

Ukrainian Neurosurgical Journal

Том 32, №1, 2026

Науково-практичний журнал (спеціалізоване видання для лікарів)
Заснований у квітні 1995 року. Виходить 4 рази на рік.
Свідоцтво про державну реєстрацію КВ №23771-13611ПР від 14 лютого 2019 р.

Журнал входить до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть бути опубліковані результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії (Наказ МОН України від 10.12.2024 № 1721)
Журнал включено до наукометричної бази Scopus.

Всі рукописи, що надходять до редакції, обов'язково рецензуються

Засновники

Інститут нейрохірургії ім. акад. А.П. Ромоданова
НАМН України
Українська Асоціація Нейрохірургів
Національна академія медичних наук України

Видавець

Інститут нейрохірургії ім. акад. А.П. Ромоданова
НАМН України

Адреса видавця та редакції

вул.Платона Майбороди, 32, Київ, 04050, Україна
Тел. +380 44 483-91-98
Факс +380 44 489-35-61
E-mail: unj.office@gmail.com
http://theunj.org

Підписано до друку

з оригінал-макета 09.03.2026

Формат 60×84¹/₈. Папір офсетний №1

Замовлення № 26-10

Наклад 300 прим.

Поліграфічні послуги

ФОП Голосуй І.Е.

Свідоцтво АА №921702

вул. Кирилівська, 86, Київ, 04080, Україна

тел. +380 44 239-19-85

Відповідальність за зміст рекламних матеріалів несе
рекламодавець

Усі права стосовно опублікованих статей належать їх
авторам

Усі права стосовно будь-яких інших публікацій, крім
авторських статей, належать видавцеві



Видання використовує ліцензію
Creative Commons - CC BY - Зазначення Авторства -
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.
Ця ліцензія дозволяє іншим розповсюджувати, редагувати
твір, вносити в нього зміни, і брати його за основу для
інших творів, навіть для використання з комерційною
метою, за умови зазначення авторства.

Головний редактор

Педаченко Євгеній Георгійович • Київ, Україна

Заступник головного редактора

Білошицький Вадим Васильович • Київ, Україна

Заступник головного редактора

Васюта Віра Анатоліївна • Київ, Україна

Завідувач редакції

Никифорова Анна Миколаївна • Київ, Україна

Редакційна колегія

Армонда Рокко А. • Вашингтон, Сполучені Штати

Арраез Мігель А. • Малага, Іспанія

Валадка Алекс Б. • Даллас, Сполучені Штати

Вукич Мирослав • Загреб, Хорватія

Гаврилюк Грегорі В. Дж. • Клівленд, Сполучені Штати

Газіоглу Нурпері • Істанбул, Туреччина

Гук Андрій Петрович • Київ, Україна

Ендрюс Рассел Дж. • Лос Гатос, Сполучені Штати

Зельман Володимир • Лос-Анджелес, Сполучені Штати

Земскова Оксана Володимирівна • Київ, Україна

Калангу Казаді • Хараре, Зімбабве

Карієв Гайрат Маратович • Ташкент, Узбекистан

Като Йоко • Тойоакі, Японія

Малишева Тетяна Андріївна • Київ, Україна

Медведев Володимир Вікторович • Київ, Україна

Меламед Ізраїль • Беер Шева, Ізраїль

Нетлюх Андрій Михайлович • Львів, Україна

Райнов Микола • Мюнхен, Німеччина

Расуліч Лукас Грюїца • Белград, Сербія

Розуменко Володимир Давидович • Київ, Україна

Рутка Джеймс • Торонто, Канада

Сірко Андрій Григорович • Дніпро, Україна

Смоланка Володимир Іванович • Ужгород, Україна

Смрчка Мартін • Брно, Чеська Республіка

Фіщенко Яків Віталійович • Київ, Україна

Шлобін Натан А. • Нью-Йорк, Сполучені Штати

Хижняк Михайло Віталійович • Київ, Україна

Цимбалюк Віталій Іванович • Київ, Україна

Оригінал-макет журналу затверджений і рекомендований до друку
та поширення через Інтернет на спільному засіданні Редакційної
колегії Ukrainian Neurosurgical Journal та вченої ради Інституту
нейрохірургії ім. акад. А.П. Ромоданова НАМН України (протокол
№2 від 27.02.2026)

Перша сторінка обкладинки

Рисунок до статті Irakli B. Goginava, Giorgi Murvelashvili,

Mikheil A. Shavgulidze, Mariia V. Riezunenکو, Giorgi L. Giorgidze "Bifid
median nerve: case report", стор. 126-128

Зміст

Оглядова стаття

- О.С. Солонович, Л.Л. Чеботарьова, Н.В. Медведовська, В.А. Васюта, А.С. Солонович, О.І. Мицак, Є.І. Северенчук, М.С. Кисліцька*
Ураження зорового аналізатора при вибуховій травмі: механізми, діагностика, лікування3-9
- В.В. Білошицький, Ю.В. Завалій, А.В. Пачевська, І.В. Білошицький*
Посткомоційний синдром: Частина 2. Клінічні характеристики, діагностика та лікування..... 10-16

Оригінальна стаття

- А.С. Лисак, А.Ю. Киргичова, А.В. Лобода*
Етапний підхід до лікування больового синдрому в пацієнтів із вогнепальними ураженнями периферичних нервів кінцівок 17-23
- В.А. Перепелиця, Ю.В. Чередниченко, А.Ю. Мірошніченко, А.Г. Сірко, Р.А. Армонда*
Ендоваскулярні втручання в лікуванні хронічних субдуральних гематом 24-39
- Neeraj Prasad, Manish Kumar Nirala, Manisha Gupta, Abhishek Kumar*
Transforaminal lumbar interbody fusion in spondylolisthesis: a prospective evaluation of clinical, radiological, and functional outcomes in a Central Indian cohort 40-51
- Tommy A. Nazwar, Nasim Amar, Farhad Bal'afif, Donny W. Wardhana, Fachriy Bal'afif*
Factors contributing to surgical complexity in giant parasagittal and falxine meningiomas: a case-based review 52-59
- Kuat Widodo, Saryono, Novita Anggraeni*
Global research trends on seizure detection in critical care after decompressive craniectomy: A bibliometric analysis..... 60-68
- О.С. Нехлопочин, В.В. Вербов, Є.В. Чешук, М.В. Вороді*
Розробка та валідація багаторівневої шкали кількісної оцінки механічної експозиції при травматичних ушкодженнях хребта 69-91
- Kenzie Ongko Wijaya, Nunki Puspita Utomo, Muhammad Andika Wibisono, Endro Basuki Sadjiman*
Comparative efficacy of progesterone and vitamin D in improving functional outcomes after traumatic brain injury 92-98
- Д.В. Щеглов, М.Б. Виваль, С.В. Конотопчик, В.О. Свиридюк, Д.Л. Тарасенко, В.О. Любиш, В.В. Савосік*
Алгоритми штучного інтелекту для прийняття рішень щодо тромболізісу та тромбектомії 99-105
- Є.І. Слинько, Р.В. Чамата*
Порівняння мікродиссектомії та мікродиссектомії з корпородезом кейджами при грижах попереково-крижового відділу хребта106-112
- Mykola V. Yehorov, Vasyi V. Shust, Oleg M. Borysenko, Volodymyr O. Fedirko*
The quality of life of patients with vestibular schwannoma assessed using cross-cultural adapted and validated PANQOL and Mayo VSQOL questionnaires in comparison113-125

Спостереження з практики

- Irakli B. Goginava, Giorgi Murvelashvili, Mikheil A. Shavgulidze, Mariia V. Riezunenکو, Giorgi L. Giorgidze*
Bifid median nerve: case report126-128

Ukrainian Neurosurgical Journal. 2026;32(1):3-9
doi: 10.25305/unj.339193

Ураження зорового аналізатора при вибуховій травмі: механізми, діагностика, лікування

О.С. Солонович¹, Л.Л. Чеботарьова², Н.В. Медведовська³, В.А. Васюта⁴, А.С. Солонович⁵, О.І. Мицак¹, Є.І. Северенчук⁶, М.С. Кисліцька⁴

¹ Відділення функціональної діагностики, Інститут нейрохірургії імені акад. А. П. Ромоданова НАМН України, Київ, Україна

² Відділ нейрофізіології, Інститут нейрохірургії імені акад. А. П. Ромоданова НАМН України, Київ, Україна

³ в.о. Головного ученого секретаря апарату Президії НАМН України, Київ, Україна

⁴ Науково-організаційний відділ, Інститут нейрохірургії імені акад. А. П. Ромоданова НАМН України, Київ, Україна

⁵ Консультативно-діагностичне поліклінічне відділення для дорослих, Інститут серця МОЗ України, Київ, Україна

⁶ Консультативне поліклінічне відділення, Інститут нейрохірургії імені акад. А. П. Ромоданова НАМН України, Київ, Україна

Надійшла до редакції 13.09.2025
Прийнята до публікації 14.10.2025

Адреса для листування:

Солонович Олександр Сергійович,
Відділення функціональної
діагностики, Інститут нейрохірургії
імені акад. А.П. Ромоданова, вул.
Платона Майбороди, 32, Київ,
04050, Україна, e-mail: medsolon@
ukr.net

Вибухова травма є однією з найскладніших проблем сучасної офтальмології та неврології, оскільки часто супроводжується тяжкими ушкодженнями органа зору. За даними різних авторів, на частку ураження очей припадає близько 28% від усіх травм, отриманих під час вибухів. Черепно-мозкові травми, які часто поєднуються з вибуховою травмою, у 84% випадків ускладнюються офтальмологічними порушеннями. Це свідчить про надзвичайну вразливість ока до вибухових чинників — ударної хвилі, термічного впливу й уламків.

Найпоширенішими є такі ушкодження, як відкрита травма ока, внутрішньоочні сторонні тіла, розриви очного яблука, відшарування сітківки, травматична оптична нейропатія. Вторинні чинники (осколки, уламки будівель, ґрунт, метал) значно підвищують ризик тяжких ускладнень — ендотельміту, посттравматичної глаукоми, неоваскуляризації сітківки, що часто призводить до інвалідизації.

Діагностика потребує комплексного підходу із застосуванням офтальмологічних (офтальмоскопія, ультразвукове дослідження, оптична когерентна томографія), нейрофізіологічних (зорові викликані потенціали, електроретинографія), нейровізуалізаційних (комп'ютерна томографія та магнітно-резонансна томографія орбіт і головного мозку) методів. Їхнє поєднання дає змогу виявити як локальні ушкодження ока, так і центральні порушення зорових шляхів.

Лікування передбачає невідкладну хірургію (ушивання розривів, видалення сторонніх тіл, вітреоретинальні втручання), профілактику інфекцій (системна та місцева антибіотикотерапія), протизапальну й імуномодулювальну терапію. Важливе значення має своєчасна профілактика симпатичної офтальмії. Для реабілітації застосовують відновлювальні та функціональні методи, спрямовані на збереження залишкового зору й адаптацію пацієнтів.

Таким чином, ураження зорового аналізатора при вибуховій травмі характеризується багатофакторністю механізмів і високим ризиком стійкої втрати зору. Оптимальна діагностика й лікування можливі лише при комплексному мультидисциплінарному підході з акцентом на раннє втручання та тривалу реабілітацію.

Ключові слова: вибухова травма; зоровий аналізатор; контузія зорового аналізатора; травматична оптична нейропатія; діагностика; реабілітація

Вступ

В умовах сучасних воєнних конфліктів зростає кількість пацієнтів із вибуховими травмами (ВТ), які часто супроводжуються ураженням органа зору. З огляду на надзвичайну різноманітність, комбіновану дію та складність механізмів вибухових уражень, травма ока при вибухових пораненнях становить одну з найтяжчих і найсерйозніших проблем сучасної офтальмології та неврології [1]. Дослідження показали, що значна кількість травм зорового аналізатора, спричинених вибухами, супроводжується стійким порушенням зору або його повною втратою [2]. За даними різних авторів, на частку вибухових

поранень ока може припадати близько 28% від загальної кількості травм, спричинених дією вибухової хвилі [3, 4]. Під час операцій Enduring Freedom (OEF) й Operation Iraqi Freedom (OIF) 10–15% бойових травм були пов'язані з ураженням очей [5]. Черепно-мозкові травми (ЧМТ) часто супроводжуються ускладненнями з боку органа зору, частота яких може становити 84% [6]. Ці дані свідчать про високу вразливість зорового аналізатора до прямого й опосередкованого впливу вибухової хвилі, осколків і термічних чинників.

Вибухові речовини, які широко використовуються в сучасних війнах і терористичних атаках, часто призводять до тяжких уражень зорового аналізатора.

Copyright © 2026 О.С. Солонович, Л.Л. Чеботарьова, Н.В. Медведовська, В.А. Васюта, А.С. Солонович, О.І. Мицак, Є.І. Северенчук, М.С. Кисліцька



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

Найтипівшими ушкодженнями при таких травмах є відкрита травма ока, наявність сторонніх тіл в оці, розриви очного яблука, а також ускладнення у вигляді відшарування сітківки та травматичної оптичної нейропатії [7].

Особливу небезпеку становлять вторинні чинники вибуху — осколки, уламки будівель, частинки ґрунту чи металу, які з великою швидкістю проникають у структури очного яблука. При цьому навіть невеликі за розміром внутрішньоочні сторонні тіла можуть спричинити серйозні ускладнення, зокрема ендодальміт, посттравматичну глаукому, неоваскуляризацію сітківки, що призводить до високої частоти інвалідизації пацієнтів [8, 9].

Питання своєчасної діагностики, хірургічної допомоги та реабілітації постраждалих із вибуховими травмами ока набувають актуальності в умовах сучасних збройних конфліктів. Рання та якісна діагностика порушень зору є критично важливою для запобігання інвалідизації пацієнтів.

Механізми ушкодження зорового аналізатора при вибуховій травмі

Очне яблуко є надзвичайно вразливою анатомічною структурою при дії вибухових чинників, що зумовлено його сферичною формою, високим вмістом рідини, багатою васкуляризацією та делікатною будовою внутрішніх тканин [10]. Відкрите анатомічне розташування та відсутність жорсткого кісткового захисту робить орган зору особливо чутливим до механічного, термічного й барометричного впливу вибухової хвилі. Навіть короткочасна дія надлишкового тиску або осколкових пошкоджень може призвести до глибоких структурних змін — від контузій до повного розриву очного яблука [11, 12].

Вибухові пристрої спричиняють чотири основні типи ВТ, які відрізняються за механізмом ураження та впливом на зоровий аналізатор [13].

Первинна ВТ виникає внаслідок дії ударної хвилі, яка спричиняє надлишковий тиск, що поширюється крізь середовища з різною щільністю. Найуразливішими є органи, що містять повітря, — легені, кишківник, барабанна перетинка [14]. Ця хвиля може спричинити контузію очного яблука, відшарування сітківки, внутрішньоочні крововиливи та травматичну оптичну нейропатію. Ударна хвиля призводить до різкого зростання внутрішньоочного тиску, створюючи ризик для структур оболонки ока. Максимальний внутрішньоочний тиск під час вибуху може досягати 0,29 МПа (\approx 2175 мм рт. ст.) уже через 1,63 мс після впливу ударної хвилі, що вдвічі більше за нормальний фізіологічний тиск (\sim 15 мм рт. ст.) у здорових очах [15]. Іншими важливими чинниками, що визначають характер і тяжкість вибухового ураження ока, є піковий надлишковий тиск, досягнутий під час вибуху, тривалість дії вибухової хвилі (імпульс тиску), відстань від епіцентру вибуху, кут нахилу голови, напрямок погляду в момент вибуху (чи були очі спрямовані безпосередньо на джерело ударної хвилі). Ці параметри значною мірою впливають на рівень внутрішньоочного тиску, ступінь деформації очного яблука та ймовірність пошкодження зорового нерва й сітківки [16, 17].

Вторинна ВТ є найпоширенішим механізмом поранень очей [18]. Її спричиняє пряме ураження ока

фрагментами вибухового пристрою або екзогенних уламків, які переміщуються під впливом вибухової хвилі (осколки, скло, метал, ґрунт). Ці уламки можуть призвести до відкритих проникних поранень очного яблука та розриву рогівки або склери [19]. Також можливі пошкодження поверхневих структур очного яблука (закриті поранення ока), зокрема поверхнєве стороннє тіло, ламелярні (часткові) розриви, або непроникна тупа травма та розрив очного яблука. Часто такі ураження супроводжуються комбінованими черепно-лицевими й абдомінальними травмами [20, 21]. З фізіологічного погляду, первинна вибухова хвиля досягає ока значно раніше, ніж уламки, які вона несе. Однак після досягнення очного яблука фрагментами інтенсивність і тяжкість ураження різко зростають. Таким чином, травми другого рівня є вторинними не лише за природою механізму, а й за порядком дії. Вони не існують ізольовано, а майже завжди супроводжуються первинними ушкодженнями, утворюючи комплексні та комбіновані форми травм різного ступеня тяжкості [22].

Третинна ВТ виникає, коли «вибуховий вітер» (blast wind) відкидає тіло постраждалого на тверді поверхні чи предмети [23]. Такий механізм спричиняє тупу травму: закриті ушкодження очей, переломи орбіти, компресійне ураження зорового нерва, ушкодження ококорухових нервів і м'язів. Характерними ураженнями є травми орбіти (переломи кісток), здавлення очного яблука, пошкодження зорового нерва на рівні каналу (оптична нейропатія), птоз, параліч ококорухових м'язів (через ушкодження черепних нервів) [24].

Четвертинна ВТ охоплює додаткові патофізіологічні ефекти, не пов'язані безпосередньо з вибуховою хвилею або уламками. Це може бути дія високих температур, інтенсивного світла (спалах), токсичних речовин. До таких травм належать термічні опіки повік, рогівки, кон'юнктиви й обличчя внаслідок високих температур, фотохімічні ураження сітківки («спалахова сліпота»), хімічні опіки очей під дією вибухових речовин [25, 26]. Вони також можуть супроводжуватися пошкодженням органів дихання, падінням уламків і завалів, які спричиняють черепно-лицеву травму, зокрема переломи основи черепа й ураження очниці [27].

Дослідження Ying-Ying Zou та співавт. (2013) показали, що вибухова хвиля спричиняє патологічні зміни в сітківці, що супроводжуються підвищеною експресією білків, які беруть участь у процесах запалення, набряку й апоптозу (ендотеліальний фактор росту, аквапорин-4, глутамат синтази тощо). Ці зміни виявляли одразу після впливу вибухової хвилі. Вони зберігались до 2 тиж. Найвиразнішими вони були в астроцитах і клітинах Мюллера, що свідчить про їхню важливу роль у патофізіологічних процесах, які відбуваються в сітківці внаслідок дії вибухової хвилі [28].

Особливе значення мають поєднані травми. Тісний зв'язок очних травм, спричинених вибухами, із системними ушкодженнями продемонстрований у багатьох дослідженнях. У дослідженні Erdurman і співавт. частота таких травм становила 69,0%. Weichel і співавт. повідомили про 66,0%, а Kalayci і співавт. — про 60,7% [9, 13, 20]. Найпоширенішими є щелепно-лицьові, ортопедичні та грудні ушкодження.

При струсах мозку часто мають місце зорові вияви через значну інтеграцію зорової системи в корі.

Вибухова травма часто супроводжується ЧМТ, яка може вражати вищі рівні зорового аналізатора: зоровий нерв, хіазму, зорові тракти, а також зорову кору потиличної частки головного мозку [29]. Такі ураження призводять до часткової або повної втрати зору, гомонімної геміанопсії, зорової агнозії та інших порушень зорової функції. Часто ЧМТ є наслідком дифузного аксонального пошкодження, спричиненого різкими прискореннями, уповільненнями або ротаційними рухами голови. Такі механічні впливи викликають раптове порушення функціонування нейронів із масивним вивільненням накопичених нейромедіаторів, що призводить до надмірної активації постсинаптичних мембран. Це запускає патологічний каскад, який супроводжується підвищеним енергетичним запитом, метаболічною кризою та порушенням обміну глюкози в нейронах [30, 31].

