

Ukrainian Neurosurgical Journal. 2026;32(1):99-105
doi: 10.25305/unj.342454

Алгоритми штучного інтелекту для прийняття рішень щодо тромболізу та тромбектомії

Д.В. Щеглов¹, М.Б. Виваль¹, С.В. Конотопчик¹, В.О. Свиридчук², Д.Л. Тарасенко³, В.О. Любиш⁴, В.В. Савосік⁵

¹ Відділення ендovasкулярної нейрорентгенохірургії, Науково-практичний центр ендovasкулярної нейрорентгенохірургії НАМН України, Київ, Україна

² Кафедра нейроанатомії, Литовський університет медичних наук, Каунас, Литва

³ Кафедра медичної психології, психосоматичної медицини та психотерапії, Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, Київ, Україна

⁴ Відділення 15, Клінічний заклад з надання психіатричної допомоги «Психіатрія», Київ, Україна

⁵ Кафедра біохімії, Навчально-науковий центр «Інститут біології та медицини» Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Надійшла до редакції 29.10.2025
Прийнята до публікації 27.11.2025

Адреса для листування:

Виваль Микола Богданович,
Науково-практичний центр ендovasкулярної нейрорентгенохірургії НАМН України, вул. Платона Майбороди, 32, Київ, 04050, Україна, e-mail: vyval_mukola@ukr.net

Гострий ішемічний інсульт є невідкладним станом, при якому кожна хвилина зволікання спричиняє незворотну загибель мозкової тканини. Основні методи лікування — внутрішньовенний тромболізис й ендovasкулярна тромбектомія мають суворі часові межі та залежать від точності нейровізуалізації. Традиційне тлумачення зображень потребує досвіду лікаря, є трудомістким і суб'єктивним. Сучасні алгоритми штучного інтелекту (ШІ) відкривають нові можливості для автоматизованого виявлення оклюзій, оцінки об'єму ішемічного ушкодження та формування рекомендацій щодо лікування в реальному часі. Застосування цих алгоритмів може суттєво скоротити час від надходження пацієнта до початку реперфузійної терапії, підвищити точність відбору пацієнтів і стандартизувати клінічні рішення.

Мета: узагальнити сучасні дані про роль алгоритмів ШІ в прийнятті рішень щодо тромболізу та тромбектомії, оцінити їхній потенціал для підвищення швидкості й точності відбору пацієнтів.

Матеріали і методи. Проведено огляд літератури (2015–2025) у базах даних PubMed, Scopus, Web of Science, Google Scholar із використанням ключових слів «artificial intelligence», «machine learning», «deep learning», «stroke», «thrombolysis», «thrombectomy» для узагальнення сучасних даних щодо використання алгоритмів ШІ для прийняття клінічних рішень при гострому ішемічному інсульті. Аналізували клінічні дослідження, огляди та протоколи, що описують застосування ШІ в нейровізуалізації, прогнозуванні та стратифікації пацієнтів.

Результати. Алгоритми глибокого навчання (Viz.ai, e-ASPECTS тощо) забезпечують автоматичну обробку комп'ютерних і магнітно-резонансних томограм, швидко виявляючи ішемічні ураження та оклюзії. Це скорочує час від діагностики до лікування на 15–37 хв, підвищує відтворюваність оцінок і оптимізує відбір пацієнтів для реперфузійної терапії. Моделі, що поєднують клінічні та нейровізуалізаційні дані, демонструють кращу прогностичну точність і дають змогу враховувати індивідуальні особливості пацієнтів.

Висновки. Штучний інтелект стає невід'ємним інструментом у менеджменті інсульту, забезпечуючи швидкий, стандартизований і об'єктивний аналіз даних. Його використання зменшує часові інтервали «door-to-needle» і «door-to-puncture», поліпшує результати лікування та знижує інвалідизацію. Синергія лікаря й ШІ відкриває нову еру персоналізованої інсультної терапії, спрямованої на збереження мозку та життя пацієнтів.

Ключові слова: ішемічний інсульт; тромболізис; тромбектомія; штучний інтелект; машинне навчання

Гострий ішемічний інсульт — це критичний медичний стан, за якого кожна хвилина зволікання призводить до втрати життєздатної мозкової тканини. За відсутності відновлення кровотоку пацієнт з оклюзією великої мозкової артерії (large vessel occlusion (LVO)) щохвилини втрачає близько 1,9 млн нейронів [1]. Цей факт, відомий як «time is brain», свідчить про вирішальне значення часу для успішного лікування. Основними методами терапії залишаються внутрішньовенний тромболізис (уведення тромболітичного препарату) та енд-

васкулярна тромбектомія (механічне видалення тромбу), які мають чітко визначені часові межі та ґрунтуються на оцінці клінічних даних і результатів нейровізуалізації [1]. Сучасні алгоритми штучного інтелекту (ШІ) відкривають нові можливості для автоматизованого виявлення оклюзій, оцінки об'єму ішемічного ушкодження та формування рекомендацій щодо лікування в реальному часі. Їхнє застосування може суттєво скоротити час від надходження пацієнта до початку реперфузійної терапії, підвищити точність відбору пацієнтів і стандартизувати клінічні рішення.

Copyright © 2026 Д.В. Щеглов, М.Б. Виваль, С.В. Конотопчик, В.О. Свиридчук, Д.Л. Тарасенко, В.О. Любиш, В.В. Савосік



Робота опублікована під ліцензією Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Мета: узагальнити сучасні дані про роль алгоритмів ШІ в прийнятті рішень щодо тромболізу та тромбектомії, оцінити їхній потенціал для підвищення швидкості й точності відбору пацієнтів.

