMRI)”, “electroencephalography (EEG)”, “magnetoencephalography (MEG)”, “graph theory”, “artificial intelligence in neuroscience”, “machine learning connectomics” [4,7,11].

До пошуку включалися як оригінальні дослідження, так і оглядові статті, монографії та матеріали міжнародних проєктів, зокрема Human Connectome Project (HCP) [3].

Критерії включення

У фінальний аналіз увійшли роботи, що відповідали наступним критеріям:

1. Публікація в рецензованих наукових журналах англійською або українською мовами.
2. Дослідження, присвячені структурній або функціональній конектоміці людини [2,6].
3. Використання методів сучасної нейровізуалізації (DTI, fMRI, EEG, MEG) або мульти-модальних підходів [10].
4. Опис застосування алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту для аналізу даних мозкових мереж [9,12].

Критерії виключення

Не включалися у розгляд:

- матеріали, присвячені виключно тваринним моделям без застосування до людини;
- неопубліковані роботи, дисертації, автореферати, звіти;
- статті, що не містили опису методів дослідження або були лише короткими коментарями.

Хід аналізу

На першому етапі було знайдено близько 1200 публікацій, з яких після відсіву за критеріями включення залишилося 320 статей. Після додаткового перегляду на предмет відповідності тематиці та наявності повних текстів у відкритому доступі у фінальний список було включено 65 джерел, які найбільш повно відображають сучасний стан досліджень у цій сфері [5,7].

Серед них:

- 25 статей присвячено структурній конектоміці (DTI, трактографія) [2];
- 20 статей — функціональній конектоміці (fMRI, EEG, MEG) [6,8];
- 10 — мульти-модальним методам [10,11];
- 10 — застосуванню штучного інтелекту та графової теорії [4,9,12].

Результати та їх обговорення

Структурна конектоміка

Структурна конектоміка спрямована на дослідження анатомічних шляхів, що з'єднують різні

ділянки мозку. Основним методом у цьому напрямку, є дифузійна тензорна томографія (DTI) — варіант магнітно-резонансної томографії, який вимірює дифузію молекул води в тканинах мозку. Оскільки рух води відбувається переважно вздовж нервових волокон, DTI дозволяє реконструювати напрямки і організацію білої речовини [2].

На основі DTI застосовується метод трактографії, що візуалізує провідні шляхи мозку у вигляді тривимірних моделей. Це дало можливість створювати «карти» анатомічних з'єднань, які стали основою для концепції структурного конектому [1,2].

Серед ключових переваг DTI та трактографії:

- неінвазивність, можливість застосування у здорових добровольців і пацієнтів;
- висока просторово-анатомічна точність для великих трактів;
- клінічна значущість, зокрема при нейрохірургічному плануванні, дослідженні розсіяного склерозу, травм мозку, пухлин [2,3].

Разом з тим метод має і суттєві обмеження. DTI не завжди може коректно відтворити дрібні волокна або розділити шляхи, які перехрещуються у складних ділянках. Це призводить до потенційних артефактів у побудові карт [11]. Додатковою проблемою є чутливість до рухів пацієнта під час сканування та складність уніфікації методів обробки даних.

Розвиток методики привів до появи дифузійної спектроскопічної томографії (DSI) та HARDI (High Angular Resolution Diffusion Imaging), які забезпечують більш точне відтворення складних волоконних структур [11]. Водночас зростає роль відкритих баз даних, таких як Human Connectome Project, де зібрані тисячі зразків високоякісних DTI-зображень, що дозволяють проводити порівняльні дослідження між різними популяціями [3].

Таким чином, структурна конектоміка заклала основу для формування уявлень про архітектуру мозкових мереж, але для повного розуміння їхньої динаміки необхідна інтеграція з функціональними методами [6].

Функціональна конектоміка

Функціональна конектоміка спрямована на дослідження взаємодії між різними ділянками мозку в динаміці його роботи. Якщо структурна конектоміка показує анатомічні шляхи, то функціональна дозволяє простежити, як ці шляхи активуються під час різних когнітивних або сенсорних процесів [6].

Функціональна MPT (fMRI)

Найбільш поширеним методом є функціональна магнітно-резонансна томографія (fMRI), що ґрунтується на ефекті BOLD (Blood Oxygen Level Dependent). Цей підхід дозволив виявити так звані функціональні мережі мозку, зокрема default mode network (DMN) [6,7]. Використання fMRI

дало змогу вивчати як спонтанну активність мозку у стані спокою, так і реакцію на когнітивні завдання [10].