Гостра симптоматика зазвичай триває 7–10 днів і має транзиторний характер із поступовим відновленням функцій упродовж кількох тижнів. Однак у частини пацієнтів залишкові або стійкі симптоми можуть зберігатися впродовж місяців або навіть років [32]. До найпоширеніших виявів постконтузійного синдрому належать: головний біль, мігрень, порушення когнітивних функцій, зниження концентрації уваги та зменшення часу реакції. У деяких випадках такі стани можуть асоціюватися з віддаленими тривалими нейродегенеративними процесами [33].

При ушкодженні зорового аналізатора внаслідок ВТ ураження часто є двобічними. За даними літератури, бінокулярні пошкодження при ВТ трапляються в 3,33–72,91% випадків, тоді як при «звичайних» причинах травм ока (побутові, спортивні, виробничі) частота двобічних уражень становить лише 0–2,13% [2, 13].

Діагностика

Діагностика стану зорового аналізатора в пацієнтів, що перенесли ВТ, є складним мультидисциплінарним завданням і потребує участі не лише офтальмолога, а й нейроофтальмолога, невролога, отоларинголога, нейрофізіолога, іноді — нейрохірурга. Основними цілями є діагностика порушень з боку очей і зорового нерва, виявлення пошкоджень центральних відділів зорового аналізатора (кортикальні зони), визначення ступеня та характеру ураження (механічне, ішемічне, компресійне, контузієне, комбіноване).

Важливе значення має ретельний збір анамнезу. Обстеження має передбачати детальний аналіз обставин вибуху: відстань від епіцентру, інтенсивність впливу, тривалість експозиції, використання засобів індивідуального захисту. Варто звернути особливу увагу на втрату свідомості в анамнезі, скарги на зниження зору, диплопію, болі в очах, слъозотечу [34].

Крім того, важливо оцінити попередній офтальмологічний анамнез пацієнта й наявність супутніх системних захворювань, які можуть впливати на зорову функцію або заважати відновленню.

Під час огляду оцінюють стан повік і кон'юнктиви, наявність сторонніх тіл, гематом, крововиливів

та деформації орбіти. Незважаючи на можливу відсутність явних зовнішніх уражень очей або їхніх додатків у пацієнтів із ВТ, офтальмологічне обстеження є критично важливим. Воно має передбачати визначення гостроти зору (візометрія), тонометрію (вимірювання внутрішньоочного тиску), оцінку зіничних реакцій (зокрема відносного аферентного дефекту зіниці), аналіз екстраокулярної моторики, огляд у щілинній лампі для визначення травматичних ушкоджень рогівки, передньої камери, кришталика [35].

Cockerham і співавт. Наголошують на важливості оцінки не лише гостроти зору за висококонтрастними таблицями, а й просторової контрастної чутливості та полів зору [36]. Ураження сітківки або центральної нервової системи можуть не знижувати стандартну гостроту зору, але супроводжуватися аномаліями в полях зору, контрастній чутливості або кольоровідчутті [34].

Периметрія – це метод дослідження та оцінки поля зору, тобто простору, який людина бачить при нерухомому оці й фіксованій голові. Це ключовий тест для діагностики глаукоми, а також для оцінки стану зорового нерва та сітківки [37]. Основними типами периметрії є кінетична периметрія, де використовується рухомий світловий стимул, і статична периметрія, коли спалахують стаціонарні вогні різної інтенсивності. Стандартна автоматизована периметрія (SAP) нині є найпоширенішим методом, що використовує автоматизоване статичне тестування для більш стандартизованих і відтворюваних результатів [38].

Візуалізаційні дослідження можуть бути корисними для уточнення характеру й обсягу ураження. Комп'ютерна томографія (КТ) і магнітно-резонансна томографія (МРТ) орбіти візуалізують зоровий нерв, зоровий канал та оцінюють наявність переломів, кісткових фрагментів або гематоми оболонки зорового нерва [39].

Методи візуалізації, такі як офтальмоскопія та оптична когерентна томографія (ОКТ), можуть виявити мінімальні, але клінічно значущі зміни — набряк диска зорового нерва або стоншення шару нервових волокон сітківки, наявність геморагій, розривів, відшарування тощо [40].

Оптична когерентна томографія – це сучасний неінвазивний метод діагностики захворювань очей, який використовує властивості когерентного світла для отримання високоточних тривимірних зображень внутрішніх структур ока, таких як сітківка, зоровий нерв і рогівка. Цей метод дає змогу виявити такі патології, як дистрофічні процеси, глаукома, захворювання зорового нерва, найдрібніші зміни в тканинах ока, що робить його універсальним інструментом в офтальмології [41].

Робота оптичного когерентного томографа побудована на принципі світлової інтерферометрії. Інтерференція світла – це просторовий перерозподіл енергії світлового випромінювання при накладанні двох або кількох світлових хвиль.

На томограмі шари сітківки диференціюються відповідно до їхньої світловідбивної здатності. Для побудови підсумкового зображення використовується стандартна колірна шкала: структури з високою відбивною здатністю відображаються в червоних

і білих відтінках, а слабко відбивні структури – у темних кольорах (чорний, синій, темно-зелений) [42, 43].

Товщину сітківки визначають як відстань від внутрішньої поверхні сітківки до рівня пігментного епітелію сітківки. Однак є важливий методологічний нюанс: в одних приладах вимірювання проводиться до внутрішньої межі пігментного епітелію сітківки, в інших — до зовнішньої. Тому результати можуть відрізнитися, що ускладнює порівняння товщини сітківки, отриманої на різних ОКТ-системах [44].

Для отримання томографічного зображення диска зорового нерва використовується поздовжнє та циркулярне лінійне сканування. Оптична когерентна томографія дає змогу оцінити діаметр диска, розміри та глибину екскавації, співвідношення екскавації та диска по площі, горизонтальному та вертикальному меридіанах, а також товщину шару нервових волокон у перипапільярній зоні [45].

Важливим аспектом роботи оптичних когерентних томографів є використання інфрачервоного променя із середньою довжиною хвилі 830 нм, що дає змогу отримати пошарові зрізи сітківки, кількісно оцінити її товщину, а також розміри та поширення патологічних змін [43].

Функціональна магнітно-резонансна томографія (fMRT) – це метод нейровізуалізації, який дає

змогу оцінити функціональну активність головного мозку за змінами кровотоку (BOLD-сигнал, blood oxygen level-dependent). При дослідженні зорового аналізатора fMRT використовують для картування зорової кори, аналізу функціональної організації та нейропластичності після травматичних уражень, а також для вивчення реакцій мозку на зорові стимули [46]. Цей метод є особливо цінним у комплексній діагностиці, оскільки доповнює структурні нейровізуалізаційні дані та дає змогу встановити взаємозв'язок між морфологічними змінами й функціональною активністю [47].

Окрім клініко-офтальмологічного обстеження та методів нейровізуалізації, у діагностиці уражень зорового аналізатора застосовують також нейрофізіологічні методи. Найбільш поширеними з них є зорові викликані потенціали (ЗВП), які дають змогу об'єктивно оцінити провідність зорових сигналів по зорових шляхах від сітківки до кори головного мозку; ретинографія, яку використовують для аналізу функціонального стану сітківки та її електрофізіологічної активності [48]. Ці методи мають значний потенціал для комплексної діагностики та моніторингу пацієнтів, і будуть розглянуті детальніше в наступних публікаціях.

Основні методи діагностики ураження зорового аналізатора при ВТ наведено в **Табл. 1**.

Таблиця 1. Інструментальні методи діагностики уражень зорового аналізатора при вибуховій травмi

Метод	Рівень ураження, який оцінюють	Типові знахідки при ВТ
Офтальмоскопія	Сітківка, диск зорового нерва	Крововиливи, відшарування сітківки, вторинна атрофія зорового нерва
ОКТ	Шар нервових волокон сітківки, гангліонарні клітини	Стоншення шару нервових волокон сітківки, ознаки атрофії нерва
Периметрія	Функція провідних шляхів від сітківки до кори	Скотоми, дефекти полів зору (асиметричні, незавжди класичної топографії)
ЕРГ	Функція фоторецепторів і внутрішніх шарів сітківки	Зниження амплітуд або локальні дефекти відповіді при контузійній ретинопатії
ЗВП (класичні)	Провідність від сітківки до кори (зоровий нерв, хіазма, тракти)	Зниження амплітуди P100, подовження латентності, асиметрія між півкулями, відсутність відповіді при грубому ушкодженні
mfЗВП	Локальна оцінка провідності в межах різних секторів зорового поля	Вогнищеві дефекти, що відповідають локальному пошкодженню нервових волокон (часткове ураження нерва, хіазми, тракту)
КТ/МРТ орбіт і головного мозку	Орбіта, зорові нерви, хіазма, тракти, потилична кора	Переломи орбіти, гематоми, компресія або розрив зорового нерва, дифузне аксональне ушкодження
fMRT	Кора потиличних часток	Зниження або відсутність активації в зоні первинної зорової кори при стимуляції ураженого ока

Примітка. ЕРГ – електроретинографія; mfЗВП – мультифокальні зорові викликані потенціали.

Терапевтичні підходи та реабілітація

Лікування травми зорового аналізатора часто є складним і тривалим процесом. Залежно від характеру травми такі пацієнти потребують різних методів лікування (консервативне, медикаментозне, хірургічне або їхня комбінація). Первинна допомога полягає в накладанні стерильної пов'язки та якнайшвидшому транспортуванні пацієнта до медичного закладу. Часто є потреба в госпіталізації з численними оперативними втручаннями для підтримки цілісності ока та відновлення зорової функції. Відповідні хірургічні методики обирають індивідуально залежно від клінічної ситуації [49]. На першому етапі найчастішими втручаннями є репарації очного яблука, енуклеації з імплантацією штучного ока, видалення внутрішньоочних та орбітальних сторонніх тіл. Другий етап (планові операції) може передбачати енуклеацію та реконструкцію орбіт, вітректомію pars plana, зокрема потенційне використання силіконової олії для збереження форми ока та нормального внутрішньоочного тиску [50, 51]. Після хірургічного втручання в осіб зі значним фіброзом сітківки або рубцюванням може зрости ризик тракційного відшарування сітківки або виникнути труднощі з досягненням адгезії сітківки, що потребує збереження силіконової олії в оці.

Проліферативна вітреоретинопатія – це процес внутрішньоочного рубцювання, який характеризується ростом і скороченням клітинних мембран у вітреальній порожнині, на обох сторонах поверхні сітківки, а також внутрішньосітківковим фіброзом [52, 53]. Зазвичай вона виникає після розривів сітківки, унаслідок чого клітини пігментного епітелію сітківки потрапляють у вітреальний простір. Немає фармакологічних методів, які запобігають або модулюють розвиток проліферативної вітреоретинопатії. Єдиним ефективним лікуванням є вітректомія. Однак немає консенсусу щодо того, які пацієнти потребують вітректомії та як швидко її слід виконувати [54, 55].

Крім того, багато пацієнтів потребують окулопластичної, рогівкової та глаукомної хірургії, невелика частина – консультації спеціаліста з увеїту, що свідчить про важливість мультидисциплінарного підходу.

Одним із найбільш небажаних ускладнень є симпатична офтальмія – гранулематозний автоімунний увеїт, що трапляється в 0,06–0,19% випадків і може призвести до втрати зору на іншому оці [56]. Історично вважалося, що сильно ушкоджені очі слід видаляти протягом 2 тиж після травми для профілактики симпатичної офтальмії, але ні терміни, ні ефективність такої практики не підтверджені доказами. Своєчасно призначене лікування кортикостероїдами або імуносупресантами (циклоспорин, азатіоприн) при симпатичній офтальмії може суттєво поліпшити результати лікування [57].

Отже, наявні дані підтверджують, що навіть при тяжких травмах відкритого ока слід прагнути зберегти та відновити його, якщо це клінічно можливо.

Ендофтальміт посідає друге місце після травми відкритого ока, вражає близько 16,5% пацієнтів. Системна антибіотикопрофілактика в цьому випадку має обмежену доказову ефективність, тоді як інтравітреальні ін'єкції використовуються рідше, але мають більшу доказовість [58, 59].

Прогноз

Прогноз при вибухових ураженнях зорового аналізатора залишається варіабельним і залежить від низки чинників: тяжкості первинного ураження, залучення в патологічний процес зорового нерва, своєчасності й ефективності терапевтичних втручань, індивідуальних компенсаторних можливостей пацієнта та реакції на лікування. У частини хворих можливе суттєве відновлення зорових функцій, тоді як в інших мають місце стійкі й інвалідизуючі порушення зору. Важливо враховувати, що прогноз значно поліпшується за умови ранньої діагностики та початку лікування в перші години–дні після травми.

Висновки

Бойова ВТ є провідною причиною комбінованих ушкоджень зорового аналізатора. Патофізіологічні механізми такої травми складні та багатофакторні, а відсутність видимих пошкоджень очей не виключає ураження. Оцінка стану зорового аналізатора в пацієнтів після ВТ потребує комплексного підходу, зокрема дослідження як структурних, так і функціональних характеристик ока та зорових шляхів. Вибухова травма може призвести до безпосереднього механічного ушкодження ока, а також до вторинних змін, зумовлених дією ударної хвилі, впливом високих температур, інфрачервоного випромінювання, токсичних речовин тощо.

Обстеження таких пацієнтів має бути всебічним та мультидисциплінарним і передбачати участь офтальмолога, невролога, нейрохірурга, за потреби – пластичного хірурга. Ретельний збір анамнезу вибухової події, якщо це можливо, визначає первинну стратифікацію ризику й дає змогу обрати оптимальні діагностичні інструменти. Вибухові травми очей можуть виявлятися широким спектром симптомів – від мінімального дискомфорту до сильного болю або втрати зору.

Базове офтальмологічне обстеження (візометрія, тонометрія, реакції зіниць, огляд у щілинній лампі, оцінка окоорухової функції, периметрія) є обов'язковим навіть за відсутності явних зовнішніх ушкоджень. Важливо проводити не лише первинну, а й динамічну оцінку, оскільки низка патологічних змін (наприклад, атрофія зорового нерва) можуть виявитися у віддалений період.

Нейровізуалізаційні та нейрофізіологічні методи відіграють важливу роль у комплексній діагностиці й моніторингу пацієнтів із ураженнями зорового аналізатора. Вони дають змогу не лише уточнити локалізацію та характер структурних пошкоджень, а й об'єктивно оцінити функціональний стан зорових шляхів і сітківки, що має ключове значення для визначення прогнозу та вибору тактики лікування.

Для поліпшення довгострокового прогнозу необхідне проведення регулярного офтальмологічного та нейрофізіологічного моніторингу, активне залучення пацієнта до програм зорової реабілітації та навчання компенсаторним стратегіям, а також використання мультидисциплінарного підходу. Навіть у випадках із несприятливим функціональним відновленням комплексна підтримка й реабілітація можуть істотно поліпшити якість життя пацієнта.

Розкриття інформації

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування

Дослідження не мало спонсорської підтримки.

Список літератури

- Красновид ТА, Асланова ВС, Бондар НІ. Основні аспекти травматичних пошкоджень очей в умовах війн та військових конфліктів. Архів офтальмології України. 2020;8(1):78-85. doi: 10.22141/2309-8147.8.1.2020.200741
- Zhang Y, Kang X, Wu Q, Zheng Z, Ying J, Zhang MN. Explosive eye injuries: characteristics, traumatic mechanisms, and prognostic factors for poor visual outcomes. *Mil Med Res.* 2023 Jan 12;10(1):3. doi: 10.1186/s40779-022-00438-4
- Morley MG, Nguyen JK, Heier JS, Shingleton BJ, Pasternak JF, Bower KS. Blast eye injuries: a review for first responders. *Disaster Med Public Health Prep.* 2010 Jun;4(2):154-60. doi: 10.1001/dmp.v4n2.hra10003
- McMaster D, Clare G. Incidence of ocular blast injuries in modern conflict. *Eye (Lond).* 2021 Dec;35(12):3451-3452. doi: 10.1038/s41433-020-01359-z
- Harvey MM, Justin GA, Brooks DI, Ryan DS, Weichel ED, Colyer MH. Ocular Trauma in Operation Iraqi Freedom and Operation Enduring Freedom from 2001 to 2011: A Bayesian Network Analysis. *Ophthalmic Epidemiol.* 2021 Aug;28(4):312-321. doi: 10.1080/09286586.2020.1828494
- Rauchman SH, Albert J, Pinkhasov A, Reiss AB. Mild-to-Moderate Traumatic Brain Injury: A Review with Focus on the Visual System. *Neurol Int.* 2022 May 30;14(2):453-470. doi: 10.3390/neurolint14020038
- Sukkarieh G, Lahoud C, Ghorayeb R, Abi Karam M, Succarieh Y, Saleh M, Jalkh A. Characteristics of open eye injuries in the Beirut Port explosion. *Injury.* 2021 Sep;52(9):2601-2605. doi: 10.1016/j.injury.2021.07.031
- Notghi B, Bhardwaj R, Bailoor S, Thompson KA, Weaver AA, Stitzel JD, Nguyen TD. Biomechanical Evaluations of Ocular Injury Risk for Blast Loading. *J Biomech Eng.* 2017 Aug 1;139(8). doi: 10.1115/1.4037072
- Erdurman FC, Hurmeric V, Gokce G, Durukan AH, Sobaci G, Altinsoy HI. Ocular injuries from improvised explosive devices. *Eye (Lond).* 2011 Nov;25(11):1491-8. doi: 10.1038/eye.2011.212
- Alam M, Iqbal M, Khan A, Khan SA. Ocular injuries in blast victims. *J Pak Med Assoc.* 2012 Feb;62(2):138-42.
- Karimi A, Razaghi R, Girkin CA, Downs JC. Ocular biomechanics due to ground blast reinforcement. *Comput Methods Programs Biomed.* 2021 Nov;211:106425. doi: 10.1016/j.cmpb.2021.106425
- Гончарова НА, Ковтун МІ, Пастух ІВ, Павлюченко ОС, Мужичук ОП. Пошкодження зорового аналізатора у військовослужбовців зі струсом мозку (клінічні випадки). МЕДИЦИНА НЕВІДКЛАДНОЇ ДОПОМОГИ. 2024; 20 (4): 288–298. doi: 10.22141/2224-0586.20.4.2024.1717
- Kalayci M, Er S, Tahtabasi M. Bomb Explosion: Ocular Effects of Primary, Secondary and Tertiary Mechanisms. *Clin Ophthalmol.* 2020 Apr 28;14:1145-1151. doi: 10.2147/OPHT.S253438
- Rex TS, Reilly MA, Sponsel WE. Elucidating the effects of primary blast on the eye. *Clin Exp Ophthalmol.* 2015 Apr;43(3):197-9. doi: 10.1111/ceo.12502
- Razaghi R, Biglari H, Karimi A. Finite element modeling of the eyeglass-related traumatic ocular injuries due to high explosive detonation. *Eng Fail Anal.* 2020;117:104835. doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104835
- Sherwood D, Sponsel WE, Lund BJ, Gray W, Watson R, Groth SL, Thoe K, Glickman RD, Reilly MA. Anatomical manifestations of primary blast ocular trauma observed in a postmortem porcine model. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2014 Feb 24;55(2):1124-32. doi: 10.1167/iovs.13-13295
- Monsour M, Ebedes D, Borlongan CV. A review of the pathology and treatment of TBI and PTSD. *Exp Neurol.* 2022;351:114009. doi: 10.1016/j.expneurol.2022.114009
- Justin GA, Baker KM, Brooks DI, Ryan DS, Weichel ED, Colyer MH. Intraocular Foreign Body Trauma in Operation Iraqi Freedom and Operation Enduring Freedom: 2001 to 2011. *Ophthalmology.* 2018 Nov;125(11):1675-1682. doi: 10.1016/j.ophtha.2018.06.006
- Gundogan FC, Akay F, Yolcu U, Uzun S, Ilhan A, Toyran S, Eyi E, Diner O. Ocular blast injuries related to explosive military ammunition. *J R Army Med Corps.* 2016 Feb;162(1):39-43. doi: 10.1136/jramc-2015-000408
- Weichel ED, Colyer MH. Combat ocular trauma and systemic injury. *Curr Opin Ophthalmol.* 2008 Nov;19(6):519-25. doi: 10.1097/ICU.0b013e3283140e98
- Kulkarni AR, Aggarwal SP, Kulkarni RR, Deshpande MD, Walimbe PB, Labhsetwar AS. Ocular manifestations of head injury: a clinical study. *Eye (Lond).* 2005 Dec;19(12):1257-63. doi: 10.1038/sj.eye.6701753
- Hassan Naqvi SA, Malik S, Zulfikaruddin S, Anwar SB, Nayyar S. Etiology and severity of various forms of ocular war injuries in patients presenting at an Army Hospital in Pakistan. *Pak J Med Sci.* 2016 Nov-Dec;32(6):1543-1546. doi: 10.12669/pjms.326.11158
- Belmonte-Grau M, Garrido-Ceca G, Marticorena-Álvarez P. Ocular trauma in an urban Spanish population: epidemiology and visual outcome. *Int J Ophthalmol.* 2021 Sep 18;14(9):1327-1333. doi: 10.18240/ijo.2021.09.06
- Rasiah PK, Hardenburger J, Dong H, Hardin R, Locke A, Jenkens JL, Artis E, Caskey C, Millis B, Jansen ED, Rex TS, Mahadevan-Jansen A. Subcellular and macrostructural immediate responders to airblast traumatic brain injury. *Sci Rep.* 2025 Aug 4;15(1):28454. doi: 10.1038/s41598-025-13288-6
- Kheir WJ, Awwad ST, Bou Ghannam A, Khalil AA, Ibrahim P, Rachid E, El Salloukh NA, Yehia M, Torbey J, El Zein L, Jabbur NS, Nouredin B, Alameddine RM. Ophthalmic Injuries After the Port of Beirut Blast-One of Largest Nonnuclear Explosions in History. *JAMA Ophthalmol.* 2021 Sep 1;139(9):937-943. doi: 10.1001/jamaophthalmol.2021.2742
- Lee I, Davis B, Purt B, DesRosiers T. Ocular Trauma and Traumatic Brain Injury on the Battlefield: A Systematic Review After 20 Years of Fighting the Global War on Terror. *Mil Med.* 2023 Aug 29;188(9-10):2916-2923. doi: 10.1093/milmed/usac226
- Rana V, Patra VK, Bandopadhyay S, Raj B, Sharma VK, Gupta A, Mishra SK, Kumar P. Combat ocular trauma in counterinsurgency operations. *Indian J Ophthalmol.* 2023 Dec 1;71(12):3615-3619. doi: 10.4103/IJO.IJO_609_23
- Zou YY, Kan EM, Lu J, Ng KC, Tan MH, Yao L, Ling EA. Primary blast injury-induced lesions in the retina of adult rats. *J Neuroinflammation.* 2013 Jul 2;10:79. doi: 10.1186/1742-2094-10-79
- Taran S, Pelosi P, Robba C. Optimizing oxygen delivery to the injured brain. *Curr Opin Crit Care.* 2022 Apr 1;28(2):145-156. doi: 10.1097/MCC.0000000000000913
- Armstrong RA. Visual problems associated with traumatic brain injury. *Clin Exp Optom.* 2018 Nov;101(6):716-726. doi: 10.1111/cxo.12670
- Alvarez TL, Kim EH, Vicci VR, Dhar SK, Biswal BB, Barrett AM. Concurrent vision dysfunctions in convergence insufficiency with traumatic brain injury. *Optom Vis Sci.* 2012 Dec;89(12):1740-51. doi: 10.1097/OPX.0b013e318272dce
- Bailey MD, Gambert S, Gruber-Baldini A, Guralnik J, Kozar R, Qato DM, Shardell M, Albrecht JS. Traumatic Brain Injury and Risk of Long-Term Nursing Home Entry among Older Adults: An Analysis of Medicare Administrative Claims Data. *J Neurotrauma.* 2023 Jan;40(1-2):86-93. doi: 10.1089/neu.2022.0003
- Dwyer B, Katz DI. Postconcussion syndrome. *Handb Clin Neurol.* 2018;158:163-178. doi: 10.1016/B978-0-444-63954-7.00017-3
- Pattnaik S, Panda BB, Swain SC. Spectrum of Ocular Findings in Closed Head Injuries, Correlation With Severity of Neurological Involvement, and Treatment Outcome: A Hospital-Based Cross-Sectional Study. *Cureus.* 2021 Jul 20;13(7):e16515. doi: 10.7759/cureus.16515
- Adhan IK, Gunton KB. Optimal Diagnostic Strategies for Concussion-Related Vision Disorders: A Review. *Eye Brain.* 2025 May 12;17:27-36. doi: 10.2147/EB.S492854
- Cockerham GC, Goodrich GL, Weichel ED, Orcutt JC, Rizzo JF, Bower KS, Schuchard RA. Eye and visual function in traumatic brain injury. *J Rehabil Res Dev.* 2009;46(6):811-8. doi: 10.1682/jrrd.2008.08.0109