Матеріали і методи

Дослідження є оглядом літератури, спрямованим на узагальнення сучасних даних щодо використання алгоритмів ШІ для прийняття клінічних рішень при гострому ішемічному інсульті. Пошук джерел здійснювали в базах даних PubMed, Scopus, Web of Science та Google Scholar за 2015–2025 рр. Для пошуку використовували ключові слова та їхні комбінації: «artificial intelligence», «machine learning», «deep learning», «stroke», «thrombolysis», «thrombectomy», «clinical decision support». Аналізували оригінальні дослідження, систематичні огляди, метааналізи, а також клінічні протоколи й технічні звіти, в яких розглядалася роль ШІ в оцінці нейровізуалізації, прогнозуванні результатів лікування або визначенні показань до тромболізу/тромбектомії.

Штучний інтелект у нейровізуалізації інсульту

Нейровізуалізація – ключовий етап в оцінці пацієнта з інсультом, оскільки дає змогу підтвердити ішемічний характер інсульту, визначити оклюзію судини й об'єм ушкодження мозку. Сучасні алгоритми ШІ дедалі ширше застосовують для автоматичного аналізу знімків комп'ютерної томографії (КТ), магнітно-резонансної томографії (МРТ) та ангіографії. Конволюційні нейронні мережі здатні розпізнавати ознаки LVO на КТ-ангіограмах зі швидкістю й точністю, близькими таких до експертів-радіологів [11]. Комерційні програми, такі як Viz.ai LVO, продемонстрували високу специфічність (95–97%) при виявленні оклюзії внутрішньої сонної артерії або проксимального сегмента середньомозкової артерії, хоча чутливість залишається помірною (78–82%) [2]. Важливо, що негативна прогностична цінність таких систем наближається до 99%, тобто пропущені поодинокі випадки [2]. Автоматичне виявлення LVO дає змогу миттєво сповістити команду інсультного центру про наявність тромбу, паралельно з транспортуванням пацієнта до лікарні, що економить дорогоцінний час. До прикладу, в одному багатоцентровому дослідженні впровадження програмного сповіщення про оклюзію зменшило час від проведення КТ до початку тромбектомії на ≈ 11 хв у середньому [3], що асоціювалося зі зниженням внутрішньолікарняної летальності майже на 60% [3].

Окрім виявлення тромбу, ШІ може кількісно оцінити об'єм інсультного ураження. Алгоритми для автоматичного підрахунку балів за шкалою ASPECTS (Alberta Stroke Program Early CT Score) аналізують нативні КТ-знімки й виявляють ранні ішемічні зміни. Програма e-ASPECTS продемонструвала, що така підтримка підвищує узгодженість оцінок між лікарями. За даними досліджень, за допомогою e-ASPECTS точність визначення ASPECTS лікарями-неврологами зросла з $\sim 72\%$ до $\sim 78\%$, а к-згода поліпшилася з 0,60 до 0,65 ($p=0,013$) [4]. Таким чином, ШІ зменшує варіабельність результатів, отриманих різними спеціалістами, й наближає результати лікарів-початківців до рівня експертів-нейрорадіологів [4].

Більш точна та стандартизована оцінка об'єму інфаркту (ішемічного ядра) важлива для вибору тактики. Наприклад, надто низький бал за ASPECTS

(великий інфаркт) є протипоказанням до тромбектомії в ранні терміни. Автоматизовані пакети, наприклад, RAPID, аналізують перфузійні КТ/МРТ, обчислюючи об'єм ішемічного ядра й зони пенумбри (гіперперфузії). Ці програми дають змогу швидко (< 5 хв) отримати карти мозкової перфузії та розрахувати показники mismatch (невідповідності ядра і пенумбри) [5]. Таким чином, у розширені часові вікна (понад 6 год від початку інсульту) ШІ-додатки типу RAPID допомагають виявити пацієнтів із життєздатною пенумброю, які є кандидатами для пізнього ендovasкулярного втручання. Впровадження автоматичного аналізу перфузії було критичним у випробуваннях, що розширили показання до тромбектомії до 24 год у відібраних хворих (як у дослідженнях DAWN, DEFUSE 3). Такі рішення приймали завдяки швидкому вимірюванню об'єму інфаркту та пенумбри програмним забезпеченням [5].

Завдяки ШІ можливе використання телемедицини та on-line взаємодія при інсульті. В умовах, коли немає невролога чи радіолога (наприклад, у первинних центрах), алгоритми можуть автоматично проаналізувати знімки й надіслати їх спеціалістам у інсультний центр. Такі системи, як Viz.ai, надсилають push-сповіщення на смартфони лікарів зі знімками з виділеним місцем оклюзії. Це спрощує та пришвидшує консиліум. Дослідження продемонстрували, що активація такого алгоритму скоротила час передачі пацієнтів з районних лікарень до центру на ~ 37 хв (із 141 до 104 хв, $p=0,04$) порівняно з періодом до його впровадження [6]. В іншому центрі у Великій Британії впровадження комплексу ШІ-рішень (e-Stroke від Brainomix) зменшило середній час door-in-door-out (від надходження до відправлення пацієнта далі) із 141 до 79 хв (на 62 хв, $p<0,001$), що суттєво збільшило частку хворих, яким проведено тромбектомію та які відновили незалежність (0–2 бали за модифікованою шкалою Ренкіна у 48% порівняно з 16% без ШІ, $p=0,04$) [7]. Ці дані свідчать про те, що інтеграція ШІ в роботу «інсультних мереж» поліпшує логістику та результати лікування.