Електроенцефалографія (EEG)

Електроенцефалографія (EEG) залишається одним із найважливіших методів оцінки функціональних зв'язків. Вона забезпечує дуже високу часову роздільність (мілісекунди), що робить її незамінною для аналізу швидких нейронних процесів. Методи оцінки когерентності та фазової синхронізації дозволяють будувати моделі функціональних мереж [7,8].

Магнітоенцефалографія (MEG)

Магнітоенцефалографія (MEG) дає можливість реєструвати магнітні поля, які виникають при нейронній активності. Вона має вищу просторову точність порівняно з EEG і дозволяє локалізувати активність із більшою точністю [8]. MEG активно застосовується у діагностиці епілепсії та у передопераційному плануванні.

Отже, функціональна конектоміка значно розширила наше розуміння того, як мозок працює як єдина інтегрована система. Якщо DTI і трактографія показують «проводку» мозку, то fMRI, EEG та MEG демонструють «електричну активність цієї проводки». Поєднання цих методів створює передумови для комплексного опису нейронних мереж [6–8,10].

Мульти-модальні підходи

Сучасні дослідження мозку дедалі частіше виходять за межі використання одного методу, оскільки кожен із них має власні сильні сторони та обмеження. Саме тому активно розвиваються мульти-модальні підходи, що поєднують дані структурної та функціональної нейровізуалізації [10].

Інтеграція DTI та fMRI

Найбільш поширеною є комбінація дифузійної тензорної томографії (DTI), яка описує анатомічні шляхи, з функціональною MPT (fMRI), що показує динаміку активації мозкових областей. Це дозволяє отримати комплексне уявлення про взаємодію між структурною «архітектурою» мозку та його функціональною активністю. Наприклад, показано, що при розсіяному склерозі чи інсульті пошкодження білої речовини супроводжується дисфункцією відповідних функціональних мереж [12].

Поєднання EEG/MEG з MPT

Поєднання EEG або MEG з MPT забезпечує високу часову роздільність (EEG/MEG) та просторову точність (MPT). У результаті можливо простежити, як інформація поширюється мозковими мережами в реальному часі, і водночас точно локалізувати джерела сигналів [8].

Великі дані та алгоритми обробки

Мульти-модальні дослідження створюють масиви даних великого обсягу, що вимагають застосування складних статистичних і комп'ютерних методів. Особливо важливу роль у цій сфері

відіграють алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту, які здатні знаходити приховані закономірності у взаємодії структурних і функціональних характеристик [4,9].

Таким чином, мульти-модальні підходи поєднують переваги різних методів, що дозволяє створювати більш реалістичні моделі мозку. Вони мають як фундаментальне, так і прикладне значення: від вивчення архітектури нейронних мереж до прогнозування результатів лікування у клінічній практиці [10–12].

Алгоритми обробки даних

Розвиток конектоміки неможливий без потужних математичних і комп'ютерних інструментів. Обсяги даних, які отримують під час DTI, fMRI, EEG, MEG та мульти-модальних досліджень, сягають терабайтів і потребують спеціальних підходів до аналізу. Саме тому у конектоміці дедалі ширше застосовуються графова теорія, алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту [4].

Графова теорія

Представлення мозку у вигляді графа — де вузли відповідають певним ділянкам мозку, а ребра — структурним чи функціональним зв'язкам — стало базовою концепцією для кількісного опису конектому [4,9]. Аналіз показників ступеня вузла, коефіцієнта кластеризації, довжини шляху та модульності дозволив описати мозок як мережу типу “small-world” [9]. Ця архітектура забезпечує баланс між локальною інтегрованістю та глобальною ефективністю інформаційного обміну. Порушення такої організації виявлені при епілепсії, шизофренії та нейродегенеративних хворобах [6].

Машинне та глибинне навчання

Зі зростанням обсягів даних з'явилася потреба у застосуванні алгоритмів машинного навчання (ML) та глибинного навчання (DL). Методи, такі як support vector machines (SVM), random forest, а також глибинні нейронні мережі, зокрема graph neural networks (GNNs), дозволяють аналізувати графові структури конектому безпосередньо [4,12]. Це відкриває можливості для класифікації пацієнтів (здорові/патологія), прогнозування перебігу хвороб та пошуку нових біомаркерів.

Переваги й обмеження

✓ **Переваги:** можливість аналізу великих обсягів даних, виявлення прихованих закономірностей, створення предиктивних моделей [4].

✓ **Обмеження:** потреба у великих навчальних вибірках, складність інтерпретації («чорний ящик»), ризик перенавчання [12].

Підсумовуючи вище написане, застосування графової теорії та штучного інтелекту у конектоміці дозволило перейти від описових характеристик до кількісних та прогностичних моделей мозкових мереж. Це відкриває перспективи для впро-

вадження персоналізованих діагностичних та терапевтичних стратегій у клінічній практиці [4,9,12].