37. Ruia S, Tripathy K. Humphrey Visual Field. 2025 Jan 20. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan-.
38. Rai BB, Sabeti F, Carle CF, Maddess T. Visual Field Tests: A Narrative Review of Different Perimetric Methods. *J Clin Med*. 2024 Apr 23;13(9):2458. doi: 10.3390/jcm13092458
39. Chaudhary R, Upendran M, Campion N, Yeung A, Blanch R, Morgan-Warren P, Gibb I, Nelson T, Scott R. The role of computerised tomography in predicting visual outcome in ocular trauma patients. *Eye (Lond)*. 2015 Jul;29(7):867-71. doi: 10.1038/eye.2015.39
40. Costello F. Optical Coherence Tomography in Neuro-ophthalmology. *Neurol Clin*. 2017 Feb;35(1):153-163. doi: 10.1016/j.ncl.2016.08.012
41. Zeppieri M, Marsili S, Enaholo ES, Shuaibu AO, Uwagboe N, Salati C, Spadea L, Musa M. Optical Coherence Tomography (OCT): A Brief Look at the Uses and Technological Evolution of Ophthalmology. *Medicina (Kaunas)*. 2023 Dec 3;59(12):2114. doi: 10.3390/medicina59122114
42. Ko TH, Fujimoto JG, Duker JS, Paunescu LA, Drexler W, Bauml CR, Puliafito CA, Reichel E, Rogers AH, Schuman JS. Comparison of ultrahigh- and standard-resolution optical coherence tomography for imaging macular hole pathology and repair. *Ophthalmology*. 2004 Nov;111(11):2033-43. doi: 10.1016/j.ophtha.2004.05.021
43. Al-Mujaini A, Wali UK, Azeem S. Optical coherence tomography: clinical applications in medical practice. *Oman Med J*. 2013 Mar;28(2):86-91. doi: 10.5001/omj.2013.24
44. Nam KT, Yun C, Seo M, Ahn S, Oh J. Comparison of retinal thickness measurements among four different optical coherence tomography devices. *Sci Rep*. 2024 Feb 12;14(1):3560. doi: 10.1038/s41598-024-54109-6
45. Wollstein G, Ishikawa H, Wang J, Beaton SA, Schuman JS. Optical coherence tomography longitudinal evaluation of retinal nerve fiber layer thickness in glaucoma. *Arch Ophthalmol*. 2005 Apr;123(4):464-70. doi:10.1001/archophth.123.4.464
46. Arruabarrena C, Montejano-Milner R, de Aragón F, Allendes G, Teus MA. Resultados del tratamiento de los pacientes con DMAE exudativa durante la pandemia por COVID-19 [Results of the treatment of patients with exudative AMD during the COVID-19 pandemic]. *Arch Soc Esp Oftalmol*. 2022 Apr;97(4):184-190. Spanish. doi: 10.1016/j.oftal.2021.02.012
47. Sujanthan S, Shmuel A, Mendola JD. Resting-state functional MRI of the visual system for characterization of optic neuropathy. *Front Hum Neurosci*. 2022 Oct 18;16:943618. doi: 10.3389/fnhum.2022.943618
48. Mahroo OA. Visual electrophysiology and "the potential of the potentials". *Eye (Lond)*. 2023 Aug;37(12):2399-2408. doi: 10.1038/s41433-023-02491-2
49. Liu Y, Feng K, Jiang H, Hu F, Gao J, Zhang W, Zhang W, Huang B, Brant R, Zhang C, Yan H. Characteristics and treatments of ocular blast injury in Tianjin explosion in China. *BMC Ophthalmol*. 2020 May 6;20(1):185. doi: 10.1186/s12886-020-01448-3
50. Lytvynchuk LM, Ponomarov M, Reyna EC, Stieger K, Andrassi-Darida M. Multi-Stage Reconstructive Surgery of the Eyeball with No Light Perception After Severe Open Globe Injury. *Clin Ophthalmol*. 2025;19:847-856. doi:10.2147/OPTH.S474942
51. Aylward GW. Vitreous management in penetrating trauma: primary repair and secondary intervention. *Eye (Lond)*. 2008 Oct;22(10):1366-1369. doi:10.1038/eye.2008.74
52. Jin Y, Chen H, Xu X, Hu Y, Wang C, Ma Z. TRAUMATIC PROLIFERATIVE VITREORETINOPATHY: Clinical and Histopathological Observations. *Retina*. 2017 Jul;37(7):1236-1245. doi: 10.1097/IAE.0000000000001350
53. Orban M, Schranz PJ, Oppedard N, Kruse F, Ulbig M, Hansen LL. Timing and outcomes of vitreoretinal surgery after open-globe injury. *Eye (Lond)*. 2016;30(1):101-8. doi:10.1038/eye.2015.170
54. McMaster D, Halliday S, Hussain SF, Kempapadis T, Bush LS, Colyer M, McClellan SF, Miller S, Justin G, Agrawal R, Hoskin AK, Cavuoto K, Leong J, Rousselot Ascarza AM, Woreta FA, Cason J, Miller K, Caldwell MC, Gensheimer W, Williamson TH, Dhawahir-Scala F, Shah P, Coombes A, Sundar G, Mazzoli R, Woodcock M, Watson SL, Kuhn F, Gomes RSM, Blanch RJ. Early versus delayed timing of vitrectomy after open-globe injury. *Cochrane Database Syst Rev*. 2024 Nov 29;11(11):CD016086. doi: 10.1002/14651858.CD016086
55. Yu H, Li J, Yu Y, Li G, Li D, Guan M, Lu L, Liu T, Luo Y, Shen L, Wu Q, Liu B, Feng S, Yuan L. Optimal timing of vitrectomy for severe mechanical ocular trauma: A retrospective observational study. *Sci Rep*. 2019 Nov 29;9(1):18016. doi: 10.1038/s41598-019-54472-9
56. Patterson TJ, Kedzierski A, McKinney D, Ritson J, McLean C, Gu W, Colyer M, McClellan SF, Miller SC, Justin GA, Hoskin AK, Cavuoto K, Leong J, Rousselot Ascarza A, Woreta FA, Miller KE, Caldwell MC, Gensheimer WG, Williamson T, Dhawahir-Scala F, Shah P, Coombes A, Sundar G, Mazzoli RA, Woodcock M, Watson SL, Kuhn F, Halliday S, Gomes RSM, Agrawal R, Blanch RJ. The Risk of Sympathetic Ophthalmia Associated with Open-Globe Injury Management Strategies: A Meta-analysis. *Ophthalmology*. 2024 May;131(5):557-567. doi: 10.1016/j.ophtha.2023.12.006
57. Paulbuddhe V, Addya S, Gurnani B, Singh D, Tripathy K, Chawla R. Sympathetic Ophthalmia: Where Do We Currently Stand on Treatment Strategies? *Clin Ophthalmol*. 2021 Oct 20;15:4201-4218. doi: 10.2147/OPTH.S289688
58. Blanch RJ, McMaster D, Patterson TJ. Management of open globe injury: a narrative review. *Eye (Lond)*. 2024 Nov;38(16):3047-3051. doi: 10.1038/s41433-024-03246-3
59. Van Swol JM, Myers WK, Beall JA, Atteya MM, Blice JP. Post-traumatic endophthalmitis prophylaxis: a systematic review and meta-analysis. *J Ophthalmic Inflamm Infect*. 2022 Nov 18;12(1):39. doi: 10.1186/s12348-022-00317-y

Ukrainian Neurosurgical Journal. 2026;32(1):10-16
doi: 10.25305/unj.342189

Посткомоційний синдром: Частина 2. Клінічні характеристики, діагностика та лікування

В.В. Білошицький^{1,2}, Ю.В. Завалій³, А.В. Пачевська⁴, І.В. Білошицький⁵

¹ Науково-організаційний відділ, Інститут нейрохірургії імені акад. А.П. Ромоданова НАМН України, Київ, Україна

² Центр медицини болю «Spravno», Київ, Україна

³ Відділення нейрохірургії, Національний військово-медичний клінічний центр «Головний військовий клінічний госпіталь», Київ, Україна

⁴ Кафедра стоматології дитячого віку, Вінницький національний медичний університет імені М.І. Пирогова, Вінниця, Україна

⁵ Навчально-науковий інститут медицини, Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, Київ, Україна

Надійшла до редакції 26.10.2025
Прийнята до публікації 21.11.2025

Адреса для листування:

Білошицький Вадим Васильович,
Центр медицини болю «Spravno»,
вул. Межигірська, 28, Київ, 04071,
Україна, e-mail: dr.biloshytsky@
spravno.clinic

Наведено сучасні дані про клініку, діагностику та лікування посткомоційного синдрому (ПКС), що виникає після легкої вибухової черепно-мозкової травми (ЛВЧМТ). Наголошено, що ПКС є одним із найпоширеніших тривалих наслідків ЛВЧМТ у військовиків, які зазнали впливу вибухових хвиль, що визначає клінічну й соціальну актуальність проблеми. Описано діагностичні критерії ПКС за міжнародною статистичною класифікацією хвороб 10-го перегляду та діагностичними й статистичними настановами з психічних розладів IV видання (DSN-IV) і складність його диференціації з посттравматичним стресовим розладом, який часто супроводжує ПКС у ветеранів бойових дій. Виділено такі групи симптомів: когнітивні, психоемоційні, соматосенсорні, вегетативні та вестибулярні. Наголошено на важливості використання нейрофізіологічних методів (кількісної електроенцефалографії та викликаних потенціалів Р300) для об'єктивізації діагностики ПКС. Підхід до лікування має бути мультидисциплінарним, персоналізованим і передбачати фізичну реабілітацію, когнітивно-поведінкову терапію, гігієну сну й медикаментозну корекцію (антидепресанти, аналгетики, ботулінотерапію, гіпербаричну оксигенацію). Результати досліджень свідчать про важливість ранньої фізичної активності.

Ключові слова: посткомоційний синдром; легка вибухова черепно-мозкова травма; когнітивні порушення; посттравматичний стресовий розлад; нейрореабілітація.

Посткомоційний синдром: клініка, діагностика, диференційна діагностика

Вибухова хвиля може спричинити легку, помірну (середньої тяжкості) або тяжку черепно-мозкову травму (ЧМТ). Клінічні ознаки легкої вибухової ЧМТ (ЛВЧМТ) у гострий період є варіабельними: головний біль, утомлюваність, шум у вухах (tinnitus), дратівливість, нейропсихіатричні та когнітивні розлади. Багато поранених військовиків, які зазнали ЛВЧМТ під час воєнних дій в Афганістані й Іраку, мали розлади вищої нервової діяльності та поведінки, що характеризуються порушенням пам'яті й когнітивних функцій (порушення концентрації уваги, уповільнення розумової діяльності, зміни мовлення), дратівливістю, тривогою, утомлюваністю. Одночасно спостерігаються емоційні зміни, такі як лабільність настрою, тривожність, депресія, зміни особистості [1, 2].

Повне одужання після ЛВЧМТ може спостерігатися за декілька днів або тижнів, але багато симптомів зберігаються тривало. На відміну від поранених, які постраждали від помірної та тяжкої ЧМТ, пацієнти з діагнозом ЛВЧМТ не мають видимих структурних пошкоджень і перебувають у свідомості з типовими симптомами (головний біль, сплутаність, запаморочення, погіршення пам'яті та зміни поведінки). Зазначені розлади

можуть зберігатися протягом тривалого часу після травми або постійно, що призводить до серйозних функціональних порушень. Тривалий характер когнітивного дефіциту може бути пов'язаний із тим, що вибухова ЧМТ збільшує ризик віддаленого розвитку нейродегенеративних захворювань, таких як хвороба Альцгеймера та хронічна травматична енцефалопатія [1, 3–5].

Пацієнти з кількома ЛВЧМТ в анамнезі можуть відчувати більш серйозну та стійку симптоматику. Така травма може спричинити негайне, іноді – тривале ушкодження та дисфункцію клітин головного мозку, розтягнення й пошкодження аксонів і зміни нейронної пластичності. Таким чином, ЛВЧМТ може стати не «подією», а «процесом» захворювання головного мозку, який підтримується вторинними молекулярними ушкодженнями (нейрозапалення, окисне ушкодження, ексайтотоксичність тощо) [4, 6]. Не слід вважати симптоматику наслідків ЛВЧМТ «функціональною» через незначну кількість аномальних змін, виявлених під час нейровізуальних досліджень. В основі симптоматики лежать як структурні, так і функціональні ушкодження різного ступеня, які не залежать від типу чи тяжкості ушкодження. Ці зміни є непомітними при рутинних методах візуалізації за допомогою комп'ютерної чи магнітно-резонансної томографії (КТ/МРТ) [7].

Copyright © 2026 В.В. Білошицький, Ю.В. Завалій, А.В. Пачевська, І.В. Білошицький



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

Можливість тривалого збереження неврологічного та когнітивного дефіциту після легкої ЧМТ стала підставою для виділення окремої нозологічної одиниці – «посткомоційного синдрому» (ПКС, англ. postconcussion syndrome).

Діагностичні критерії ПКС розроблено Всесвітньою організацією охорони здоров'я та доповнено діагностичними й статистичними настановами з психічних розладів IV видання (DSN-IV). Відповідно до Міжнародної статистичної класифікації хвороб і споріднених проблем охорони здоров'я 10-го перегляду (МКХ-10) діагноз ПКС може бути встановлений, якщо ЧМТ є достатньо тяжкою, щоб спричинити втрату свідомості, а в подальшому (упродовж 4 тиж після травми) супроводжується розвитком принаймні трьох із таких ознак: 1) скарги на неприємні відчуття (запаморочення, загальне нездужання, надмірна втома або непереносність шуму) і головний біль, 2) емоційні зміни (дратівливість, емоційна лабільність або депресія та/або тривожність певного ступеня), 3) суб'єктивні скарги на труднощі з концентрацією уваги й виконанням розумових завдань, а також на проблеми з пам'яттю без чітких об'єктивних доказів, 4) безсоння, 5) знижена толерантність до алкоголю, 6) стурбованість зазначеними симптомами й страх стійкого пошкодження мозку аж до іпохондрії та прийняття ролі хворого [8].

Діагностичними критеріями ПКС згідно з DSM-IV є: А) ЧМТ в анамнезі, що спричинила «значущий струс мозку», В) дефіцит когнітивних функцій: уваги та/або пам'яті, С) наявність щонайменше трьох із восьми симптомів (втома, порушення сну, головний біль, запаморочення, дратівливість, афективні розлади, зміна особистості, апатія), які з'являються після травми і зберігаються ≥ 3 міс, D) симптоми починаються або підсилюються після травми, Е) перешкода соціально-рольовому функціонуванню, F) виключення деменції внаслідок травми голови та інших розладів, які краще пояснюють симптоми. Критерії С і D визначають порогове значення симптомів, яке потребує, щоб поява або погіршення симптомів були пов'язані з травмою, відрізнялися від наявних раніше симптомів і мали достатню тривалість [8, 9]. Відзначено, що симптоми, наведені в МКХ-10 і DSM-IV, частіше трапляються в пацієнтів із травмою головного мозку, ніж у пацієнтів з екстракраніальними пошкодженнями. Критерії МКХ-10 охоплюють більше симптомів, ніж критерії DSM-IV, але останні є більш специфічними щодо ЧМТ [9].