Алгоритми для прийняття рішення щодо тромболізу

Внутрішньовенний тромболізис (введення рекомбінантного тканинного активатора плазміногену) є ефективним лікуванням ішемічного інсульту за умови його проведення впродовж перших 4,5 год від появи симптомів. Вирішення питання про можливість тромболізу потребує оцінки «терапевтичного вікна» і визначення протипоказань (внутрішньочерепний крововилив або великий об'єм сформованого інфаркту). Штучний інтелект може допомогти вирішити оба завдання. По-перше, на основі клінічних даних і нейровізуалізації алгоритми можуть оцінити фактичне вікно часу й стан мозкової тканини. Наприклад, при інсультах із невідомим часом початку («wake-up» інсульті) рішення про тромболізис можна приймати, якщо МРТ указує на наявність невеликого дифузійного ураження без відповідного сигналу на FLAIR (ознака, що інсульт свіжий). Автоматичні програми можуть інтерпретувати такі МР-знімки або КТ-перфузію та пропонувати лікування тим хворим, в яких наявна значна зона пенумбри й невелике ядро, навіть якщо стандартний часовий поріг перевищено [5]. Так були реалізовані розширені протоколи. Наприклад, дослідження

EXTEND показало ефективність тромболізу до 9 год від початку в пацієнтів, відібраних за перфузійними картами.

По-друге, ШІ виявляє протипоказання до тромболітичної терапії з високою швидкістю. Найбільш грізним протипоказанням є наявність внутрішньомозкового крововиливу за даними КТ. Нейромережі, натреновані на тисячах КТ-сканів, мають чутливість ~82–93% щодо визначення гострого крововиливу, що порівнянно з точністю досвідчених радіологів. Алгоритм глибокого навчання перевищив лікарів-інтернів за чутливістю виявлення крововиливів (0,82 і ~0,70) при специфічності ~0,90 [8]. Таким чином, програма миттєво помітить на знімку геморагію та не допустить помилкового призначення тромболізу. Іншим важливим протипоказанням є великий об'єм інфаркту (тобто інсульт, що охоплює понад 1/3 басейну середньої мозкової артерії). Як зазначено вище, автоматичні інструменти (ASPECTS-аналізатори, програми для сегментації зони інфаркту на перфузійних картах) стандартизовано оцінюють розмір ураження. Це особливо корисно в стресових умовах, коли лікар поспіхом може недогледіти певні ознаки на комп'ютерній томограмі, а ШІ виконає аналіз паралельно та зверне увагу на ознаки обширного інфаркту чи ефекту мас-ефекту від набряку [6–8].

Крім поточної оцінки, алгоритми ШІ можуть прогнозувати ризики ускладнень тромболізу. Одне з грізних ускладнень – симптоматичний внутрішньочерепний крововилив (sICH) після введення тромболітика, що трапляється в 2–5% випадків і значно погіршує прогноз. На основі великих баз даних пацієнтів з інсультом розроблено моделі машинного навчання, які враховують клінічні показники (вік, рівень глікемії, артеріальний тиск, оцінку за National Institutes of Health Stroke Scale (NIHSS) і результати нейровізуалізації, щоб оцінити ймовірність крововиливу до початку тромболізу. Згідно з даними багатоцентрового дослідження 2023 р. (близько 9 тис. випадків), площа під ROC-кривою (AUC) найкращої ML-моделі становила ~0,87 щодо прогнозування ризику симптоматичного крововиливу [9]. Це суттєво перевершує класичні прогностичні шкали. Автори рекомендували використовувати модель нейронної мережі, яка показала найкращу точність, як інструмент для прийняття рішень (щоб лікар міг оцінити прогнозований ризик і користь тромболізу для хворого) [9]. Хоч ШІ-прогноз не є прямим протипоказанням, але, знаючи заздалегідь про високий ризик геморагії в пацієнта, лікар може скоригувати подальшу тактику: ретельніше контролювати тиск, уникати деяких агресивних втручань після тромболізу тощо.

Таким чином, алгоритми ШІ на етапі відбору для тромболізу є «електронним асистентом», який паралельно з лікарем перевіряє знімки на наявність крововиливу, оцінює об'єм інфаркту й пропонує ймовірні прогнози. Це прискорює прийняття рішення та робить його обґрунтованішим, зменшуючи вплив людського чинника в стресових умовах.

Алгоритми для прийняття рішення щодо тромбектомії

Механічна тромбектомія при оклюзії проксимальних артерій мозку (внутрішня сонна, M₁-сегмент середньої мозкової артерії тощо) може кардинально поліпшити наслідки інсульту, якщо виконана вчасно.

Нині є чіткі показання: наявність LVO, що спричиняє неврологічний дефіцит, до 6 год від початку – беззастережне показання до тромбектомії; в інтервалі 6–24 год – у відібраних за результатами додаткової візуалізації (малий інфаркт і велика зона пенумбри) пацієнтів [5]. Штучний інтелект відіграє важливу роль на всіх етапах цього рішення.

Алгоритми виявлення LVO на ангиографічних знімках дають змогу не пропустити оклюзію. Особливо це актуально для випадків, коли оклюзія може бути нетиповою або малопомітною. Дослідження показали, що система Viz.ai LVO може правильно ідентифікувати ~81% оклюзій сонної чи проксимальної середньої мозкової артерії. У 99% випадків відсутності оклюзії програма також дасть негативний результат [11]. Помилкові спрацьовування (хибнопозитивні висновки) трапляються, але специфічність >95% означає, що значна більшість сигналів про виявлення LVO є вірогідні. Більше того, сучасні версії програм уміють класифікувати локалізацію оклюзії, наприклад, розпізнати тромб у M₂-сегментах чи базиллярній артерії, що складніше. Нейрохірург чи інтервенційний радіолог отримують не лише сповіщення про наявність тромбу, а й інформацію, де саме він локалізується, і можуть заздалегідь спланувати тактику втручання [11].