Клінічні застосування

Одним із ключових завдань сучасної конектоміки є її інтеграція у клінічну практику. Отримані карти мозкових мереж застосовуються для діагностики, прогнозування та планування лікування при різних захворюваннях.

Нейродегенеративні захворювання

При хворобі Альцгеймера одними з найраніших змін є порушення функціональних зв'язків у мережі режиму за замовчуванням (DMN). Ці зміни виявляються навіть до появи клінічних симптомів і можуть слугувати біомаркерами ранньої діагностики [5,6]. Аналогічні порушення мережевої організації описані при хворобі Паркінсона [10].

Психічні розлади

У пацієнтів із шизофренією, депресією та іншими психічними порушеннями за допомогою методів конектоміки встановлено дисфункцію фронто-тім'яних та лімбічних мереж. Ці зміни корелюють із когнітивними та емоційними розладами [7,8]. Алгоритми машинного навчання дозволяють створювати моделі для класифікації пацієнтів за даними функціональної конектоміки [4].

Епілепсія

Встановлено, що епілептичні напади є результатом порушеної взаємодії цілої мережі мозкових ділянок, а не лише локальних вогнищ. Використання fMRI, EEG і MEG дозволяє визначати патологічні мережі й обирати оптимальні мішені для хірургічного лікування [6,8].

Інсульт та реабілітація

У пацієнтів, які перенесли інсульт, конектоміка допомагає прогнозувати відновлення моторних і когнітивних функцій. Виявлення компенсаторних мереж дає можливість розробляти персоналізовані програми реабілітації [3,12].

Нейрохірургія

DTI-трактографія у поєднанні з fMRI застосовується у передопераційному плануванні, дозволяючи нейрохірургам уникати ушкодження критично важливих шляхів, таких як мовні чи моторні тракти [2,3,10].

Таким чином, клінічна конектоміка демонструє практичну цінність: від ранньої діагностики хвороб до індивідуалізації терапевтичних стратегій. У перспективі саме індивідуальні карти конектому пацієнта стануть основою персоналізованої медицини [4,12].

Висновки

Конектоміка стала однією з ключових дисциплін сучасної нейронауки, яка поєднує структурні та функціональні методи візуалізації мозку з алгоритмами обробки великих даних. Використання DTI та трактографії дозволило візуалізувати анатомічні шляхи [2], тоді як методи fMRI, EEG і

MEG дали змогу досліджувати динаміку функціональних мереж [6–8].

Мульти-модальні підходи відкрили можливість інтегрувати дані різного типу та створювати більш реалістичні моделі мозку [10,12]. Використання графової теорії та алгоритмів машинного навчання дозволило перейти від описових характеристик до кількісних і прогностичних моделей мозкових мереж [4,9].

Клінічні застосування демонструють практичну цінність конектоміки — від діагностики нейродегенеративних та психічних хвороб [5–7] до планування нейрохірургічних втручань [3] та прогнозування відновлення після інсульту [12].

Таким чином, конектоміка є міждисциплінарним напрямом, що має величезний потенціал для подальшого розвитку у фундаментальних і клінічних дослідженнях [1,4,12].

Перспективи подальших досліджень

Подальший розвиток конектоміки пов'язаний із кількома ключовими напрямками.

По-перше, необхідна стандартизація методів

збору та обробки даних, що дозволить підвищити відтворюваність результатів і забезпечити коректне порівняння між різними дослідницькими центрами [11].

По-друге, перспективним є розширення мульти-модальних досліджень, що поєднують структурні, функціональні та метаболічні методи (DTI, fMRI, MEG, PET тощо) [10,12].

Також важливим є подальший розвиток алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання, особливо графових нейронних мереж, здатних працювати безпосередньо з мозковими конектомами [4].

Крім того, очікується, що індивідуальні карти мозкових мереж стануть основою для персоналізованої медицини, забезпечуючи діагностику та прогнозування перебігу захворювань у конкретних пацієнтів [5,12].

Інформація про конфлікт інтересів

Потенційних або явних конфліктів інтересів, що пов'язані з цим рукописом, на момент публікації не існує та не передбачається.