За даними V. Renga (2021) [7], клінічні симптоми ПКС можна згрупувати в 5 категорій:

1) когнітивні розлади: дефіцит пам'яті, труднощі з увагою та концентрацією, труднощі з мовленням, розлади виконавчих функцій, розлади дрібної моторики;

2) психологічні розлади: депресія, тривога, дратівливість, зміни особистості, утомлюваність, дереалізація;

3) соматосенсорна та вестибулокохлеарна дисфункція: головні болі, нудота й блювання, чутливість до світла та звуку, гіпералгезія, шум у вухах;

4) зорові симптоми, окорухова дисфункція: світлочутливість, розмитий зір, труднощі конвергенції, двоїння, синдром Горнера;

5) вегетативні симптоми: коливання частоти серцевих скорочень і артеріального тиску, розлади потовиділення, зіничні аномалії, порушення терморегуляції, статева дисфункція, розлади сну з його низькою ефективністю.

Патофізіологічні механізми, що визначають відстрочене виникнення та тривале збереження симптомів ПКС, розглянуто в кількох оглядах літератури [6–8, 10–13]. Першопричиною патологічних змін, як зазначено вище, є пошкодження аксонів нейронів і дрібних кровоносних судин, відоме як дифузне аксональне пошкодження з молекулярними наслідками. При легкій ЧМТ дифузне аксональне пошкодження зазвичай охоплює лобові та лобово-скроневі відділи головного мозку. Найбільш значущим наслідком є порушення функціональних мереж мозку. У головному мозку понад 100 мільярдів нейронів, які з'єднані між собою трильйонами сполучень. Дослідження (функціональна МРТ із послідовністю BOLD, позитронно-емісійна томографія, дослідження спінового маркування артерій ASL) демонструють порушення цих функціональних мереж після легкої ЧМТ. Такі зміни відбуваються впродовж тривалого часу після травми. За даними функціональної спектроскопії ближнього інфрачервоного діапазону, нейроваскулярні зв'язки стають неефективними навіть при нормальному або підвищеному церебральному кровотоці, що вказує на функціональну невідповідність кровотоку метаболічним потребам нервових клітин. У розвиток ПКС, крім внутрішньочерепних пошкоджень, може також робити внесок хлестова травма шийних корінців, вестибулярного апарату й мускулатури шиї. Ці екстракраніальні ефекти призводять до головного болю, запаморочення, проблем із зором і рівновагою. Внутрішньочерепні, екстракраніальні та функціональні компоненти патогенезу ПКС не виключають один одного, часто переплітаються, їх важко виокремити. Поєднання цих компонентів формує клінічну картину ПКС та її індивідуальні особливості.

Головний біль виникає внаслідок активації тригеміноталамічної системи. Активація трійчастого нерва починається зі стимуляції шкіри ротолицевої ділянки або шийних м'язів. Хлестові травми можуть активувати цей процес через механізми конвергенції чутливих аферентів у трійчато-шийному ядрі (*n. trigeminocervicalis*). Зокрема, стимуляція великих потиличних нервів (походять із шийних корінців) підвищує збудливість ноцицептивних аферентів твердої мозкової оболони, активуючи тригемінальну больову систему [7, 12, 13].

Вестибулярна система підтримує стабілізацію шиї та тулуба за допомогою присінково-горбкових і присінково-спінальних рефлексів. Вестибулярні стовбурові й периферичні порушення спричиняють порушення тону м'язів шиї та механізмів рівноваги хребта. Зміни присінково-очного рефлексу можуть погіршити стабілізацію зорової цілі, що призводить до розмитості зору. Шийно-присінкова дисфункція лежить в основі більшості симптомів, пов'язаних із ПКС. Шийні пропріорецептори синхронізуються з присінково-очними й оптокінетичними рефlekсами, щоб підтримувати фіксацію погляду на зоровій цілі під час рухів голови. Напруження м'язів шиї через подразнення шийних корінців обмежує об'єм активних рухів шиї та механізми конвергенції, що

призводить до двоїння в очах, запаморочення, порушення рівноваги [7, 12].

При ПКС відбувається також дисфункція вищих центрів вегетативної регуляції головного мозку й периферичної вегетативної системи. Симпатична іннервація голови та шиї відбувається від верхнього, середнього й нижнього шийних вузлів. Зірчастий вузол віддає гілки до серця та кровоносних судин голови. Вплив на них може спричинити порушення судинної регуляції, що призведе до тахікардії та коливань артеріального тиску. Крім того, порушення центральної вегетативної регуляції також спричиняє зміну частоти серцевих скорочень і артеріального тиску. Іпсилатеральний частковий синдром Горнера є типовою ознакою травм шиї. З іншого боку, також може виникнути симпатична гіперактивність, що призводить до мідріазу, почервоніння обличчя та підвищеного потовиділення [7].

Характерною особливістю ЛВЧМТ, яка спостерігається під час останніх воєнних кампаній, є одночасна наявність у потерпілих ПКС і посттравматичного стресового розладу (ПТСР). Більше ніж третина американських ветеранів останніх воєн, в яких було діагностовано ПКС унаслідок ЛВЧМТ, також мають ПТСР або депресію [14, 15].

У 5-му виданні діагностичного і статистичного посібника із психічних розладів (DSM-5) ПТСР описано як психіатричний розлад, що виникає внаслідок прямого чи непрямого впливу подій життя, які можуть призвести до серйозних травм, сексуального насильства або смерті. Посттравматичний стресовий розлад складається з чотирьох кластерів симптомів: 1) різноманітні феномени повторного переживання, зокрема нав'язливі та мимовільні думки чи образи, тривожні сновидіння, дисоціативні реакції, такі як спогади про травматичну подію, ніби вона відбувається повторно, під час переживання якої можуть бути залучені п'ять органів чуття, а також надмірні емоційні й фізіологічні реакції на зовнішні навколишні або внутрішні психічні сигнали, пов'язані з травматичним переживанням; 2) уникання нагадувань про травматичні події як внутрішніх (наприклад, думок або спогадів), так і зовнішніх (наприклад, місць, розмов, фільмів і телепередач) призводить до ізоляції від інших осіб; 3) когнітивні спотворення, дефіцит пам'яті (нездатність запам'ятати аспекти травматичного досвіду) і негативні емоційні стани, унаслідок яких особи, що страждають на ПТСР, зазвичай бояться, злятаються, відчувають провину або сором, мають негативні переконання та очікування щодо себе (наприклад, низьку самооцінку, самозвинувачення, відчуття скорої смерті) або світу (наприклад, що нікому не можна довіряти, ніхто не є в безпеці), збіднені інтереси, відсторонені почуття до інших і труднощі з переживанням позитивних емоцій; 4) підвищене збудження й реактивність центральної та вегетативної нервової системи, що виявляється дратівливістю, вербальними та/або фізичними спалахами гніву, безрозсудною та/або саморуйнівною поведінкою, підвищеною пильністю, перебільшенням страху, поганою концентрацією та безсонням [16].

Епідеміологічні дослідження свідчать, що ПТСР є поширеною проблемою у ветеранів бойових дій. Від 4 до 33% військовиків, які проходили службу в Іраку та/або Афганістані, мають цей розлад [17]. У дослідженні, проведеному у Великій Британії в осіб, які проходять

військову службу, 21,9% із них повідомили про симптоми психічних розладів, у 6,2% імовірним є ПТСР, 10,0% зловживають алкоголем [18]. За іншими даними, якщо частота імовірного ПТСР серед чинних британських військовиків становила 4,8%, то серед колишніх військовиків, які брали участь у бойових діях, – 17,0% [19]. Більша залученість до бойових дій призводить до серйозніших симптомів ПТСР, що перешкоджає адаптації до життя поза військовою структурою та погіршує сімейні стосунки [20, 21].

У разі поєднання ПКС і ПТСР діагностика ускладнюється, оскільки клінічно розрізнити ці два стани часто є непростим завданням через подібність симптоматики [22]. Симптоми, наведені в діагностичних критеріях, не є специфічними лише для ПКС, вони також трапляються в популяції, що не зазнала травми, та при інших нетравматичних захворюваннях, наприклад, при депресії, тривожності й хронічному болю [23, 24]. У деяких випадках може спостерігатися поєднання ЧМТ і ПТСР унаслідок незалежного впливу травми та стресових чинників [22].

Зазначається, що за відсутності об'єктивних діагностичних обстежень, насамперед у хронічний період ЧМТ, валідність ПКС як діагнозу багатьма фахівцями піддається сумніву [13]. Варті уваги, наприклад, спостереження, що при залученні до судових процесів зростає частота повідомлень про зазначені симптоми [25]. Припускають, що епідемія ПКС серед західних військовиків під час війни в Іраку та Афганістані може бути артефактом унаслідок зниження «порогу» діагностування ЛВЧМТ до врахування незначних тимчасових змін свідомості. Дослідження показали, що симптоматику ПКС можна пояснити лише впливом вибуху в разі помітної втрати свідомості, яку описують меншість ветеранів цих воєн. У звіті американського Інституту медицини за 2014 р. йдеться про наявність наукових доказів того, що в потерпілих більшість спільних симптомів пояснюється наявністю супутнього ПТСР, а не лише наслідком ЛВЧМТ [22, 26].

З іншого боку, скарги на когнітивні й поведінкові порушення часто виникають не відразу після травми, а на 1–3-й місяць після неї. Це може спричинити їх неправильне трактування як зумовлених не ЧМТ, а афективними розладами [27, 28].

Незважаючи на уявну простоту, діагностика ПКС є дискусійним питанням із низки причин (недостатня специфічність симптомів, вплив преморбідного стану на наслідки травми, «упереджене пригадування» (recall bias) і вплив психосоціальних чинників) [13]. «Упереджене пригадування», яке також називають феноменом «добрих старих часів» (the good old days), спостерігається в нормі та при різних патологічних станах. Воно полягає в тенденції применшувати попередні ступінь і виразність симптомів, зокрема в преморбідний період [29]. Дослідження, в якому провадили спостереження дітей і підлітків із ПКС у посттравматичний період, показали, що пацієнти та їхні батьки, оцінюючи преморбідну симптоматику через 1 рік після травми, применшували її тяжкість на 80%. Такий рівень оцінки зберігався до кінця спостереження (через 3 міс після травми) [30]. Це демонструє, що феномен «добрих старих часів» може спричинити недооцінку преморбідної симптоматики та перебільшення тяжкості симптомів ПКС. Вивчення цього феномену й розробка методики подолання

«упередженого пригадування» можуть допомогти зменшити тривожність пацієнта щодо тяжкості його стану та адекватніше суб'єктивно сприймати тяжкість ЧМТ, а також її вплив на якість життя [13, 31].

Діагностика ПКС після ЛВЧМТ також може бути складною з інших причин. Так, клініцистам може бути важко оцінити справжню тяжкість ЧМТ через обмежену інформацію про обставини травми, яка може ґрунтуватися на суб'єктивній оцінці травмованої особи через місяці або роки після події (подій). Крім того, відсутність деяких об'єктивних характеристик обставин травми може ускладнити точність «самооцінки вибуху», зокрема визначення дистанції до вибуху й тяжкості струсу мозку, дані про які часто відсутні в первинній медичній документації. Відсутність вірогідної інформації щодо характеристик травми ускладнює визначення напрямку когнітивного відновлення та реабілітації. Зазвичай наявність і виразність ПКС визначають на підставі поточного стану нейропсихологічних та когнітивних функцій за результатами оцінки спеціальними скринінговими шкалами, які не обов'язково є специфічними для ЧМТ і можуть відображати рівень супутніх ПТСР або депресії [10, 32].

Отже, симптомокомплекс ПКС і ПТСР значною мірою є схожими й можуть «перекривати» одне одного в конкретного індивідуума. У пацієнтів із ПКС імовірність супутнього ПТСР є високою через його велику поширеність серед учасників бойових дій. Наявність ПТСР значно ускладнює діагностику ПКС через схожість клінічних виявів. Однак ЧМТ – це органічне ушкодження нервової тканини, тоді як ПТСР є психологічною реакцією на стресор і не супроводжується структурними змінами. Ця відмінність зумовлює різні підходи до лікування зазначених станів. Якщо терапія ПТСР передбачає переважно нормалізацію реакції на стрес за допомогою психологічної та фармакологічної корекції, то лікування ЧМТ має враховувати структурні й молекулярно-біологічні зміни, щоб запобігти їхньому впливу на виразність і тривалість неврологічного дефіциту [22, 33].

Важливим завданням є поліпшення діагностики ПКС унаслідок ЛВЧМТ шляхом уточнення об'єктивних критеріїв структурно-функціональних розладів центральної нервової системи. Це поліпшить прогноз перебігу ЛВЧМТ у поранених і сприятиме уточненню програми лікування, зокрема персоналізованого, спрямованого на запобігання розвитку стійкого неврологічного дефіциту. Нейрофізіологічне дослідження має потенціал щодо об'єктивізації діагнозу ПКС після ЛВЧМТ. Згідно з опублікованими раніше результатами нашого дослідження кількісна електроенцефалографія виявляє в пацієнтів із ПКС зміни частоти й топіки α -ритму, зменшення його амплітуди, частотно-просторову інверсію, наявність ознак дисфункції неспецифічних структур головного мозку, за даними спектрального аналізу – зменшення α -потужності, збільшення β -потужності, активності в θ - і δ -діапазонах. Ці характеристики можуть зберігатися у віддалений період ЛВЧМТ, що слід враховувати в диференційній діагностиці з ПТСР [34]. Результати вивчення когнітивних викликаних потенціалів, пов'язаних з подією (P300), показали, що ці показники статистично значущо залежать від ступеня тяжкості когнітивних розладів і можуть

бути ефективним засобом об'єктивізації ступеня когнітивних порушень у пацієнтів із ПКС [35].

Лікування посткомоційного синдрому, що виникає внаслідок легкої вибухової черепно-мозкової травми

Лікування ПКС відрізняється від терапевтичних заходів у гострій та підгострій фазах легкої ЧМТ. Замість спокою та відпочинку основним завданням є поліпшення загального функціонування, відновлення повсякденної активності та повернення до звичного життя. Цього досягають поступово за участі пацієнта та його оточення. Коли лікар має чітке розуміння клінічної картини, слід звернути увагу на 1 або 2 найбільш проблематичні симптоми, інші симптоми часто регресують під час лікування. До профільних фахівців слід скеровувати пацієнтів із постійним запамороченням, проблемами з рівновагою або постійними скаргами на зір. Периферичну вестибулярну дисфункцію слід спочатку лікувати спеціалізованою фізіотерапією. Мігренозне запаморочення можна лікувати за допомогою засобів превентивної терапії мігрени. Недостатність конвергенції та стійка дисфункція читання можуть реагувати на окорухову нейрореабілітацію. Найпоширенішими проблемами зазвичай є порушення сну, головні болі, а також розлади когнітивних функцій і настрою [13].

Відпочинок і сон. За даними полісомнографії, зміни сну при ПКС характеризуються меншою ефективністю сну, тривалішим пробудженням і більшою кількістю нічних пробуджень. Їхній розвиток корелює з наявністю змін на магнітно-резонансних томограмах, психологічними розладами (особливо тривогою), а також зниженою продукцією мелатоніну [7,36]. Якісний сон і відпочинок мають важливе значення для профілактики та лікування ПКС. Відпочинок передбачає як фізичний, так і когнітивний відпочинок, тривалий відпочинок не рекомендується. Рутинні щоденні дії необхідні для підтримки основного функціонування. Тривалість відпочинку залежить від людини. Для активної людини може бути неприродним припинити будь-яку діяльність. У таких ситуаціях було б корисно підтримувати активність у повсякденному житті. При цьому слід враховувати індивідуальні особливості, зумовлені віком, фізичними та психологічними чинниками.

Мозок відновлюється за умови достатнього сну. Важливе значення має якість сну та відпочинку, оскільки глибші стадії сну сприяють реорганізації нейронних зв'язків. Прокидатися бадьорим є ознакою хорошої якості сну. У пацієнтів із ПКС якість сну часто порушується. Допоміжні засоби, такі як мелатонін, музика для сну або білий шум, можуть бути корисними. Циклобензаприн забезпечує подвійний ефект: розслаблює м'язи та поліпшує сон. Пацієнтам із ПКС дуже важливо засинати в один і той самий час, оскільки це може допомогти стабілізувати порушені циркадні ритми [7, 13]. Для корекції порушень сну можна використовувати амітриптилін, який також може бути корисним при головних болях, короткі курси небензодіазепінових снодійних засобів (зопіклон) і когнітивно-поведінкову терапію [13].

Фізична терапія. Відзначено, що обмеження фізичної активності після легкої ЧМТ призводить до затримки одужання та більшої виразності симптомів, що належать до спектру ПКС [38]. Тривала відсутність

фізичної активності може підсилити розвиток вторинних симптомів, таких як депресія, тривога та втомлюваність [39]. Натомість раннє, а не відстрочене застосування помірних фізичних вправ поліпшує клінічну картину в пацієнтів із ПКС [40]. Продемонстровано поліпшення в пацієнтів, які отримували фізичну терапію, порівняно з тими, хто її не отримував [12]. У дослідженні [39] програма лікування ПКС передбачала фізичну терапію у вигляді бігу підтюпцем, їзди на велосипеді, процедур репозиції або мобілізації суглобів і м'яких тканин, а також методики вестибулярної/окорохової реабілітації. Фізична терапія сприяла більшому регресу посттравматичної симптоматики. Автори дослідження зазначають, що відсутність спонтанного одужання після легкої ЧМТ може бути зумовлена, зокрема, супутніми травмами хребта та інших частин тіла, спричиненими впливом травмувальної фізичної сили.

Основою терапії ПКС є фізична терапія вестибулярного апарату та шиї. Вестибулярна терапія передбачає вправи для тренування вестибулярного апарату за допомогою окорохових вправ, вправ для голови та тулуба, спрямованих на поліпшення рівноваги й зору. Зорова та окорохова терапія може допомогти відновити плавні рухи очних яблук для слідування за ціллю та її фіксації. Нормальний обсяг рухів шиї важливий для рефлексів рівноваги, які запобігають падінню. У більшості пацієнтів із ПКС спостерігаються деякі компоненти цервікогенного запаморочення та порушення рівноваги. Фізична терапія шиї має бути частиною реабілітаційної терапії ПКС. Також корисні мануальна терапія та розслаблення м'язів шиї за допомогою вправ, масажу, теплих компресів і місцевих аплікацій. Тяжку вестибулярну дисфункцію, особливо в гострій фазі, може бути складно лікувати через запаморочення та нудоту. У цих випадках можна розглянути використання вестибулярних седативних засобів, таких як бензодіазепіни, флунаризин або бетагістин. Габапентин й амітриптилін також можуть допомогти зменшити явища сенситизації, а циклобензаприн допомагає розслабити м'язи. Усі ці лікарські засоби мають також седативний ефект [7].

Поведінкові засоби. Відновлення передбачає повторне навчання колишнім навичкам. Дотримання режиму повсякденної діяльності є найважливішою модифікацією поведінки, щоб повернути мозок до нормального стану. Пробудження та засинання в певний час може допомогти налаштувати мозок на дотримання режиму. Увечері слід уникати вживання стимуляторів, зокрема кофеїну, алкоголю та засобів, що пригнічують центральну нервову систему. Важливо уникати громадських зібрань, спілкування в соціальних мережах, гучних звуків і рок-музики. Необхідно скоротити час, проведений перед екраном телевізора, комп'ютера або телефону. Корисними є прогулянки на природі на світанку чи заході сонця в спокійній обстановці, прослуховування заспокійливої інструментальної музики та читання паперових книжок [7].

Гіпербарична оксигенація. Цей метод передбачає розміщення пацієнта в камері, в якій повільно підвищують тиск чистого кисню до значень, що в 1,5–3,0 рази перевищують нормальний тиск повітря. Механізм дії методу полягає в стимулюванні ангіогенезу, що дає змогу потенційно збільшити мозкову перфузію. Більше постачання крові до ділянок

мозку, які стали ішемічними або гіпоксичними через пошкодження кровоносних судин, потенційно може прискорити процес відновлення. Дослідження, яке оцінювало нейротерапевтичний ефект гіпербаричної оксигенації при ПКС за допомогою візуалізації перфузії мозку та клінічної оцінки когнітивних функцій, показало позитивні результати. У пацієнтів значно поліпшилися когнітивні функції, такі як обробка інформації, її швидкість, обробка візуальних просторових даних. Крім того, у ділянках мозку, які відповідають за зорові, сенсорно-моторні функції, пам'ять і увагу, збільшилися мозковий кровообіг і церебральний об'єм крові [41].