ШІ також виконує аналіз стану колатерального кровообігу – мережі обхідних шляхів, які частково живлять ішемічну зону. Хороші колатералі асоціюються з повільнішим розвитком інфаркту і кращими результатами тромбектомії. Автоматизована оцінка колатералей на КТ-ангиографії (наприклад, модуль e-CTA в системі e-Stroke) може кількісно ранжувати заповнення кров'ю дрібних судин дистальніше від оклюзії [10]. Дослідження на 97 пацієнтах (2024) показало, що за допомогою ШІ-аналізу 58,8% хворих мали «добрі» колатералі. Їхня наявність статистично значущо знижувала ризик смерті чи тяжкої інвалідизації до виписки (відношення шансів – 0,27, p=0,003). Тому колатеральний індекс, визначений ШІ, розглядають як важливий біомаркер: пацієнти з добрим колатеральним кровопостачанням можуть бути кандидатами для втручання навіть у віддалений період від виникнення інсульту, тоді як за поганих колатералей шанс на успіх менший [10]. Автоматизація економить час і дає об'єктивнішу оцінку, ніж візуальна градація колатералей лікарем, яка часто має значну міжособову варіабельність.

Алгоритми ШІ також допомагають визначити кандидатів на тромбектомію в пізньому вікні (>6 год). Як зазначено вище, програми типу RAPID швидко вимірюють об'єм ішемічного ядра (на дифузійних МРТ або CBF-картах КТ) та об'єм гіперперфузії (на Tmax-картах). Якщо ядро мале, а пенумбра велика – це mismatch-профіль, за якого тромбектомія доцільна навіть через 9, 12 чи 16 год після виникнення інсульту. Алгоритми автоматично підраховують співвідношення penumbra/core і визначають, чи відповідає пацієнт критеріям, подібним до таких випробування DAWN/DEFUSE. У цьому індійському дослідженні, де застосували RAPID, результати аналізу (об'єми та співвідношення) були отримані за 5 хв для кожного пацієнта. Троє хворих, пролікованих за межами стандартних 6 год, мали добрий функціональний результат за 3 міс [5]. Завдяки таким технологіям нині показання до тромбектомії розширено. Американська

асоціація серця/інсульту в 2018 р. запропонувала проводити механічну екстракцію тромбу в терміни до 16 чи 24 год у пацієнтів, відібраних за допомогою перфузійного скринінгу [1]. Тому ШІ може бути невід'ємним компонентом цього скринінгу, гарантуючи його швидкість і стандартизацію в різних центрах.

Важливим напрямом є прогнозування наслідків після тромбектомії. Не всі пацієнти однаково відновлюються навіть при успішній реканалізації судини. Це залежить від віку, коморбідності, розміру інфаркту, часу ішемії тощо. Моделі машинного навчання здатні на ранньому етапі, використовуючи дані першої доби, спрогнозувати, чи досягне пацієнт функціональної незалежності через 3 міс (mRS 0–2).

Недавно опубліковано велику роботу з Німецького реєстру, де нейронну мережу тренували на 7 485 випадках інсульту з тромбектомією [12]. Модель проаналізувала 30 різних параметрів (вік, оцінку за NIHSS при госпіталізації та через 24 год, отримання тромболізу, об'єм інфаркту, наявність геморагії тощо) і визначила ключові чинники прогнозу. Після оптимізації 7 предикторів було достатньо для точної роботи нейромережі (AUC $\approx 0,90$ щодо прогнозування сприятливого результату). Для порівняння, точність прогнозу лікарів-неврологів на другий день зазвичай значно нижча. Ця модель фактично надає лікарю ймовірність, що пацієнт відновиться, і може бути корисною для планування подальшої реабілітації, інформування родичів, а також для вибору тактики (наприклад, агресивнішого лікування, якщо прогноз поганий). Цікавим є те, що автори зробили модель «інтерпретованою», тобто вона вказує, які чинники найбільше вплинули на прогноз у хворого (наприклад, дуже високий бал за NIHSS і внутрішньочерепна геморагія погіршують прогноз, а молодий вік та відсутність інсульту в анамнезі – поліпшують) [12]. Це підвищує довіру лікарів до таких інструментів й інтегрує їх в клінічне мислення.

Інтеграція алгоритмів у клінічну практику

Упровадження ШІ в систему надання допомоги при інсульті відбувається поступово. Існують системи підтримки прийняття рішень, які інтегруються з лікарняними PACS (Picture Archiving and Communication System) і мережами обміну зображеннями. У мережевій моделі «hub-and-spoke» (центр-сателіти), яку використовують в інсультній службі, це особливо актуально: ШІ може бути сполучною ланкою, що забезпечує швидку маршрутизацію пацієнтів. Програмні продукти типу Viz.ai або e-Stroke автоматично передають результати аналізу знімків між лікарнями. Це економить час на очікування висновку радіолога й телефонних консультацій. Багато центрів повідомили про скорочення показників door-to-needle та door-to-groin часу після впровадження таких інструментів. За даними рандомізованого кластерного дослідження, середній час від госпіталізації до проколу артерії при тромбектомії зменшився на 11,2 хв завдяки автоматизованому виявленню оклюзій і груповому сповіщенню команди через захищений месенджер [3]. Інше дослідження показало зменшення часу транспортування з лікарні в лікарню на ~ 37 хв, якщо в «спіцевій» лікарні було встановлено програмне забезпечення Viz.ai, порівняно з лікарнями, де його не було ($p=0,04$) [6]. У британському центрі впровадження платформи e-Stroke дало змогу скоротити door-in-door-out на 62 хв [7]. Виграш у часі

дає змогу врятувати більше життєздатної мозкової тканини від інфаркту й більшій кількості пацієнтів отримати належне лікування. Після впровадження ШІ-аналізу LVO відзначено зниження летальності серед пацієнтів з інсультом (13% порівняно з 31%, $p<0,001$), хоча показники функціонального відновлення через 90 днів не відрізнялися значно [3]. Можливо, пришвидшення допомоги дало змогу запобігти деяким фатальним наслідкам (наприклад, раніше виконана тромбектомія запобігла геморагічній трансформації чи набряку мозку), хоча щодо неврологічного дефіциту різниці не виявлено.