Літературні джерела References

1. Sporns O, Tononi G, Kötter R. The human connectome: A structural description of the human brain. *PLoS Comput Biol*. 2005;1(4):e42. doi: 10.1371/journal.pcbi.0010042.
2. Hagmann P, Cammoun L, Gigandet X, Meuli R, Honey CJ, Wedeen VJ, Sporns O. Mapping the structural core of human cerebral cortex. *PLoS Biol*. 2008;6(7):e159. doi: 10.1371/journal.pbio.0060159.
3. Van Essen DC, Smith SM, Barch DM, Behrens TE, Yacoub E, Ugurbil K; WU-Minn HCP Consortium. The WU-Minn Human Connectome Project: An overview. *Neuroimage*. 2013;80:62-79. doi: 10.1016/j.neuroimage.2013.05.041.
4. Fornito A, Zalesky A, Bullmore ET. *Fundamentals of Brain Network Analysis*. 1st ed. San Diego: Academic Press; 2016.
5. Biswal BB, Mennes M, Zuo XN, Gohel S, Kelly C, Smith SM, et al. Toward discovery science of human brain function. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2010;107(10):4734-9. doi: 10.1073/pnas.0911855107.
6. Fox MD, Raichle ME. Spontaneous fluctuations in brain activity observed with functional magnetic resonance imaging. *Nat Rev Neurosci*. 2007;8(9):700-11. doi: 10.1038/nrn2201.
7. Van Dijk KR, Hedden T, Venkataraman A, Evans KC, Lazar SW, Buckner RL. Intrinsic functional connectivity as a tool for human connectomics: theory, properties, and optimization. *J Neurophysiol*. 2010;103(1):297-321. doi: 10.1152/jn.00783.2009.
8. Deco G, Jirsa VK, McIntosh AR. Emerging concepts for the dynamical organization of resting-state activity in the brain. *Nat Rev Neurosci*. 2011;12(1):43-56. doi: 10.1038/nrn2961.
9. Bassett DS, Bullmore ET. Small-world brain networks. *Neuroscientist*. 2006;12(6):512-23. doi: 10.1177/1073858406293182.
10. Smith SM, Vidaurre D, Beckmann CF, Glasser MF, Jenkinson M, Miller KL, et al. Functional connectomics from resting-state fMRI. *Trends Cogn Sci*. 2013;17(12):666-82. doi: 10.1016/j.tics.2013.09.016.
11. Arslan S, Ktena SI, Makropoulos A, Robinson EC, Rueckert D, Parisot S. Human brain mapping: A systematic comparison of parcellation methods for the human cerebral cortex. *Neuroimage*. 2018;170:5-30. doi: 10.1016/j.neuroimage.2017.04.014.
12. Breakspear M. Dynamic models of large-scale brain activity. *Nat Neurosci*. 2017;20(3):340-52. doi: 10.1038/nrn.4497.

Козловська Г.О., Демченко К.О., Гриценко А.О. Конектом людини: нові підходи до картування нейронних мереж.

РЕФЕРАТ. Вступ. Дослідження конектому людини, тобто цілісної карти структурних і функціональних зв'язків головного мозку, є одним із ключових напрямів сучасної нейронауки. Розуміння організації

нейронних мереж відкриває нові перспективи для діагностики та лікування неврологічних і психічних захворювань, а також для розробки інноваційних підходів у нейротехнологіях. Останні десятиліття характеризуються швидким розвитком методів візуалізації та комп'ютерного моделювання, що дозволяє значно розширити уявлення про архітектуру мозкових мереж. **Мета.** Метою статті є аналіз сучасних методів картування конектому людини та визначення їх переваг, обмежень і перспектив розвитку. **Методи.** Проведено огляд публікацій у базах PubMed, Scopus, Web of Science за останні два десятиліття, що присвячені структурній і функціональній конектоміці. Особливу увагу приділено методам дифузійної тензорної томографії (DTI), функціональної магнітно-резонансної томографії (fMRI), магнітоенцефалографії (MEG),

електроенцефалографії (EEG), а також новим підходам, які поєднують мульти-модальні методики та алгоритми штучного інтелекту. **Результати.** Структурна конектоміка базується переважно на DTI та трактографії, що дозволяє візуалізувати провідні шляхи мозку, однак має обмеження у точності для дрібних волокон. Функціональна конектоміка ґрунтується на fMRI, EEG та MEG, які відображають синхронізацію активності різних ділянок мозку в реальному часі. Інтеграція структурних і функціональних даних забезпечує більш повну картину роботи мозку. Перспективним напрямом є використання штучного інтелекту для аналізу великих масивів даних, що дозволяє виявляти нові закономірності у зв'язках нейронних мереж.

Підсумок. Сучасні методи картування конектому людини створюють основу для більш глибокого розуміння нейронної організації мозку та мають значний потенціал у клінічній нейронауці. Подальший розвиток мульти-модальних технологій та алгоритмів машинного навчання сприятиме створенню більш точних моделей конектому, що дозволить оптимізувати діагностику, прогнозування та лікування захворювань нервової системи.

Ключові слова: конектом, нейронні мережі, дифузійна тензорна томографія, функціональна МРТ, штучний інтелект, мозкові мережі, нейровізуалізація.