Фармакотерапія. Лікування головного болю. Зазвичай лікування больових синдромів, зокрема головного болю, розпочинають із призначення протизапальних і знеболювальних препаратів, таких як ацетилсаліцилова кислота, ібупрофен і парацетамол. Через схожість посттравматичного головного болю з мігренню часто призначають засоби лікування мігрени, наприклад, триптани. Проте часте споживання великої кількості препаратів збільшує ризик розвитку головного болю внаслідок надмірного вживання лікарських препаратів (medication overuse headache). Щоб запобігти розвитку цього стану рекомендована превентивна терапія із застосуванням антидепресантів, β -блокаторів, протисудомних засобів і препаратів від невropатичного болю. Ефективними можуть бути більш інвазивні процедури, такі як ботулінотерапія та блокади. Ботулінотерапія є ефективним засобом, схваленим FDA для терапії хронічної мігрени. Вважається, що нервово-м'язовий блокатор ботулотоксин типу А пригнічує периферичний процес передачі сигналів у центральну нервову систему, запобігаючи центральній сенситизації, а отже, зменшує відчуття болю як при мігрени, так і при посттравматичному головному болю. Поширеною причиною головних болів при ПКС є подразнення шийних корінців. Подразнення потиличних нервів унаслідок хлислової травми часто призводить до нападів мігрени, запаморочення та спазму шийних м'язів. Блокада потиличних нервів може допомогти розірвати ланцюг головного болю між шийними корінцями та спинномозковим ядром трійчастого нерва [7, 12, 42, 43].

Антидепресанти – це препарати, які найчастіше призначають для симптоматичного лікування ПКС. Пацієнти з депресією мають дефіцит мозкових моноамінергічних медіаторів (норадреналін, серотонін та/або дофамін). Баланс і рівні цих нейромедіаторів відіграють вирішальну роль у багатьох поведінкових симптомах (настрій, втома, психомоторне збудження). Етіологія коморбідної депресії в пацієнтів із ПКС пов'язана з хімічним дисбалансом цих нейромедіаторів у мозку після травми. Широкого застосування при ПКС набули деякі селективні інгібітори зворотного захоплення серотоніну. Корекції посттравматичної депресії та тривоги вдалося досягти при призначенні сертраліну в добовій дозі 25–100 мг та флуоксетину в добовій дозі 20–60 мг [12]. Потенційним ефективним засобом лікування симптоматики ПКС є канабіноїди [44].

Когнітивна реабілітація. Когнітивна реабілітація розпочинається з базової оцінки за допомогою панелі тестів, таких як Монреальська шкала когнітивної оцінки. Якщо є хронічні стійкі когнітивні проблеми із симптомами, подібними до синдрому дефіциту

уваги та гіперактивності, можна спробувати стимулятори центральної нервової системи, зокрема метилфенідат. Однак його не слід призначати, якщо існує ризик зникання, судом, а також у пацієнтів із проблемами зі сном. Донепезил випробували при проблемах із короткочасною пам'яттю, пов'язаних із ПКС. Проблеми зі сном у денний час можна вирішити за допомогою модафінілу. Когнітивно-поведінкова терапія корисна при розладах настрою, пов'язаних із ПКС. Дихальні й медитаційні вправи допомагають поліпшити вегетативну регуляцію та підсилити увагу як якір, навколо якого може відбуватися процес відновлення [7].

Таким чином, арсенал лікування ПКС містить широкий спектр нефармакологічних і фармакологічних засобів. Вибір методів лікування зумовлений клінічними особливостями пацієнта, причому клінічна картина може бути надзвичайно варіабельною. Це свідчить про необхідність індивідуального підходу до лікування і в багатьох клінічних ситуаціях про прийняття персоналізованих клінічних рішень.

Розкриття інформації

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування

Дослідження не мало спонсорської підтримки.

Список літератури

- Karr JE, Areshenkoff CN, Duggan EC, Garcia-Barrera MA. Blast-related mild traumatic brain injury: a Bayesian random-effects meta-analysis on the cognitive outcomes of concussion among military personnel. *Neuropsychol Rev.* 2014 Dec;24(4):428-44. doi: 10.1007/s11065-014-9271-8
- Lindberg MA, Moy Martin EM, Marion DW. Military Traumatic Brain Injury: The History, Impact, and Future. *J Neurotrauma.* 2022 Sep;39(17-18):1133-1145. doi: 10.1089/neu.2022.0103
- Veitch DP, Friedl KE, Weiner MW. Military risk factors for cognitive decline, dementia and Alzheimer's disease. *Curr Alzheimer Res.* 2013 Nov;10(9):907-30. doi: 10.2174/15672050113109990142
- Lucke-Wold B, Nolan R, Nwafor D, Nguyen L, Cheyuo C, Turner R, Rosen C, Marsh R. Post-Traumatic Stress Disorder Delineating the Progression and Underlying Mechanisms Following Blast Traumatic Brain Injury. *J Neurosci Neuropharmacol.* 2018;4(1):118.
- Dieter JN, Engel SD. Traumatic Brain Injury and Posttraumatic Stress Disorder: Comorbid Consequences of War. *Neurosci Insights.* 2019 Dec 31;14:1179069519892933. doi: 10.1177/1179069519892933
- Kaplan GB, Leite-Morris KA, Wang L, Rumbika KK, Heinrichs SC, Zeng X, Wu L, Arena DT, Teng YD. Pathophysiological Bases of Comorbidity: Traumatic Brain Injury and Post-Traumatic Stress Disorder. *J Neurotrauma.* 2018 Jan 15;35(2):210-225. doi: 10.1089/neu.2016.4953
- Renga V. Clinical Evaluation and Treatment of Patients with Postconcussion Syndrome. *Neurol Res Int.* 2021 May 29;2021:5567695. doi: 10.1155/2021/5567695
- Dwyer B, Katz DI. Postconcussion syndrome. *Handb Clin Neurol.* 2018;158:163-178. doi: 10.1016/B978-0-444-63954-7.00017-3
- Boake C, McCauley SR, Levin HS, Pedroza C, Contant CF, Song JX, Brown SA, Goodman H, Brundage SI, Diaz-Marchan PJ. Diagnostic criteria for postconcussional syndrome after mild to moderate traumatic brain injury. *J Neuropsychiatry Clin Neurosci.* 2005 Summer;17(3):350-6. doi: 10.1176/jnp.17.3.350
- Kobeissy F, Mondello S, Tümer N, Toklu HZ, Whidden MA, Kirichenko N, Zhang Z, Prima V, Yassin W, Anagli J, Chandra N, Svetlov S, Wang KK. Assessing neuro-systemic & behavioral components in the pathophysiology of blast-related brain injury. *Front Neurol.* 2013 Nov 21;4:186. doi: 10.3389/fneur.2013.00186
- Elder GA, Ehrlich ME, Gandy S. Relationship of traumatic brain injury to chronic mental health problems and dementia in military veterans. *Neurosci Lett.* 2019 Aug 10;707:134294. doi: 10.1016/j.neulet.2019.134294
- Kim K, Priefer R. Evaluation of current post-concussion protocols. *Biomed Pharmacother.* 2020 Sep;129:110406. doi: 10.1016/j.biopha.2020.110406
- Barlow KM. Postconcussion Syndrome: A Review. *J Child Neurol.* 2016 Jan;31(1):57-67. doi: 10.1177/0883073814543305
- Hoge CW, McGurk D, Thomas JL, Cox AL, Engel CC, Castro CA. Mild traumatic brain injury in U.S. Soldiers returning from Iraq. *N Engl J Med.* 2008 Jan 31;358(5):453-63. doi: 10.1056/NEJMoa072972
- Vasterling JJ, Verfaellie M, Sullivan KD. Mild traumatic brain injury and posttraumatic stress disorder in returning veterans: perspectives from cognitive neuroscience. *Clin Psychol Rev.* 2009 Dec;29(8):674-84. doi: 10.1016/j.cpr.2009.08.004
- American Psychiatric Association. *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders.* 5th ed. Arlington, VA: American Psychiatric Publishing; 2013. doi: 10.1176/appi.books.9780890425596
- Gates MA, Holowka DW, Vasterling JJ, Keane TM, Marx BP, Rosen RC. Posttraumatic stress disorder in veterans and military personnel: epidemiology, screening, and case recognition. *Psychol Serv.* 2012 Nov;9(4):361-382. doi: 10.1037/a0027649
- Stevellink SAM, Jones M, Hull L, Pernet D, MacCrimmon S, Goodwin L, MacManus D, Murphy D, Jones N, Greenberg N, Rona RJ, Fear NT, Wessely S. Mental health outcomes at the end of the British involvement in the Iraq and Afghanistan conflicts: a cohort study. *Br J Psychiatry.* 2018 Dec;213(6):690-697. doi: 10.1192/bjp.2018.175
- Jones E. PTSD in an era of uncertainty and challenge. *Int Rev Psychiatry.* 2019 Feb;31(1):1-2. doi: 10.1080/09540261.2019.1603663
- Foy DW, Sippelle RC, Rueger DB, Carroll EM. Etiology of posttraumatic stress disorder in Vietnam veterans: analysis of premilitary, military, and combat exposure influences. *J Consult Clin Psychol.* 1984 Feb;52(1):79-87. doi: 10.1037//0022-006x.52.1.79
- Taft CT, Schumm JA, Panuzio J, Proctor SP. An examination of family adjustment among Operation Desert Storm veterans. *J Consult Clin Psychol.* 2008 Aug;76(4):648-56. doi: 10.1037/a0012576
- Elder GA. Update on TBI and Cognitive Impairment in Military Veterans. *Curr Neurol Neurosci Rep.* 2015 Oct;15(10):68. doi: 10.1007/s11910-015-0591-8
- Iverson GL, Lange RT. Examination of "postconcussion-like" symptoms in a healthy sample. *Appl Neuropsychol.* 2003;10(3):137-44. doi: 10.1207/S15324826AN1003_02
- Fear NT, Jones E, Groom M, Greenberg N, Hull L, Hodgetts TJ, Wessely S. Symptoms of post-concussional syndrome are non-specifically related to mild traumatic brain injury in UK Armed Forces personnel on return from deployment in Iraq: an analysis of self-reported data. *Psychol Med.* 2009 Aug;39(8):1379-87. doi: 10.1017/S0033291708004595
- Lees-Haley PR, Fox DD, Courtney JC. A comparison of complaints by mild brain injury claimants and other claimants describing subjective experiences immediately following their injury. *Arch Clin Neuropsychol.* 2001 Oct;16(7):689-95.
- Elder GA, Stone JR, Ahlers ST. Effects of low-level blast exposure on the nervous system: is there really a controversy? *Front Neurol.* 2014 Dec 19;5:269. doi: 10.3389/fneur.2014.00269
- Dikmen S, Machamer J, Fann JR, Temkin NR. Rates of symptom reporting following traumatic brain injury. *J Int Neuropsychol Soc.* 2010 May;16(3):401-11. doi: 10.1017/S155617710000196
- Meares S, Shores EA, Taylor AJ, Batchelor J, Bryant RA, Baguley IJ, Chapman J, Gurka J, Marosszeky JE. The prospective course of postconcussion syndrome: the role

- of mild traumatic brain injury. *Neuropsychology*. 2011 Jul;25(4):454-65. doi: 10.1037/a0022580
29. Gunstad J, Suhr JA. "Expectation as etiology" versus "the good old days": postconcussion syndrome symptom reporting in athletes, headache sufferers, and depressed individuals. *J Int Neuropsychol Soc*. 2001 Mar;7(3):323-33. doi: 10.1017/s1355617701733061
 30. Brooks BL, Kadoura B, Turley B, Crawford S, Mikrogianakis A, Barlow KM. Perception of recovery after pediatric mild traumatic brain injury is influenced by the "good old days" bias: tangible implications for clinical practice and outcomes research. *Arch Clin Neuropsychol*. 2014 Mar;29(2):186-93. doi: 10.1093/arclin/act083
 31. Iverson GL, Brooks BL, Ashton VL, Lange RT. Interview versus questionnaire symptom reporting in people with the postconcussion syndrome. *J Head Trauma Rehabil*. 2010 Jan-Feb;25(1):23-30. doi: 10.1097/HTR.0b013e3181b4b6ab
 32. Nelson NW, Hoelzle JB, McGuire KA, Ferrier-Auerbach AG, Charlesworth MJ, Sponheim SR. Neuropsychological evaluation of blast-related concussion: illustrating the challenges and complexities through OEF/OIF case studies. *Brain Inj*. 2011;25(5):511-25. doi: 10.3109/02699052.2011.558040
 33. Elder GA, Mitsis EM, Ahlers ST, Cristian A. Blast-induced mild traumatic brain injury. *Psychiatr Clin North Am*. 2010 Dec;33(4):757-81. doi: 10.1016/j.psc.2010.08.001
 34. Tretiakova AI, Zavaliy YV. Evaluation of Doppler and electroencephalographic changes in patients with postconcussion syndrome due to mild blast traumatic brain injury. *Ukrainian Neurosurgical Journal*. 2022;28(2):31-36. doi: 10.25305/unj.254486
 35. Zavaliy YV, Solonovych OS, Biloshitsky VV, Tretiakova AI, Chebotarivova LL, Suliy LM. Cognitive evoked potentials in the diagnosis of post-concussion syndrome due to blast mild traumatic brain injury. *Ukrainian Neurosurgical Journal*. 2021;27(4):3-9. doi: 10.25305/unj.236138
 36. Datta SG, Pillai SV, Rao SL, Kovoov JM, Chandramouli BA. Post-concussion syndrome: Correlation of neuropsychological deficits, structural lesions on magnetic resonance imaging and symptoms. *Neurol India*. 2009 Sep-Oct;57(5):594-8. doi: 10.4103/0028-3886.57810
 37. Shekleton JA, Parcell DL, Redman JR, Phipps-Nelson J, Ponsford JL, Rajaratnam SM. Sleep disturbance and melatonin levels following traumatic brain injury. *Neurology*. 2010 May 25;74(21):1732-8. doi: 10.1212/WNL.0b013e3181e0438b
 38. Harmon KG, Drezner JA, Gammons M, Guskiewicz KM, Halstead M, Herring SA, Kutcher JS, Pana A, Putukian M, Roberts WO. American Medical Society for Sports Medicine position statement: concussion in sport. *Br J Sports Med*. 2013 Jan;47(1):15-26. doi: 10.1136/bjsports-2012-091941
 39. Grabowski P, Wilson J, Walker A, Enz D, Wang S. Multimodal impairment-based physical therapy for the treatment of patients with post-concussion syndrome: A retrospective analysis on safety and feasibility. *Phys Ther Sport*. 2017 Jan;23:22-30. doi: 10.1016/j.ptsp.2016.06.001
 40. Thomas DG, Apps JN, Hoffmann RG, McCrea M, Hammeke T. Benefits of strict rest after acute concussion: a randomized controlled trial. *Pediatrics*. 2015 Feb;135(2):213-23. doi: 10.1542/peds.2014-0966
 41. Tal S, Hadanny A, Sasson E, Suzin G, Efrati S. Hyperbaric Oxygen Therapy Can Induce Angiogenesis and Regeneration of Nerve Fibers in Traumatic Brain Injury Patients. *Front Hum Neurosci*. 2017 Oct 19;11:508. doi: 10.3389/fnhum.2017.00508
 42. Lippert-Grüner M. Botulinum toxin in the treatment of post-traumatic headache - case study. *Neurol Neurochir Pol*. 2012 Nov-Dec;46(6):591-4. doi: 10.5114/ninp.2012.32109
 43. Yerry JA, Kuehn D, Finkel AG. Onabotulinum toxin a for the treatment of headache in service members with a history of mild traumatic brain injury: a cohort study. *Headache*. 2015 Mar;55(3):395-406. doi: 10.1111/head.12495
 44. Schurman LD, Lichtman AH. Endocannabinoids: A Promising Impact for Traumatic Brain Injury. *Front Pharmacol*. 2017 Feb 17;8:69. doi: 10.3389/fphar.2017.00069

Ukrainian Neurosurgical Journal. 2026;32(1):17-23
doi: 10.25305/unj.339192

Етапний підхід до лікування больового синдрому в пацієнтів із вогнепальними ураженнями периферичних нервів кінцівок

А.С. Лисак¹, А.Ю. Кирпичова¹, А.В. Лобода²

¹ Відділення реконструктивної мікрохірургії та ортопедії, Головний медичний клінічний центр МВС України, Київ, Україна

² Відділення анестезіології та інтенсивної терапії, Головний медичний клінічний центр МВС України, Київ, Україна

Надійшла до редакції 12.09.2025

Прийнята до публікації 03.10.2025

Адреса для листування:

Лисак Андрій Сергійович,
Відділення реконструктивної мікрохірургії та ортопедії, Головний медичний клінічний центр МВС України, вул. Бердичівська, 1, Київ, 04116, Україна, e-mail: dr.andrew.lysak@gmail.com

Мета: визначити алгоритм етапності лікування больового синдрому в пацієнтів із вогнепальними ураженнями периферичних нервів кінцівок й оптимальні терміни хірургічного втручання на периферичних нервах шляхом аналізу літературних джерел і власних даних.

Матеріали і методи. Проведено аналіз результатів лікування болю в 1053 пацієнтів із вогнепальними ураженнями периферичних нервів. Усі пацієнти обстежені клінічно й сонографічно. Пацієнтів розподілили на дві групи: первинно консервативного та первинно хірургічного лікування. Першу групу (n=265) лікували консервативними методами (медикаментозна терапія, гідродисекції нерва, уведення стероїдних протизапальних препаратів, збагаченої тромбоцитами плазми або ботулотоксину). У групу первинно хірургічного лікування було залучено 788 пацієнтів із вогнепальними ураженнями периферичних нервів кінцівок, які потребували хірургічного відновлення, та наслідками ампутацій кінцівок. Через 1, 3, 6 та 12 місяців після лікування визначали рівень больового синдрому за візуальною аналоговою шкалою.

Результати. Консервативне лікування дає задовільний ефект при лікуванні больового синдрому в разі незначної його виразності та збереження позитивної динаміки впродовж першого місяця від початку лікування. При вогнепальних ураженнях периферичних нервів хірургічне лікування в більшості випадків дає стабільний прогнозований ефект, але у віддалений період може спостерігатися підсилення больового синдрому через появу регенераторного болю при реіннервації скелетних м'язів. Найскладнішим контингентом є пацієнти з болючими невромами, оскільки зазвичай біль є хронічним і важко піддається лікуванню.

Висновки. Пацієнти з вогнепальними ураженнями периферичних нервів кінцівок мають бути обстежені за допомогою ультразвукового дослідження. За відсутності причин компресії чи подразнення нерва та в разі збереження його цілісності лікування слід розпочинати з медикаментозної терапії, за потреби виконати гідродисекцію або провести ін'єкційну терапію стероїдними протизапальними препаратами чи ботулотоксином. При виразній компресії, порушенні анатомічної цілісності нерва чи неефективності консервативного лікування протягом 6 тиж слід рекомендувати хірургічне втручання.

Ключові слова: біль, нерв, вогнепальне поранення, невроліз, автонеуропластика, TMR, RPNI

Особливості сучасної війни, що передбачають застосування новітньої військової техніки, переважання артилерії та FPV-дронів, зумовлюють тяжкість і поліструктурність поранень. Стрімке зростання кількості високоенергетичних осколкових та вибухових травм ускладнює надання медичної допомоги, зокрема відновлення анатомічних структур і функціональних можливостей кінцівок.

За даними відділу статистики Національного військово-медичного клінічного центру «Головний військовий клінічний госпіталь», у період із лютого 2022 р. до червня 2023 р. у загальній структурі поранень на бойові травми кінцівок припадало

близько 69%, із них 85% були поліструктурними ураженнями. Щодо розподілу між верхніми та нижніми кінцівками незначно переважала (55%) бойова травма нижніх кінцівок. Вогнепальні ушкодження лише м'яких тканин зареєстрували в 65–68% пацієнтів, у двох третинах випадків вони супроводжувалися дефектами тканин (у 36–38% – малими й середніми, у 29–31% – великими та надвеликими). За нашими даними, у період із квітня 2014 р. до жовтня 2025 р. у близько 32% пацієнтів було діагностовано вогнепальне ураження периферичних нервів кінцівок.