Інтеграція ШІ в клініку потребує організаційних змін, зокрема наявності протоколів взаємодії людина-алгоритм. Телемедичні консультанти (неврологи, нейрохірурги) повинні мати доступ до результатів ШІ-аналізу в режимі реального часу. Часто такі системи поставляються з мобільними додатками: лікар може переглянути серію зображень із розміченими ШІ зонами (вогнище ішемії, колатералі, оклюзія) на своєму телефоні, перебуваючи поза лікарнею, і негайно дати рекомендацію щодо тромболізу чи переведення в центр. У США такі програми вже сертифіковані регулятором Food and Drug Administration (FDA) як програмні медичні вироби. У великій мережі лікарень (Atrium Health, США) впровадження Viz.ai дало змогу налагодити єдиний протокол code stroke: при підозрі на інсульт КТ-ангіографія автоматично надсилається на хмарний сервіс, де ШІ перевіряє її на оклюзію, і якщо виявляє її, то всі члени команди отримують сигнал із зображеннями. Це особливо важливо в невеликих лікарнях, де немає цілодобового чергування нейрорадіолога. Алгоритм усуває цю прогалину, виконуючи скринінг знімків і не змушуючи чекати експертного висновку [2]. Звісно, остаточне рішення завжди приймає лікар, але він отримує більше даних швидше, ніж раніше. У телемедичній моделі значення має також зменшення непотрібних викликів доцентрових команд (наприклад, хибних виїздів ангіографічної команди вночі, якщо насправді LVO немає, ШІ може запобігти цьому, відфільтрувавши випадок).

Виклики та обмеження

Попри значні успіхи, впровадження ШІ в інсультології стикається з низкою викликів. Перший – це надійність і валідність алгоритмів у різних популяціях та умовах. Моделі глибокого навчання часто тренуються на даних одного регіону чи навіть окремого центру. Якщо застосувати їх в іншій лікарні, то точність може знизитися через різницю в сканерах, протоколах зйомки або через особливості пацієнтів [13]. Наприклад, модель, натренована на популяції європейської раси, може мати помилки в азійській популяції з іншими чинниками ризику (відомо, що деякі васкулопатії, наприклад, хвороба моя-моя, характерні лише для азійських країн і рідкісні в західних країнах) [14]. Алгоритм, навчений на товщині 1 мм МРТ, може втратити чутливість на знімках із товщиною 5 мм. Тому необхідна широка багатоцентрова валідація, перед тим як впроваджувати інструмент повсюдно. Розробники поступово вирішують це завдання, наприклад, залучають дані з різних країн у тренувальні вибірки, адаптують алгоритми під різні параметри зйомки або виконують постмаркетинговий нагляд, відстежуючи продуктивність ШІ після впровадження в новому місці та додатково навчаючи його за потреби [13].

Другий великий виклик – це прозорість і пояснюваність алгоритмів. Більшість сучасних моделей є «чорними скринями», що видають результат (наприклад, «оклюзія є» або «ASPECTS 7») без пояснення того, як вони дійшли такого висновку [15]. Така непрозорість може спричинити недовіру в клініцистів. Лікар звик розуміти обґрунтування діагнозу, наприклад, бачити крововилив на знімку. Якщо ж ШІ стверджує, що крововилив є, але місце не позначене або ознаки непомітні для ока, то лікар може засумніватися й витратити час на перевірку. Як наслідок, «дефіцит довіри» є суттєвою перешкодою для впровадження ШІ. Для високоризикованих рішень (відмова від тромболізу чи рішення про виконання операції) лікарі не схильні покладатися на рекомендації машини без зрозумілого обґрунтування [13]. Тому нині багато уваги приділяють розвитку Explainable AI (EAI) – методів, що дають змогу пояснити рішення моделі. Наприклад, застосовують Gradient-Weighted Class Activation Mapping (grad-CAM) технології, які підсвічують ділянки зображення, що стали підставою для певного висновку мережі (показуючи лікарю, де вони знайшли ознаку оклюзії) [16]. Інший підхід – створення інтерпретованіших моделей, які видають зрозумілі для людини показники (об'єм пенумбри (мл), індекс колатералей тощо), а не абстрактні ймовірності. Недостатня інтерпретованість нині офіційно визнається проблемою, що знижує довіру й затримує адаптацію ШІ в медицині [17].

Третій аспект – юридичні й етичні питання відповідальності. Коли рішення приймає лікар, то він відповідає за нього. Якщо в процес залучений алгоритм, то ситуація ускладнюється: хто винен, якщо ШІ помилився, і пацієнт постраждав? Формально, лікар є відповідальним за лікування. Однак, якщо він дотримувася рекомендації алгоритму, то виникає етична дилема. Розробники й постачальники ШІ також є учасниками процесу. Чи несуть вони часткову відповідальність за помилки алгоритму? У регуляторному полі ці питання остаточно не врегульовані [18]. Експерти наголошують, що потрібні чіткі межі: прозора фіксація дій ШІ, журнал рішень, можливість аудиту алгоритму для з'ясування причин помилки. Додатково постає питання інформованої згоди пацієнта: чи слід повідомляти, що при ухваленні рішення лікар спирався на висновки ШІ, і чи згоден пацієнт на такий «асистувальний» режим лікування. Нині в клінічній практиці це майже ніде не реалізовано явно, але дискусії тривають. Якщо алгоритм виявив ознаки інсульту раніше за лікаря, а лікар знехтував цим, чи несе він відповідальність за ігнорування сигналу? Вочевидь, юридична практика розвиватиметься разом зі поширенням ШІ [13].

Четвертий виклик – валідність і сертифікація. Щоб алгоритм набув широкого поширення, він має пройти клінічні випробування, продемонструвати стабільну точність і користь. Органи охорони здоров'я та регулятори (наприклад, FDA, European Medicines Agency (EMA)) висувають суворіші вимоги до інструментів ШІ. Необхідно провести дослідження на «реальних» даних, порівняння з лікарями, довести, що використання алгоритму поліпшує показники. Для інструментів, які дають рекомендації щодо лікування, планка ще вища – адже по суті це вже елемент клінічного рішення, а не просто додатковий аналіз зображення. Поки що більшість ШІ-систем в

інсультології отримали схвалення як діагностичні допоміжні засоби, тобто вони інформують лікаря, але не замінюють його рішення. Наприклад, e-ASPECTS чи Viz LVO схвалені саме в цій категорії. Це означає, що лікар має підтвердити їхні висновки перед тим, як прийняти певне рішення [2, 4]. Суворі вимоги до точності також зумовлюють питання про чутливість і специфічність. Якщо алгоритм пропустить хоча б кілька відсотків оклюзій (а він пропускає ~18%) [2], чи прийнятно це? Адже пропущений пацієнт міг би втратити шанс на лікування. З іншого боку, надмірна чутливість ціною низької специфічності спричинить багато хибних тривог і марно мобілізуватиме команди. Отже, баланс та визначення порогів – важливі технічні й етичні аспекти, які необхідно дослідити перед впровадженням алгоритму.

П'ятий виклик – навчання персоналу. Впровадження нових технологій потребує підготовки лікарів і медсестер. Необхідно розробити зрозумілі інтерфейси та протоколи, наприклад, визначити, хто і як переглядає ШІ-висновки, як їх задокументувати, що робити в разі невідповідності оцінці лікаря. Лікарі мають розуміти обмеження ШІ, зокрема, в яких ситуаціях він може помилятися. Це новий різновид техніки, що потребує навчання на курсах і тренінгів. Деякі лікарі, особливо старшого покоління, можуть скептично ставитись або не довіряти алгоритмам. Важливо надати їм доказові дані про користь використання ШІ, навчити правильно інтерпретувати результати. Потрібна культура співпраці лікаря з ШІ: коли алгоритм сприймається не як конкурент чи загроза авторитету, а як інструмент, подібний до нового виду медичного обладнання [13, 18].

Не можна забувати про етику й упередження. Алгоритми – розробка людини, тому вони можуть мимоволі успадкувати упередження, наявні у вихідній інформації. Наприклад, якщо модель навчена на вибірці, де більшість становлять чоловіки, вона може гірше працювати в жінок. Якщо дані надходять переважно з міських лікарень, то алгоритм може недооцінити проблеми пацієнтів із сільської місцевості. Завдання розробників і клініцистів – виявляти такі нюанси та коригувати моделі (через оптимізацію баз даних, уведення контрольних поправок). З позицій етики, використання ШІ має бути пацієнтоцентричним, тобто пацієнт має право на якісну допомогу з/без ШІ, технології мають поліпшити наслідки, а не використовуватися заради цікавості або реклами [18].

Перспективи

Перспективи застосування ШІ в цереброваскулярній медицині надзвичайно широкі. Один з напрямів – комбінування ШІ-алгоритмів із біомаркерами та клінічними шкалами для отримання комплексних прогнозів. Наприклад, уявімо модель, що бере до уваги не лише знімки, а й генетичні маркери, дані про згортання крові, результати нейропсихологічних тестів. Це вписується в концепцію персоналізованої медицини, де рішення про лікування індивідуалізоване для конкретного пацієнта. Можливо, за кілька років при госпіталізації з інсультом буде виконуватися швидкий аналіз крові на біомаркери ішемічного ушкодження, і ШІ об'єднає цю інформацію з нейровізуалізацією для точнішого визначення часу від початку інсульту чи ймовірності успіху тромбектомії. Триває пошук таких маркерів і створення мультифакторних моделей [19].

Інший цікавий напрям – генеративні моделі та симуляція клінічних сценаріїв. Generative Adversarial Networks (GAN) застосовують для створення синтетичних медичних зображень, що можуть доповнювати тренувальні набори даних [20]. У контексті інсульту це означає, що можна «згенерувати» тисячі віртуальних комп'ютерних томограм із різними варіантами ішемії аби навчити алгоритм розпізнавати навіть рідкісні випадки. Також генеративні моделі здатні прогнозувати динаміку інфаркту, наприклад, на основі початкового знімка спрогнозувати, як виглядатиме мозок через 6 год без лікування. Такі інструменти могли б допомогти з вибором тактики: якщо модель симулює, що без втручання інфаркт різко збільшиться, це аргумент на користь агресивного лікування. Застосування Large Language Models (LLM) відкриває ще одну перспективу – поліпшення ведення документації, підтримка клінічного мислення [21]. У майбутньому лікар зможе описати ситуацію пацієнта мовою, а ШІ-система, інтегрована в медичний довідник, підкаже, які є варіанти лікування, ґрунтуючись на найновіших настановах і даних, адаптованих до параметрів пацієнта. Для інсульту це може бути корисно при нестандартних сценаріях, наприклад, у разі поєднання ішемічного інсульту з недавньою операцією система допоможе оцінити ризику тромболізу тощо [22].