Відомо, що при вогнепальній травмі периферичного нерва близько 26% пацієнтів стають інвалідами



через нейропатичний біль, що персистує, та втрату функції кінцівки. За звітами Національної служби здоров'я України в 2022–2024 рр. виконано понад 90 тис. ампутацій кінцівок, які могли ускладнюватися розвитком фантомного болю чи болючих невром. За даними різних авторів, серед травматичних відчленувань кінцівок, спричинених бойовою травмою, переважають ураження нижніх кінцівок, а найпоширенішим чинником є вибухова травма.

Нині в арсеналі лікарів є величезний спектр засобів, які зменшують відчуття болю в пацієнтів, – від сучасних підходів мультимодальної анестезії та постановки периневральних катетерів і помп з анестетиками до хірургічних втручань із реконструкції болючих невром чи імплантації нейростимуляторів. Незважаючи на актуальність проблеми та наявність великої кількості засобів, не існує загальноприйнятого комплексного підходу до лікування больового синдрому в пацієнтів із вогнепальними ураженнями периферичних нервів кінцівок.

Мета: визначити алгоритм етапності лікування больового синдрому в пацієнтів із вогнепальними ураженнями периферичних нервів кінцівок й оптимальні терміни хірургічного втручання на периферичних нервах шляхом аналізу літературних джерел і власних даних.

Матеріали і методи

Учасники дослідження

Проведено аналіз результатів лікування больового синдрому в 1053 пацієнтів (1006 чоловіків і 47 жінок, середній вік – $(34,1 \pm 8,2)$ року) із вогнепальними ураженнями периферичних нервів у період із квітня 2014 р. до жовтня 2025 р.

Дослідження було схвалено комісією з біоетики Інститут травматології та ортопедії НАМН України (протокол №1 від 19.01.2026 р.). Під час проведення дослідження дотримувалися біоетичних вимог Гельсінської Конвенції Ради Європи про права людини й біомедицину та відповідних законів України. У листі інформування для пацієнтів були чітко викладені всі положення та передбачені заходи щодо забезпечення здоров'я пацієнта, дотримання його прав, людської гідності та морально-етичних норм. Від усіх пацієнтів отримано інформовану згоду на участь у дослідженні.

Критерії залучення

Критеріями залучення нами визначено: вогнепальне поранення кінцівок, отримане в період із квітня 2014 р. до жовтня 2025 р., вогнепальне ураження периферичних нервів кінцівок, наявність больового синдрому.

Критерії вилучення

Критеріями вилучення з дослідження були: невогнепальне ураження периферичного нерва при бойовій травмі кінцівок (ушкодження внаслідок установлення стержнів апарату зовнішньої фіксації, турнікетні синдроми), відсутність больового синдрому, термін спостереження менше ніж 12 міс.

Дизайн дослідження

Усі пацієнти були обстежені клінічно та сонографічно (**Рис. 1**), за потреби виконували рентгенографію чи комп'ютерну томографію відповідного сегмента.

Визначали початковий рівень больового синдрому за візуальною аналоговою шкалою (ВАШ) болю (0 см – повна відсутність болю, 1–3 см – слабкий рівень болю, який лише інколи потребував додаткової корекції та загалом не спричиняв дискомфорту в повсякденному житті, 4–6 см – помірний больовий синдром, який міг потребувати додаткової медикаментозної корекції та спричиняти певний дискомфорт, але пацієнт його витримував у денний час, >6 см – виразний больовий синдром, що персистував і потребував постійної медикаментозної корекції, значно знижував якість життя пацієнта та в багатьох випадках був одним із показань до хірургічного втручання.

Залежно від діагностичних знахідок пацієнтів розподілили на дві групи: первинно консервативного та первинно хірургічного лікування.

Через 1, 3, 6 та 12 міс після лікування визначали рівень больового синдрому за ВАШ. З використанням телефонного опитування нам вдалося встановити результати лікування 683 пацієнтів (близько 64,9%).

Визначали переваги та недоліки методів лікування, їхню роль у лікуванні больового синдрому при вогнепальних ураженнях периферичних нервів кінцівок.

Характеристики групи

У групу первинно консервативного лікування було залучено 265 пацієнтів (246 чоловіків і 19 жінок, середній вік – $(35,2 \pm 6,5)$ року). У цій групі використовували консервативні методи корекції болю (препарати з такими діючими речовинами, як лорноксикам, прегабалін, антидепресанти групи інгібіторів зворотного захоплення серотоніну та норадреналіну), гідродисекції нерва під ультразвуковим контролем (за наявності фіброзної тканини навколо нерва, яка не заважала його візуалізації), введення стероїдних протизапальних препаратів, збагаченої тромбоцитами плазми (виготовленої з переважанням протизапальних факторів) і ботулотоксину. У разі відсутності ефекту від консервативного лікування (40 (15,1%) випадків) пацієнтам рекомендували відповідне хірургічне втручання.

У групу первинно хірургічного лікування було залучено 788 пацієнтів (760 чоловіків і 28 жінок, середній вік – $(33,6 \pm 9,0)$ років):

- 732 пацієнти (704 чоловіка та 28 жінок, середній вік – $(36,2 \pm 10,2)$ року) із вогнепальними ураженнями периферичних нервів кінцівок, які потребували хірургічного відновлення (**Рис. 2**);

- 56 пацієнтів (усі чоловіки, середній вік – $(30,9 \pm 7,8)$ року) із наслідками ампутацій кінцівок після вогнепальних травм, в яких розвинувся больовий синдром через формування болючих невром (**Рис. 3**).

Близько 53,1% вогнепальних уражень периферичних нервів були з наявністю первинного дефекту та потребували автонеуропластики.

Статистичний аналіз

Статистичний аналіз проведено з використанням стандартних методів описової статистики. Безперервні змінні представлені як середнє арифметичне значення (M) та стандартне відхилення (SD). Порівняння показників у групі до лікування та через рік проведено за допомогою парного t-критерію. Значення $p < 0,05$ вважали статистично значущим.

Стаття містить рисунки, які відображаються в друкованій версії у відтинках сірого, в електронній — у кольорі.

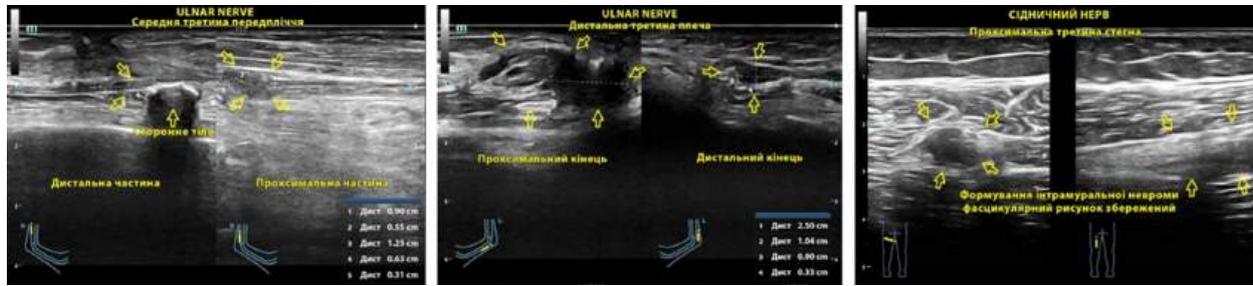


Рис. 1. Ультразвукова картина видів вогнепальних уражень периферичних нервів

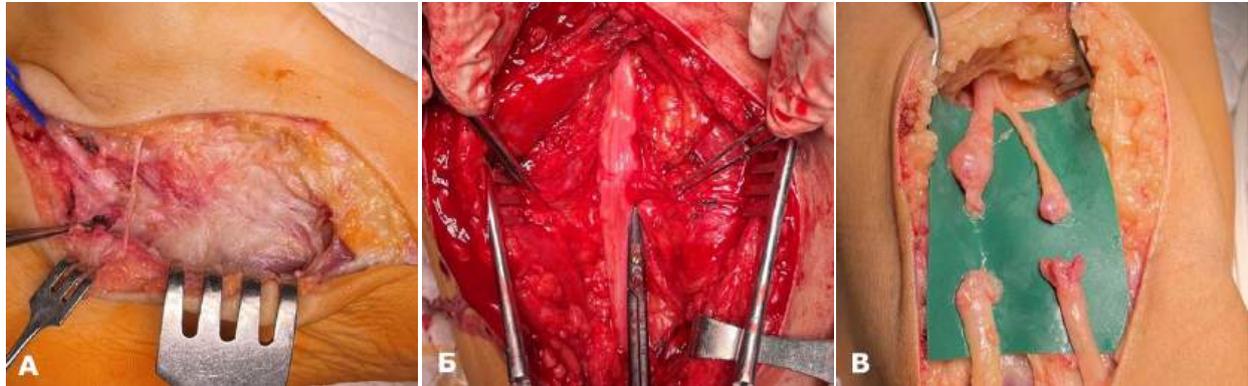


Рис. 2. Основні види вогнепального ураження периферичних нервів: а) компресія нерва внаслідок фіброзного переродження мезоневрїю; б) формування фіброзного тяжа (зони фіксації периферичного нерва), що запобігає його ковзанню та призводить до ішемії; в) анатомічне ушкодження – повне пошкодження нерва з дефектом нервової тканини

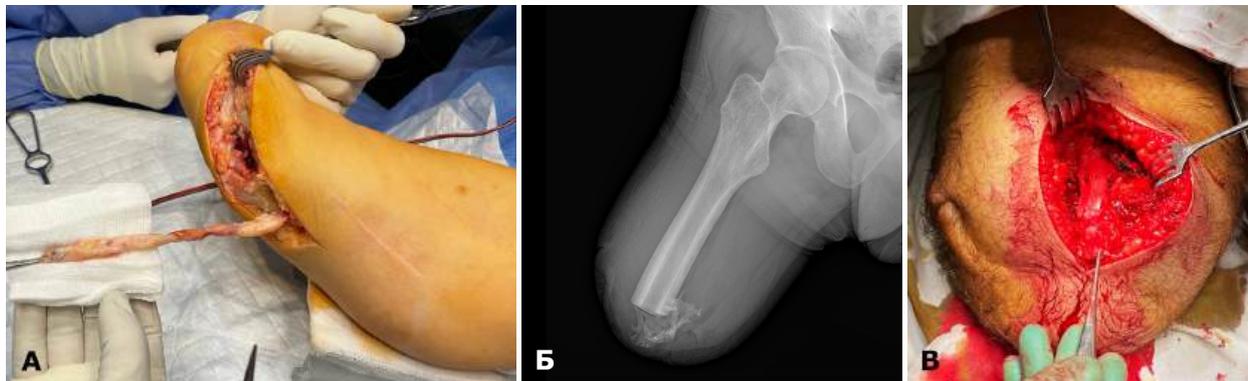


Рис. 3. Основні чинники, що спричиняють трансформацію неврови на болючу неврому: а) компресія кукси нерва (лігатурою чи фіксатором); б) подразнення неврови (кістковим екзостозом тощо); в) без видимих причин подразнення чи компресії (не виключена автоімунна відповідь)

Результати

Пацієнтам із наявністю болювого синдрому після вогнепальних уражень периферичних нервів за умови збереження цілісності периферичного нерва (за даними ультрасонографічного дослідження), відсутності виразної його компресії чи порушення інтраневральної структури, а також при ураженні лише поверхневих шкірних гілок периферичних нервів як перший етап пропонували консервативне лікування, яке розпочинали з медикаментозної корекції. За відсутності динаміки до зменшення болювого синдрому використовували гідродисекцію

нервового стовбура (у разі його компресії фібрознопереродженими тканинами) чи ін'єкції збагаченої тромбоцитами плазми (у разі слабого болювого синдрому) або стероїдного протизапального препарату (при виразнішому болювому синдромі). При позитивній відповіді на збагачену тромбоцитами плазму або стероїдний протизапальний препарат, але відсутності значної позитивної динаміки щодо зменшення болю виконували ін'єкцію ботулотоксину під провідниковою анестезією чи загальною седацією. Ін'єкції збагаченої тромбоцитами плазми в нашому дослідженні мали слабкий позитивний ефект.

У разі діагностування ушкодження периферичного нерва або неефективності консервативного лікування протягом 6 тиж пацієнтові виконували хірургічне втручання: невроліз периферичних нервів (33,7% випадків), шов нерва (у разі можливості накладання шва без дії тракційних сил на нерв і вільних рухах у суміжних суглобах, 10,5%), автонеуропластику периферичного нерва (55,8%).

Усім пацієнтам під час хірургічного втручання на периферичному нерві виконували процедуру ліпофілінгу (сумішшю аспірату підшкірної жирової клітковини та червоного кісткового мозку) для відновлення параневральної жирової муфти.

Пацієнтам із больовим синдромом, що розвинувся на тлі формування больючих невром, проводили такі хірургічні втручання: резекцію невроми з транспозицією нерва вглиб тканин – 21,4% випадків, створення регенеративного інтерфейсу периферичного нерва (RPNI (Рис.4) – огортання груп фасцикул змішаного нерва невеликими фрагментами денервованого вільного скелетного м'яза) – 60,7%, цільову м'язову реіннервацію (TMR (Рис.5) – накладання шва між змішаним нервом, що утворює

больючу неврому, та руховим нервом, який іннервує скелетний м'яз резидуальної кінцівки) – 17,9%.

Резекція та транспозиція невроми зменшували больовий синдром лише в гострий період, але пізніше (до 6 міс) біль рецидивував, іноді був інтенсивнішим, тому більшості пацієнтів виконано повторне хірургічне втручання.

У післяопераційний період усім пацієнтам призначали мультимодальну аналгезію (постановка периневрального катетера чи помпи з анестетиком), медикаментозну терапію (нестероїдні протизапальні препарати (лорноксикам)) і протинабрякову терапію (дексаметазон). Це дало змогу не використовувати наркотичні знеболювальні препарати в післяопераційний період.

Обговорення

За даними, наведеними в Табл.1, зниження болю після лікування у пацієнтів із вогнепальними ураженнями периферичних нервів при використанні всіх методів лікування було статистично значущим ($p < 0,05$).

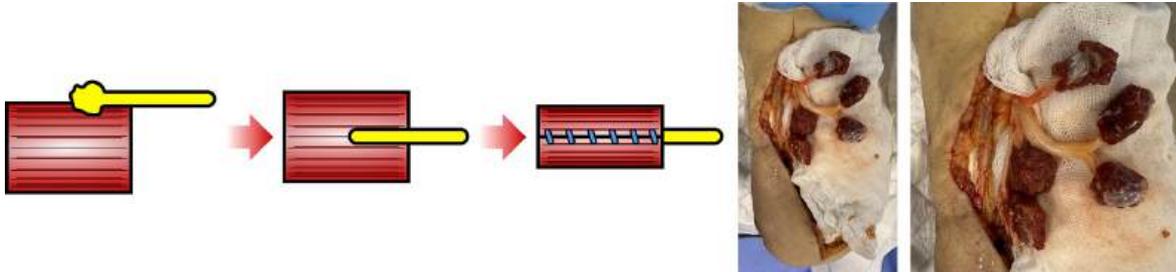


Рис. 4. Формування регенеративного інтерфейсу периферичного нерва

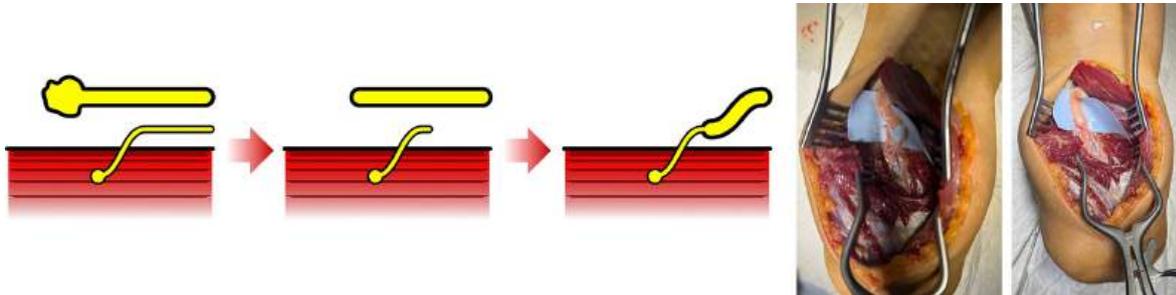


Рис. 5. Цільова м'язова реіннервація

Таблиця 1. Оцінка інтенсивності больового синдрому за ВАШ залежно від методу лікування, см

Метод лікування	До лікування	Через 1 міс	Через 3 міс	Через 6 міс	Через 12 міс	P
Медикаментозна терапія, n=99	2,2 ± 0,9	1,6 ± 0,8	1,2 ± 0,7	1,1 ± 0,5	1,1 ± 0,4	< 0,0001
Гідродисекція, n=29	3,9 ± 1,1	1,9 ± 0,2	1,6 ± 1,2	1,8 ± 1,3	1,9 ± 1,1	< 0,0001
Ін'єкційна терапія, n=44	4,3 ± 1,3	1,1 ± 0,4	1,4 ± 1,1	1,7 ± 1,5	1,6 ± 1,9	< 0,0001
Невроліз, n=161	5,6 ± 2,1	4,7 ± 1,5	4,2 ± 1,7	2,1 ± 1,1	1,8 ± 1,2	< 0,0001
Реконструкція нерва, n=315	4,2 ± 1,1	1,2 ± 0,6	2,1 ± 0,8	1,6 ± 1,0	2,1 ± 0,9	< 0,0001
Переміщення невроми, n=8	6,3 ± 2,1	1,1 ± 0,4	3,4 ± 2,1	4,6 ± 1,8	2,2 ± 1,5	0,0004
RPNI, n=22	6,7 ± 1,7	1,2 ± 1,4	1,4 ± 1,1	2,1 ± 1,6	2,2 ± 0,9	< 0,0001
TMR, n=7	6,2 ± 1,6	1,1 ± 0,8	1,1 ± 1,2	1,5 ± 0,6	2,1 ± 1,2	0,0003

Консервативне лікування давало задовільний ефект при лікуванні больового синдрому в разі незначної його виразності та збереження позитивної динаміки впродовж першого місяця від початку лікування (Рис.6). Медикаментозну терапію як самостійний метод лікування болю слід призначати як перший етап лікування при незначній виразності больового синдрому (до 3 балів за ВАШ) та як базову терапію в комбінації з гідродисекцією, ін'єкційними методами лікування або в ранній післяопераційний період. Гідродисекція при фіброзній компресії периферичного нерва значно полегшує біль у ранній післяопераційний період, але з часом больовий синдром може підсилюватися, що потребуватиме використання повторних процедур. Ін'єкційна терапія має добрий знеболювальний ефект, але больовий синдром може наростати, що в майбутньому може потребувати або повторних ін'єкцій, або хірургічного втручання. У нашому дослідженні використання збагаченої тромбоцитами плазми сприяло лише незначному тимчасовому поліпшенню, у 8% випадків – спричиняло значне підсилення больового синдрому, що може бути пов'язане з іншою технологією виготовлення та переважанням прозапальних

факторів. Ін'єкції ботулотоксину давали тривалий позитивний ефект, але часто у віддалений період виникав рецидив болю.

Хірургічне лікування при вогнепальних ураженнях периферичних нервів у більшості випадків давало стабільний прогнозований ефект, але у віддалений період може спостерігатися підсилення больового синдрому через появу регенераторного болю при реіннервації скелетних м'язів (Рис.7). Загалом невроліз периферичного нерва супроводжується прогресивним, але повільним зменшенням больового синдрому до 6 міс після хірургічного втручання. Реконструкція (шов або автонеуропластика) периферичного нерва в ранній післяопераційний період може значно зменшити больовий синдром унаслідок резекції неврови, але у віддалений період можуть спостерігатися також регенераторний біль від м'язів і неврови в зонах шва нерва, які можуть спричинити біль та парестезію при подразненні.