З погляду системи охорони здоров'я, в майбутньому можливе створення єдиних платформ для ведення пацієнта з інсультом: від виклику швидкої допомоги до реабілітації. Штучний інтелект супроводжуватиме на всіх етапах: на догоспітальному – допомагатиме розпізнати інсульт за симптомами (вже є прототиби додатків, що аналізують мову, обличчя, координацію через смартфон), у стаціонарі – виконуватиме опис комп'ютерних чи магнітно-резонансних томограм, пропонуватиме план лікування, а після виписки – монітуватиме відновлення (через пристрої, які носять, аналізуючи мову, ходу, когнітивні вправи) і сигналізуватиме про відхилення чи ускладнення. Таким чином, ШІ інтегрується в континуум допомоги при інсульті, підсилюючи кожен ланку [23].

Звісно, усі ці перспективи необхідно ретельно дослідити щодо безпечності й ефективності, але тенденція очевидна: ШІ стає невід'ємною частиною еволюції допомоги при інсульті.

Без перебільшення можна стверджувати, що розпочинається нова ера в лікуванні інсульту. Штучний інтелект, інтегрований в допомогу при інсульті, може підняти планку стандартів: забезпечити ще швидшу, точнішу та персоналізованішу терапію. Поступове впровадження цих технологій, що ґрунтується на доказовій базі, вже найближчим часом може значно зменшити тягар інсульту в суспільстві: зменшити смертність і рівень інвалідизації, поліпшити якість життя пацієнтів й оптимізувати використання ресурсів охорони здоров'я. Це наочний приклад того, як інновації на стику інформаційних технологій і медицини є корисними для клініки, оскільки дають змогу досягти найвищої мети – врятувати людський мозок і життя.

Висновки

Нині спостерігається перехід від експериментальних розробок ШІ у сфері інсульту до впровадження в реальну клінічну практику. Алгоритми не замінюють лікаря-невролога чи нейрохірурга,

але є потужним інструментом, що підсилює їхні можливості. На етапі діагностики ШІ забезпечує швидкість (аналіз зображень за лічені хвилини) і об'єктивність (стандартизовану оцінку об'єму ураження, наявності оклюзії, тощо). При прийнятті рішень щодо тромболізу й тромбектомії алгоритми допомагають вилучити невідповідних пацієнтів (уникаючи непотрібного або небезпечного втручання) і виявити тих, хто може виграти від агресивного лікування, навіть якщо людське око не побачило б резервів. Клінічне значення таких технологій – у кращих результатах для пацієнтів: більше врятованих від тяжкої інвалідності, зниження смертності від інсультів, швидше повернення до активного життя. Показово, що там, де впроваджено ШІ, вдається суттєво скоротити ключові часові інтервали («door-to-needle», «door-to-puncture»), а кожна зекономлена хвилина потенційно рятує мільйони нейронів.

Однак упровадження ШІ має відбуватися поступово й відповідально. Необхідно подолати перешкоди – від технічних (узгодженість даних, кібербезпека) до людських (навчання користувачів, формування довіри). Моделі ШІ мають бути прозорими, щоб їхні рішення можна було пояснити пацієнту. Лікарі мають критично мислити й використовувати ШІ як «другу думку», координатора, що пропонує інсайти, але остаточний вибір терапії залишається за клініцистом. Симбіоз людини та ШІ має найбільший потенціал.

Розкриття інформації

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування

Дослідження не мало спонсорської підтримки.

Список літератури

1. Powers WJ, Rabinstein AA, Ackerson T, Adeoye OM, Bambakidis NC, Becker K, Biller J, Brown M, Demaerschalk BM, Hoh B, Jauch EC, Kidwell CS, Leslie-Mazwi TM, Ovbiagele B, Scott PA, Sheth KN, Southerland AM, Summers DV, Tirschwell DL; American Heart Association Stroke Council. 2018 Guidelines for the Early Management of Patients With Acute Ischemic Stroke: A Guideline for Healthcare Professionals From the American Heart Association/American Stroke Association. *Stroke*. 2018 Mar;49(3):e46-e110. doi: 10.1161/STR.0000000000000158
2. Karamchandani RR, Helms AM, Satyanarayana S, Yang H, Clemente JD, Defilipp G, Strong D, Rhoten JB, Asimos AW. Automated detection of intracranial large vessel occlusions using Viz.ai software: Experience in a large, integrated stroke network. *Brain Behav*. 2023 Jan;13(1):e2808. doi: 10.1002/brb3.2808
3. Martinez-Gutierrez JC, Kim Y, Salazar-Marioni S, Tariq MB, Abdelkhalq R, Niktabe A, Ballekere AN, Iyyangar AS, Le M, Azeem H, Miller CC, Tyson JE, Shaw S, Smith P, Cowan M, Gonzales I, McCullough LD, Barreto AD, Giancardo L, Sheth SA. Automated Large Vessel Occlusion Detection Software and Thrombectomy Treatment Times: A Cluster Randomized Clinical Trial. *JAMA Neurol*. 2023 Nov 1;80(11):1182-1190. doi: 10.1001/jamaneurol.2023.3206
4. Kobeissi H, Kallmes DF, Benson J, Nagelschneider A, Madhavan A, Messina SA, Schwartz K, Campeau N, Carr CM, Nasr DM, Braksick S, Scharf EL, Klaas J, Woodhead ZVJ, Harston G, Briggs J, Joly O, Gerry S, Kuhn AL, Kostas AA, Nael K, AbdalKader M, Kadirvel R, Brinjikji W. Impact of e-ASPECTS software on the performance of physicians compared to a consensus ground truth: a multi-reader, multi-case study. *Front Neurol*. 2023 Sep 7;14:1221255. doi: 10.3389/fneur.2023.1221255
5. Vyas D, Bohra V, Karan V, Huded V. Rapid Processing

- of Perfusion and Diffusion for Ischemic Strokes in the Extended Time Window: An Indian Experience. *Ann Indian Acad Neurol*. 2019 Jan-Mar;22(1):96-99. doi: 10.4103/aian.AIAN_142_18
6. Field NC, Entezami P, Boulos AS, Dalfino J, Paul AR. Artificial intelligence improves transfer times and ischemic stroke workflow metrics. *Interv Neuroradiol*. 2023 Oct 17;15910199231209080. doi: 10.1177/15910199231209080
 7. Nagaratnam K, Neuhaus A, Briggs JH, Ford GA, Woodhead ZVJ, Maharjan D, Harston G. Artificial intelligence-based decision support software to improve the efficacy of acute stroke pathway in the NHS: an observational study. *Front Neurol*. 2024 Jan 18;14:1329643. doi: 10.3389/fneur.2023.1329643
 8. Angkurawaranon S, Sanorsiang N, Unsrisong K, Inkeaw P, Sripan P, Khumrin P, Angkurawaranon C, Vanियapong T, Chitapanarux I. A comparison of performance between a deep learning model with residents for localization and classification of intracranial hemorrhage. *Sci Rep*. 2023 Jun 20;13(1):9975. doi: 10.1038/s41598-023-37114-z
 9. Wen R, Wang M, Bian W, Zhu H, Xiao Y, He Q, Wang Y, Liu X, Shi Y, Hong Z, Xu B. Machine learning-based prediction of symptomatic intracerebral hemorrhage after intravenous thrombolysis for stroke: a large multicenter study. *Front Neurol*. 2023 Oct 20;14:1247492. doi: 10.3389/fneur.2023.1247492
 10. Scavasine VC, Stoliar GA, Teixeira BCA, Zétola VHF, Lange MC. Automated evaluation of collateral circulation for outcome prediction in acute ischemic stroke. *J Stroke Cerebrovasc Dis*. 2024 Apr;33(4):107584. doi: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2024.107584
 11. Yahav-Dovrat A, Saban M, Merhav G, Lankri I, Abergel E, Eran A, Tanne D, Nogueira RG, Sivan-Hoffmann R. Evaluation of Artificial Intelligence-Powered Identification of Large-Vessel Occlusions in a Comprehensive Stroke Center. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2021 Jan;42(2):247-254. doi: 10.3174/ajnr.A6923
 12. Shirvani O, Warnat-Herresthal S, Savchuk I, Bode FJ, Nitsch L, Stösser S, Ebrahimi T, von Danwitz N, Asperger H, Layer J, Meissner J, Thielscher C, Dorn F, Lehnen N, Schultze JL, Petzold GC, Weller JM; GSR-ET Investigators. Machine learning models for outcome prediction in thrombectomy for large anterior vessel occlusion. *Ann Clin Transl Neurol*. 2024 Oct;11(10):2696-2706. doi: 10.1002/acn3.52185
 13. Park S. Rethinking Clinical AI Applications in Stroke – Pitfalls, Misconceptions, and Directions for Responsible Use. *J Neurosonol Neuroimag*. 2025;17(1):1-10. doi: 10.31728/jnn.2025.00171
 14. Kim JS. Moyamoya Disease: Epidemiology, Clinical Features, and Diagnosis. *J Stroke*. 2016 Jan;18(1):2-11. doi: 10.5853/jos.2015.01627.
 15. Heo J. Application of Artificial Intelligence in Acute Ischemic Stroke: A Scoping Review. *Neurointervention*. 2024 Mar;20(1):4-14. doi: 10.5469/neuroint.2025.00052
 16. Zhang H, Ogasawara K. Grad-CAM-Based Explainable Artificial Intelligence Related to Medical Text Processing. *Bioengineering (Basel)*. 2023 Sep 10;10(9):1070. doi: 10.3390/bioengineering10091070
 17. Kelly CJ, Karthikesalingam A, Suleyman M, Corrado G, King D. Key challenges for delivering clinical impact with artificial intelligence. *BMC Med*. 2019 Oct 29;17(1):195. doi: 10.1186/s12916-019-1426-2
 18. Weiner EB, Dankwa-Mullan I, Nelson WA, Hassanpour S. Ethical challenges and evolving strategies in the integration of artificial intelligence into clinical practice. *PLOS Digit Health*. 2025 Apr 8;4(4):e0000810. doi: 10.1371/journal.pdig.0000810
 19. Agripnidis T, Ayobi A, Quenet S, Chaibi Y, Avare C, Jacquier A, Girard N, Hak JF, Reyre A, Brun G, El Ahmadi AA. Performance of an artificial intelligence tool for multi-step acute stroke imaging: A multicenter diagnostic study. *Eur J Radiol Open*. 2025 Aug 29;15:100678. doi: 10.1016/j.ejro.2025.100678
 20. Ivanenko M, Wanta D, Smolik WT, Wróblewski P, Midura M. Generative-Adversarial-Network-Based Image Reconstruction for the Capacitively Coupled Electrical Impedance Tomography of Stroke. *Life (Basel)*. 2024 Mar 21;14(3):419. doi: 10.3390/life14030419
 21. Owens D, Nguyen DQ, Dohopolski M, Rousseau JF, Peterson ED, Navar AM. Accuracy of Large Language Models to Identify Stroke Subtypes Within Unstructured Electronic Health Record Data. *Stroke*. 2025 Oct;56(10):2966-2975. doi: 10.1161/STROKEAHA.125.051993
 22. Qiang S, Zhang H, Liao Y, Zhang Y, Gu Y, Wang Y, Xu Z, Shi H, Han N, Yu H. Application of Large Language Models in Stroke Rehabilitation Health Education: 2-Phase Study. *J Med Internet Res*. 2025 Jul 22;27:e73226. doi: 10.2196/73226
 23. Alhakeem A, Chaurasia B, Khan MM. Revolutionizing stroke prediction: a systematic review of AI-powered wearable technologies for early detection of stroke. *Neurosurg Rev*. 2025 May 29;48(1):458. doi: 10.1007/s10143-025-03629-4