Найскладнішим контингентом для лікування є пацієнти з болючими невромами, оскільки зазвичай біль від болючої неврови є хронічним і важко піддається лікуванню (Рис.8).

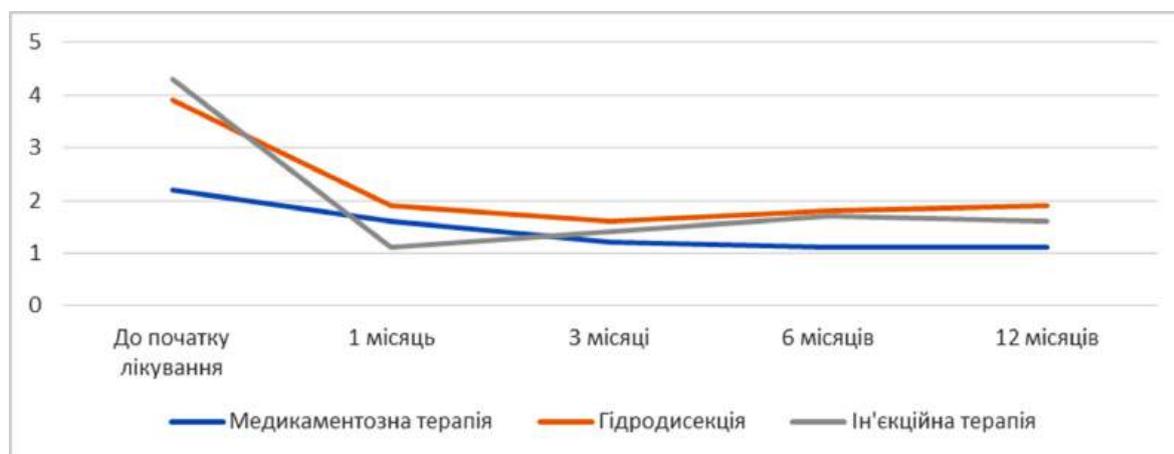


Рис. 6. Динаміка виразності больового синдрому залежно від методу консервативного лікування

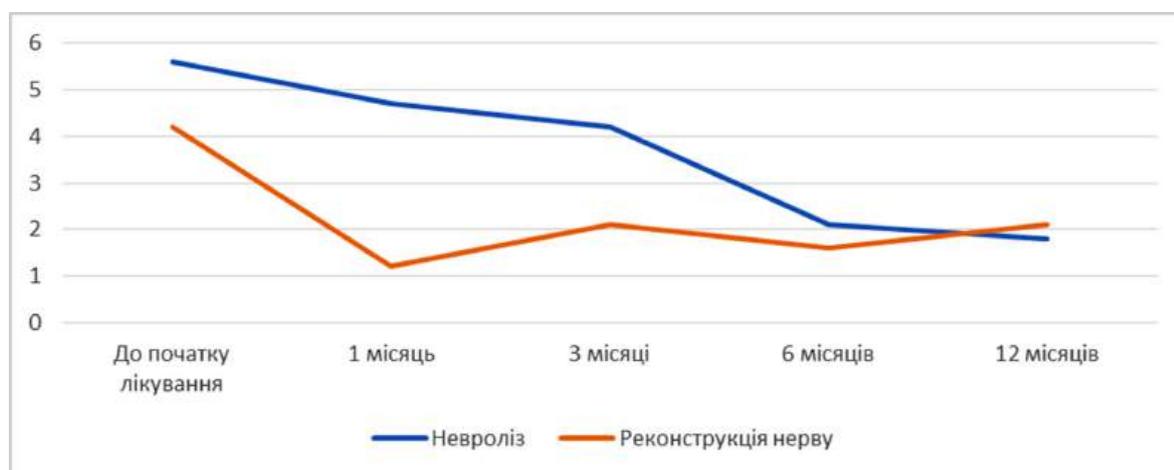


Рис. 7. Динаміка виразності больового синдрому залежно від методу хірургічного лікування при вогнепальних ураженнях периферичних нервів



Рис. 8. Динаміка виразності больового синдрому при болючих невромах залежно від методу хірургічного лікування

Останніми роками у світі відбувається зміна парадигм щодо лікування болючих невром – від пасивної паліативної тактики резекції чи переміщення нервоми (що часто дає рецидив навіть у ранній післяопераційний період) до активної реконструктивної тактики, основну мету якої ілюструє фраза «дайте нерву що реіннервувати». З дотриманням цього принципу розроблені сучасні методики створення регенеративного інтерфейсу периферичного нерва та цільової м'язової реіннервації. У більшості (близько 80,4%) випадків утворення болючої невроми є наслідком неправильно виконаної ампутації кінцівки та хронічної компресії чи подразнення нервоми.

Обговорюючи концепцію болю при вогнепальних ураженнях периферичних нервів, важливо пам'ятати патофізіологічні механізми перетворення ноцицептивного болю (захист від наявного чи імовірного ушкодження тканин через стимуляцію терморцепторів, механорецепторів або хеморецепторів та нервових закінчень) на нейропатичний (аномальна нейрональна активність, вторинна щодо захворювання, травми чи дисфункції соматосенсорної нервової системи). Адже тривала ноцицептивна стимуляція активує як периферичні механізми (гіперзбудливість мембран нервових закінчень, ектопічна розрядка синапсів, зміни в транскрипції генів), так і центральні (гіперзбудливість нервової системи, втрата контролю за пригніченням збудження, як наслідок – реорганізація процесів та стимулів у центральній нервовій системі), що може призвести до сенситизації нервової системи й розвитку нейропатичного болю. Тому слід вчасно вплинути на ноцицептивну стимуляцію внаслідок поранення та запобігти утворенню вогнища нейропатичного болю. З огляду на це надзвичайно важливою є концепція часу та етапності підходів до лікування.

На підставі результатів аналізу отриманих нами даних і даних, наведених у науковій літературі, нами запропонована концепція етапного підходу до лікування больового синдрому в пацієнтів із вогнепальними ураженнями периферичних нервів кінцівок.

Висновки

1. Усі пацієнти з вогнепальними ураженнями периферичних нервів кінцівок чи наявністю болючих невром після ампутації кінцівки мають бути обстежені за допомогою ультразвукового дослідження.

2. У разі відсутності об'єктивних причин компресії чи подразнення нерва та збереження його анатомічної цілісності лікування слід розпочати з корекції медикаментозної терапії, за потреби виконати гідродисекцію нервового стовбура чи провести ін'єкційну терапію стероїдними протизапальними препаратами або ботулотоксином.

3. За наявності об'єктивної причини подразнення нерва, його виразної компресії, порушення анатомічної цілісності чи неефективності консервативного лікування протягом 6 тиж слід рекомендувати хірургічне втручання.

4. Застосування сучасних методик реконструкції болючих невром (RPNi та TMR) дає кращі та триваліші результати лікування болю, ніж класичні методики резекції чи транспозиції нервоми.

5. Використання мультимодальної анестезії в ранній післяопераційний період із застосуванням периневральних катетерів, препаратів лорноксикаму та протинабрюкової терапії (дексаметазон) дає змогу мінімізувати потребу пацієнта в наркотичних анальгетиках у післяопераційний період, а також допомагає «розірвати» патологічний механізм розвитку нейропатичного болю.

Розкриття інформації

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Етичне схвалення

Усі процедури, виконані в дослідженнях за участю людей, відповідали етичним стандартам інституційного та національного дослідницького комітету, а також Гельсінській декларації 1964 р. та її пізнішим поправкам або відповідним етичним стандартам.

Інформована згода

Письмова інформована згода була отримана від кожного пацієнта або члена сім'ї перед операцією.

Фінансування

Дослідження не мало спонсорської підтримки.

Список літератури

1. Lysak A, Gaiovych V, Strafun S, Shypunov V. Ukrainian Orthopedic Trauma Experience in Managing Wartime Injuries of the Upper Extremity. *Hand Clin.* 2025 Aug;41(3):373-385. doi: 10.1016/j.hcl.2025.03.012
2. Rivera JC, Glebus GP, Cho MS. Disability following combat-sustained nerve injury of the upper limb. *Bone Joint J.* 2014 Feb;96-B(2):254-8. doi: 10.1302/0301-620X.96B2.31798
3. Guriev S, Lysun D, Kushnir V, Satsyk S, Kurachenko I. Lower extremity amputations due to modern combat operations: clinical and anatomical aspect. *TRAUMA.* 2018;19(4):5-8. doi: 10.22141/1608-1706.4.19.2018.142099
4. Tsema EV, Khomenko IP, Bepalenko AA, Buryanov OA, Mishalov VG, Kikh AY. Clinico-statistical investigation of the extremity amputation level in wounded persons. *Klin. Khirurgiia.* 2017;10:324-31. doi: 10.26779/2522-1396.2017.10.51
5. Dones I, Levi V. Spinal Cord Stimulation for Neuropathic Pain: Current Trends and Future Applications. *Brain Sci.* 2018 Jul 24;8(8):138. doi: 10.3390/brainsci8080138
6. Schestatsky P, Vidor L, Winckler PB, Araújo TG, Caumo W. Promising treatments for neuropathic pain. *Arq Neuropsiquiatr.* 2014 Nov;72(11):881-8. doi: 10.1590/0004-282x20140157
7. Papenhoff MC, Habig K, Schmitz C, Lundin S, Schreier D, Tineghe J, Dudda M. Complex Regional Pain Syndrome (CRPS) [Complex Regional Pain Syndrome (CRPS) - State of the Art in Diagnostics and Therapy]. *Z Orthop Unfall.* 2023 Jun;161(3):337-352. German. doi: 10.1055/a-1898-2454
8. Malinowski MN, Jain S, Jassal N, Deer T. Spinal cord stimulation for the treatment of neuropathic pain: expert opinion and 5-year outlook. *Expert Rev Med Devices.* 2020 Dec;17(12):1293-1302. doi: 10.1080/17434440.2020.1801411
9. Ciaramella A. Psychopharmacology of chronic pain. *Handb Clin Neurol.* 2019;165:317-337. doi: 10.1016/B978-0-444-64012-3.00019-8
10. List EB, Klieverik V, Martin E, Krijgh DD, Henk Coert J. Prevalence of residual limb pain and neuromas after upper extremity amputation: a systematic review and meta-analysis. *J Hand Surg Eur Vol.* 2025 Dec;50(11):1440-1447. doi: 10.1177/17531934251345368
11. Morteza Bagi H, Ahmadi S, Tarighat F, Rahbarghazi R, Soleimanpour H. Interplay between exosomes and autophagy machinery in pain management: State of the art. *Neurobiol Pain.* 2022 Jun 9;12:100095. doi: 10.1016/j.ynpai.2022.100095
12. Issa CJ, Svientek SR, Dehdashtian A, Cederna PS, Kemp SWP. Pathophysiological and Neuroplastic Changes in Postamputation and Neuropathic Pain: Review of the Literature. *Plast Reconstr Surg Glob Open.* 2022 Sep 28;10(9):e4549. doi: 10.1097/GOX.0000000000004549

UA-XEFO-PUB-032026-085

Ukrainian Neurosurgical Journal. 2026;32(1):24-39
doi: 10.25305/unj.339535

Ендоваскулярні втручання в лікуванні хронічних субдуральних гематом

В.А. Перепелиця¹, Ю.В. Чердиченко¹, А.Ю. Мірошніченко¹, А.Г. Сірко², Р.А. Армонда^{3,4}

¹ Ендоваскулярний центр, Дніпропетровська обласна клінічна лікарня імені І.І. Мечникова, Дніпро, Україна

² Центр церебральної нейрохірургії, Дніпропетровська обласна клінічна лікарня імені І.І. Мечникова, Дніпро, Україна

³ Відділення нейроендоваскулярної хірургії та нейротравм, лікарня Джорджтаунського університету, Вашингтон, округ Колумбія, США

⁴ Відділення нейроанестезії, Вашингтонський лікарняний центр, Вашингтон, округ Колумбія, США

Надійшла до редакції 17.09.2025

Прийнята до публікації 06.10.2025

Адреса для листування:

Перепелиця Вадим Андрійович,
Ендоваскулярний центр,
Дніпропетровська обласна клінічна лікарня імені І.І. Мечникова,
площа Соборна, 14, Дніпро, 49044,
Україна, e-mail: neuro.perepelitsa@gmail.com

Мета: оцінити ефективність емболізації середньої менінгеальної артерії (СМена) у пацієнтів із хронічною субдуральною гематомою (ХСДГ) на основі перших 19 клінічних випадків у Дніпропетровській обласній клінічній лікарні імені І.І. Мечникова; уточнити показання до ізольованого/комбінованого лікування ХСДГ та ефективність трансрадіального доступу.

Матеріали і методи. Проведено ретроспективне когортне дослідження з аналізом проспективно зібраних даних 19 пацієнтів із ХСДГ, яким виконали емболізацію СМена в Дніпропетровській обласній клінічній лікарні імені І.І. Мечникова в період із 24 березня 2022 р. до 6 листопада 2024 р. Пацієнтам проведено ендоваскулярне втручання ізольоване чи в комбінації з відкритою операцією. Проаналізовано демографічні дані, етіологічні чинники, клінічну картину, дані комп'ютерної та магнітно-резонансної томографії, церебральної ангиографії. Оцінку ефективності лікування проводили через 1, 3 та 6 міс після операції.

Результати. За типом проведеного лікування пацієнтів розподілили на три групи: емболізація СМена — 13 (68,4%), первинна емболізація СМена із подальшим хірургічним дрениванням — 3 (15,8%), первинне хірургічне лікування із подальшою емболізацією СМена — 3 (15,8%). Травматичні ХСДГ виявлено в 12 (63,2%) пацієнтів, спонтанні ХСДГ — у 7 (36,8%), із них у 2 із мікотичними аневризмами коркових гілок середньої мозкової артерії. Цим двом хворим виконано ендоваскулярне деконструктивне виключення аневризми й емболізацію СМена. Одному пацієнту із хронічною анемією проведено лише емболізацію СМена. П'ять (26,3%) пацієнтів отримували антикоагулянтну/антиагрегантну терапію. Гемодинамічно значуще стенозування магістральних артерій голови виявлене в 3 (15,8%) пацієнтів. Контрольне обстеження (комп'ютерна та магнітно-резонансна томографія) через 6 міс показало позитивну динаміку в усіх випадках, а у 17 (89,5%) пацієнтів — відсутність ХСДГ.

Висновки. Емболізація СМена підтвердила високу ефективність і безпечність при лікуванні ХСДГ як самостійна методика, так і як доповнення до класичної хірургії. Використання трансрадіального доступу продемонструвало переваги в осіб похилого віку та категорії «підвищеного ризику», а також сприяло зменшенню терміну госпіталізації. Застосування Опух™ забезпечувало глибшу пенетрацію та тривалішу оклюзію патологічних судин порівняно із PVA (полівініловими) частинками. Отримані дані узгоджуються із сучасними світовими тенденціями, підтверджуючи перспективність методики.

Ключові слова: хронічна субдуральна гематома; емболізація середньої менінгеальної артерії; Опух™; трансрадіальний доступ; ендоваскулярна нейрохірургія; малоінвазивне лікування; нейротравма, отримана внаслідок військових дій

Вступ

Хронічна субдуральна гематома (ХСДГ) є однією з найчастіших причин нейрохірургічних госпіталізацій у літніх пацієнтів і характеризується високим рівнем рецидивів після стандартного хірургічного лікування. Поширеність ХСДГ становить 13 – 20 випадків на 100 тис. населення, а серед осіб віком понад 65 років зростає в 4 – 5 разів і може перевищувати 70 випадків на 100 тис. населення. Очікується, що до 2030 р. інцидентність зростає до 121 випадку на 100

тис. населення, що пов'язано зі старінням населення та широким застосуванням антикоагулянтів [1, 2].

Стандартне хірургічне лікування (фрезові отвори або краніотомія з дрениванням) є ефективним, але рецидиви фіксують у 11 – 20% випадків, а потреба в повторних втручаннях становить 14% [1,3]. Це стимулює пошук менш інвазивних підходів із тривалим ефектом.

Однією з найперспективніших стратегій є ендоваскулярна емболізація середньої менінгеальної

Copyright © 2026 В.А. Перепелиця, Ю.В. Чердиченко, А.Ю. Мірошніченко, А.Г. Сірко, Р.А. Армонда



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

артерії (СМена). Механізм дії полягає в блокуванні кровопостачання неоваскуляризованої зовнішньої мембрани гематоми, що перериває цикл повторних мікрокровотеч і сприяє стабільній резорбції. Спочатку метод описували як терапію «останнього шансу» в пацієнтів із групи високого ризику, але сучасні дані свідчать про ефективність емболізації як у поєднанні з хірургічним дренуванням, так і як самостійної тактики [4, 5].

Доказова база підсилася завдяки кільком рандомізованим клінічним дослідженням (РКД) рівня NEJM, проведеним останніми роками. У випробуванні EMBOLISE (>600 пацієнтів, 39 центрів США) додавання емболізації СМена до стандартного лікування вірогідно знизило частоту невдач лікування (рецидиву/персистенції >10 мм, повторне втручання чи серйозні події) без підвищення ризику інсульту чи 30-денної смертності [6]. У китайському РКД MAGIC-MT серед пацієнтів із негострими субдуральними гематомами частота 90-денного симптомного прогресування була порівнянню при застосуванні емболізації СМена та стандартному лікуванні, але автори виявили залежність ефекту від клінічного сценарію (операція або консервативне ведення) [7]. D. Fiorella та співавт. підтвердили зниження частоти невдач лікування при додатковій емболізації в РКД (STEM) [8].

Сучасні консенсуси відзначають ключову роль емболізації СМена при веденні ХСДГ. В ARISE I (2024) наголошено на необхідності стандартизації показань і визначено пріоритетні напрями подальших досліджень [9]. Європейський консенсус (Brain & Spine, 2024) деталізував роль емболізації СМена при первинних і рецидивних ХСДГ, а рекомендації NICE IPG779 (2023) офіційно визнали процедуру перспективною для зниження частоти рецидиву, але не як метод усунення мас-ефекту.

Систематичний огляд [23] продемонстрував низьку частоту серйозних ускладнень, про що свідчила наявність поодиноких випадків ішемічних подій чи ураження черепних нервів при небезпечних анастомозах. Опубліковані в 2025 р. мультицентрові дані [10, 21] свідчать, що доопераційна емболізація СМена (до бур-холу/дренування) може знижувати ризик повторної операції порівняно з післяопераційною, хоча оптимальні строки потребують проспективного підтвердження.

Спостерігається розширення показань до емболізації СМена: від рецидивних і двобічних ХСДГ до пацієнтів на антикоагулянтній/антиагрегантній терапії та мінімально симптомних випадків. Водночас редакційні огляди JNIS наголошують на потребі уніфікації критеріїв відбору та кінцевих точок у майбутніх дослідженнях [10].

Таким чином, ХСДГ залишається однією з актуальних проблем сучасної нейрохірургії. Емболізація СМена довела ефективність як доповнення до стандартних методів, так і як самостійна тактика в певних категорій пацієнтів. Дані останніх РКД, метааналізів і міжнародних консенсусів підтверджують її здатність знижувати ризик рецидиву та повторних втручань при збереженні високого профілю безпечності. Однак не вирішено питання щодо оптимальних критеріїв для відбору пацієнтів, вибору матеріалів і періопераційного терміну

виконання емболізації, що потребує проведення багатоцентрових досліджень.

Мета: Оцінити ефективність емболізації середньої менінгеальної артерії в пацієнтів із хронічною субдуральною гематомою на основі перших 19 клінічних випадків у Дніпропетровській обласній клінічній лікарні імені І.І. Мечникова; уточнити показання до ізольованого/комбінованого лікування хронічних субдуральних гематом та ефективність трансрадіального доступу.

Матеріали і методи

Учасники дослідження

Робота ґрунтується на аналізі даних 19 пацієнтів із ХСДГ, яким у період із 24 березня 2022 р. до 6 листопада 2024 р. виконано рентгеноваскулярну суперселективну емболізацію СМена в Ендоваскулярному центрі Дніпропетровської обласної клінічної лікарні імені І.І. Мечникова. До та після операції відібрані пацієнти проходили лікування в Центрі церебральної нейрохірургії та Центрі судинної нейрохірургії зазначеної лікарні.

Від усіх пацієнтів отримано письмову інформовану згоду на проведення дослідження згідно із Гельсінською декларацією Всесвітньої медичної асоціації про етичні принципи проведення наукових медичних досліджень за участю людини (1964) з поправками, директивою Європейського Союзу 86/609 щодо участі людей у медико-біологічних дослідженнях, а також наказом МОЗ України зі змінами № 690 від 23.09.2009 р.

Критерії залучення:

- вік пацієнтів ≥ 18 років;
- наявність хронічної субдуральної гематоми (однобічної або двобічної), підтвердженої за даними комп'ютерної томографії/магнітно-резонансної томографії (КТ/МРТ);
- виконання рентгеноваскулярної суперселективної емболізації СМена як самостійного втручання або в поєднанні з хірургічним дренуванням;
- наявність повних клінічних і нейровізуалізаційних даних до лікування та в період спостереження (не менше ніж 6 міс);
- письмова інформована згода пацієнта на участь у дослідженні.

Критерії вилучення:

- вік пацієнтів <18 років;
- відсутність підтвердженої ХСДГ (гострі або підгострі субдуральні гематоми за даними КТ/МРТ);
- наявність іншої внутрішньочерепної патології, яка визначала клінічну картину та потребувала альтернативної тактики лікування (пухлини, гострий ішемічний інсульт, внутрішньомозкові крововиливи тощо);
- відсутність повних клінічних або нейровізуалізаційних даних до операції та після;
- відсутність контрольного спостереження.

Характеристика групи

У дослідження було залучено 19 пацієнтів із ХСДГ, яким виконали ендоваскулярну емболізацію СМена як самостійне втручання або в поєднанні з хірургічним дренуванням. Залежно від лікувальної тактики пацієнтів розподілили на три групи: ізольована

емболізація СМена, первинна емболізація СМена з подальшим хірургічним лікуванням і первинне хірургічне лікування з наступною емболізацією СМена. Середній вік пацієнтів становив 60,2 року. Серед пацієнтів переважали чоловіки. Найчастішою була травматична етіологія ХСДГ, тоді як спонтанні форми траплялися рідше та в окремих випадках асоціювалися із супутньою судинною патологією. Групи були порівнянними за віком, співвідношенням статей, клініко-неврологічним статусом і базовими нейровізуалізаційними характеристиками, що дало змогу провести коректний аналіз результатів лікування з урахуванням обраної тактики.

Комп'ютерну томографію головного мозку виконували з використанням апарата «Optima CT660» (GE Healthcare, США), МРТ – за допомогою апарата «Toshiba Excelart Vantage» 1,5 Тл (Японія), ЦАГ – з використанням апарата «Innova IGS 540» (GE Healthcare, США). Для селективної ЦАГ використовували контрастні речовини «Ультравіст 370» (Німеччина), «Томогексол 350» (Україна).

За даними КТ і/або МРТ визначали щільність гематоми, кількість камер, розмір (товщина, висота, довжина), об'єм, локалізацію, зміщення серединних структур головного мозку до та після операції. За даними ЦАГ оцінювали наявність супутньої патології, анатомічні особливості будови гілок СМена на боці ХСДГ.

Показаннями до рентгенендоваскулярної суперселективної емболізації СМена були товщина гематоми <15 мм і зміщення серединних структур головного мозку <5 мм без виразної вогнищевої неврологічної симптоматики та/або рецидивна ХСДГ. Показаннями до комбінованого хірургічного втручання (емболізація + дренування/дренування + емболізація) були товщина гематоми ≥15 мм, зміщення серединних структур головного мозку ≥5 мм і наявність вогнищевої неврологічної симптоматики [1, 3, 11].

Усі хворі після операції перебували під динамічним спостереженням у невропатолога/сімейного лікаря. Проводили контрольні КТ і МРТ через 1, 3 та 6 міс після операції при стабільній неврологічній картині.

Дизайн дослідження

Одноцентрове ретроспективне когортне дослідження з аналізом проспективно зібраних даних.

Методика хірургічного втручання

У всіх випадках операції виконували правобічним трансрадіальним доступом під місцевою анестезією операційною бригадою (оператор Ю.В. Чередниченко, асистент В.А. Перепелиця).

У 18 (94,7%) випадках для емболізації СМена використовували речовину для емболізації Опух™18 (полімерний емболізат) (ethylene-vinyl alcohol copolymer, Medtronic, Irvine, CA, USA). В 1 (5,3%) випадку як емболізат обрано Polyvinyl alcohol particles (полівінілові частинки), 250 мкм (PVA, e.g., Contour™, Boston Scientific, USA).

Операції проводили з використанням ангиографічного комплексу «GE Innova IGS 540» (США). Через радіальний інтродюсер 6 Fr за допомогою провідникового катетера 6 Fr виконували катетеризацію початкового сегмента зовнішньої сонної артерії на відповідному боці. Крізь провідниковий катетер на мікропровіднику (0,014 дюйма) мікрокатетером, сумісним із диметилсульфоксидом, крізь верхню щелепну артерію проводили катетеризацію

дистальних відділів СМена. Після суперселективної катетеризації СМена й підтвердження ангиографічного зображення васкуляризації джерел капсули ХСДГ поступово вводили речовину для емболізації під рентгеноскопічним контролем. Під час ін'єкції мікрокатетер повільно репозиціювався в проксимальному напрямку до досягнення повного закриття патологічної судинної мережі.

Особливу увагу приділяли контролю ретроградного рефлюксу емболізату для запобігання його проникненню в нецільові для емболізації басейни через «небезпечні» анастомози із басейном внутрішньої сонної та очної артерії і між барабанними артеріями. Проксимальною межею емболізації слугували гірла артеріальних гілок, що відходять від проксимального сегмента СМена (петрозної та кавернозної), що анастомозують із басейном внутрішньої сонної артерії через інфралатеральний і менингогіпофізарний стовбури, та медіальної гілки, яка анастомозує із басейном очної артерії. Тому для ефективної емболізації використано методику емболізації від дистальних сегментів лобово-тім'яної та кам'янисто-лускової гілок у проксимальному напрямку до зазначеної «небезпечної» точки. Середня тривалість операції – 30 хв.

Уся операція супроводжувалася контрольними серіями цифрової субтракційної ангиографії, які виконували на ключових етапах втручання для верифікації положення катетера й поширення емболізату. Катетеризацію судин і навігацію проводили з використанням режиму навігаційної проекції, що забезпечувало високоточне позиціонування мікроінструментів.

Статистичний аналіз

Обробку й аналіз даних проводили за допомогою пакетів програм Statistica 10 (StatSoft® Inc., США, ліцензія № STA862D175437Q) і MedCalc V.20.218 free trial version (MedCalc Software Ltd, Ostend, Бельгія; <https://www.medcalc.org/download.php>, 2023).

Результати

Середній вік хворих у нашому дослідженні порівняно з літературними джерелами був молодше – 60,2 року [39;85]. Серед пацієнтів було 12 (63,2%) чоловіків та 7 (36,8%) жінок.

Найпоширенішими симптоми були головний біль (94,7%) та запаморочення (84,2%). Монопарез/геміпарез виявлені в 4 (21,1%) випадках. У 2 (10,5%) пацієнтів спостерігалися генералізовані судомні напади, ще в 2 (10,5%) виявлено порушення мови (в 1 – за типом дизартрії, в 1 – сенсо-моторна афазія). Двоє (10,5%) хворих із порушеннями свідомості (GCS-12). Асимптомних ХСДГ у нашому дослідженні не було.

Хронічна субдуральна гематома виявлена за результатами МРТ у 7 (36,8%) пацієнтів, за даними КТ – у 12 (63,2%), із них 7 (36,8%) пізніше були дообстежені за допомогою МРТ. В усіх спостереженнях для доопераційного дообстеження застосовували селективну субтракційну дигітальну ЦАГ. Лівобічну ХСДГ діагностували в 7 (36,8%) випадках, правобічну – у 5 (26,3%), у решти пацієнтів – двобічні ХСДГ. Із них більшість (89,5%) були півкульними, а 2 (10,5%) локалізувалися в лобовій ділянці. У 4 (21,1%) випадках виявлені багатоканальні ХСДГ.

За даними МРТ головного мозку в режимі T1, найпоширенішим типом сигналу ХСДГ була гіперінтенсивність, яка спостерігалась у 8 (42,1%)

пацієнтів. Гіпоінтенсивний сигнал виявлено в 3 (15,8%) випадках, гетерогенну інтенсивність – також у 3 (15,8%).

Середній розмір ХСДГ у нашому дослідженні, за параметрами ширина/довжина/висота становив 14,05/150,23/89,71 мм, середня товщина гематоми – 14,05 мм. Середній об'єм ХСДГ – 99,9 см³ (±53 см³). Розміри найменшої гематоми – 3/65/58 мм, об'єм – 11,3 см³, найбільшої – 30/170/81 мм, об'єм – 413,1 см³. У 16 (61,5%) гематом товщина <15 мм, у 10 (38,5%) ≥15 мм (з урахуванням 7 пацієнтів із двобічними ХСДГ). Середній показник зміщення серединних структур головного мозку становив 4,16 мм, <5 мм – у 14 (73,7%) пацієнтів, ≥5 мм – у 5 (26,3%).

Травматичну етіологію ХСДГ зареєстровано в 12 (63,2%) випадках, зокрема у військовика віком 41 рік, який отримав травму під час бойових дій (клінічний випадок №1). Спонтанні субдуральні гематоми траплялися рідше. Із 7 (36,8%) випадків у 2 (10,5%) мікотичні аневризми коркових (М4) сегментів середньої мозкової артерії спричинили ХСДГ на відповідному боці (клінічний випадок №2).

В одного із прооперованих пацієнтів із супутньою хронічною анемією виконано лише емболізацію СМена без хірургічного дренування. П'ятеро (26,3%) хворих отримували антиагрегантну/антикоагулянтну терапію, гемодинамічно значуще стенозування магістральних артерій голови виявлено в 3 (15,8%) випадках. Інтраопераційних або післяопераційних ускладнень у нашому дослідженні не зафіксовано.

За типом проведеного лікування пацієнтів розподілили на групи:

- емболізація СМена – 13 (68,4%) випадків;
- первинна емболізація СМена із подальшим хірургічним дренуванням – 3 (15,8%) випадки;
- первинне хірургічне лікування із подальшою емболізацією СМена – 3 (15,8%) випадки.

За даними контрольних нейровізуалізаційних обстежень (КТ/МРТ) через 6 міс після втручання, у всіх пацієнтів відзначена позитивна динаміка, у 17 (89,5%) – повне розсмоктування ХСДГ.

Клінічний випадок №1

Чоловік, 41 рік, військовик. Звернувся до Дніпропетровської обласної клінічної лікарні імені І.І. Мечникова із симптомами головного болю та запаморочення. Отримав травму під час бойових дій 09.03.2024 р. (за 75 днів до операції).

За даними КТ головного мозку діагностовані ХСДГ лобових ділянок з обох боків: товщина/довжина/висота зліва – 8/48/48 мм, справа – 9/132/51 мм. Зміщення серединних структур головного мозку не виявлено (**Рис. 1**).

Для дообстеження виконана трансрадіальна селективна субтракційна дигітальна ЦАГ. Судинної патології не виявлено.

Односесійно проведені операції (23.05.2024 р.): рентгеноваскулярна емболізація СМена з обох боків емболізатом Опух™ (**Рис. 2 та 3**).

Післяопераційний період без особливостей. Неврологічний статус не змінився. Ускладнень не було. Хворого виписано зі стаціонару на другу добу після операції.

Контрольну КТ головного мозку виконано через 1 міс після операції (**Рис. 4**). Виявлено тотальний регрес

ХСДГ обох лобових ділянок. Під час контрольного огляду зареєстровано регрес загальномоозкової симптоматики.

Клінічний випадок №2

Чоловік, 52 роки, звернувся до Дніпропетровської обласної клінічної лікарні імені І.І. Мечникова із симптомами головного болю та запаморочення, які виникли раптово близько 1,5 міс тому.

За даними МРТ головного мозку виявлена півкульна ХСДГ справа (товщина/довжина/висота – 10/166/124 мм), зміщення серединних структур 4 мм вліво (**Рис. 5**).

З огляду на спонтанний початок захворювання для дообстеження виконана трансрадіальна селективна субтракційна дигітальна ЦАГ. Виявлено мікотичну аневризму М₄-сегмента правої середньої мозкової артерії (**Рис. 6**).

Першим етапом виконано рентгеноваскулярну деконструктивну емболізацію мікотичної аневризми М₄-сегмента правої середньої мозкової артерії мікроспіралями (03.10.2024 р.) (**Рис. 7**).

Односесійно виконана рентгеноваскулярна емболізація правої СМена речовиною для емболізації Опух™ (03.10.2024 р.) (**Рис. 8**).

Післяопераційний період без особливостей. Неврологічний статус не змінився. Ускладнень не було. Хворого виписано зі стаціонару на другу добу після операції.

Контрольну МРТ головного мозку проведено через 3 міс після операції (**Рис. 9**). Виявлено тотальний регрес ХСДГ, нормальну позицію серединних структур головного мозку. У режимі T2W візуалізується вогнище ішемічного інсульту в правій лобовій частці в проекції кровопостачання виключеної гілки правої середньої мозкової артерії разом із аневризмою. Під час контрольного огляду вогнищева неврологічна симптоматика була відсутня, головний біль і запаморочення регресували.

Клінічний випадок №3

Чоловік, 45 років, звернувся до Дніпропетровської обласної клінічної лікарні імені І.І. Мечникова із симптомами головного болю та запаморочення, які прогресують останні 2 тиж. Відомо, що була побутова травма голови 05.01.2024 р. (за 76 днів до операції).

За даними МРТ головного мозку виявлено півкульну багатокammerну ХСДГ справа (товщина/довжина/висота – 27/165/87 мм), зміщення серединних структур 5 мм вліво (**Рис. 10**).

Для дообстеження хворому виконано трансрадіальну селективну субтракційну дигітальну ЦАГ. Судинної патології не виявлено.

Проведено рентгеноваскулярну емболізацію правої СМена речовиною для емболізації Опух™ (21.03.2024 р.) (**Рис. 11**).

Післяопераційний період без особливостей. Неврологічний статус не змінився. Ускладнень не було. Хворого виписано зі стаціонару на другу добу після операції.

Контрольну МРТ головного мозку виконано через 6 міс після операції (**Рис. 12**). Виявлено тотальний регрес ХСДГ, нормальну позицію серединних структур головного мозку. Під час контрольного огляду встановлено, що загальномоозкова симптоматика регресувала.

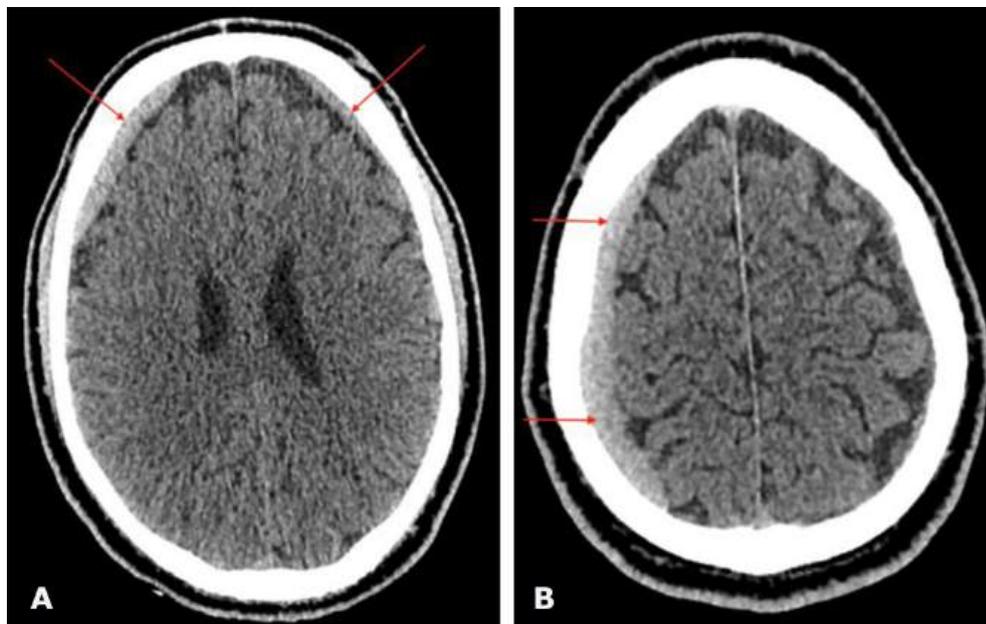


Рис. 1. Доопераційна КТ головного мозку: А, В – аксіальні проєкції демонструють ХСДГ обох лобових ділянок (позначені червоною стрілкою)

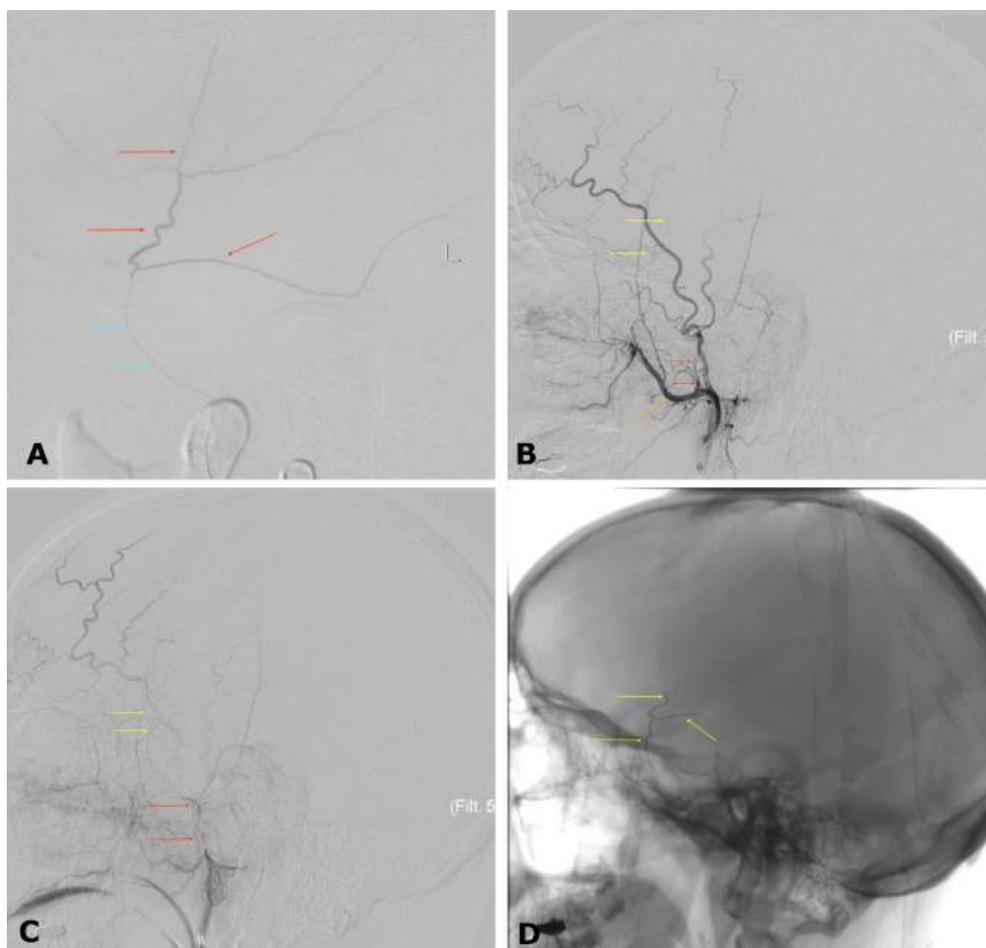


Рис. 2. Інтраопераційна ЦАГ. Басейн лівої зовнішньої сонної артерії:
 А – ліва бічна проєкція, артеріальна фаза, суперселективна ангіограма лівої СМена;
 В – ліва бічна проєкція, артеріальна фаза. Стан після емболізації лівої СМена;
 С – ліва бічна проєкція, пізня артеріальна фаза. Стан після емболізації лівої СМена;
 D – ліва бічна проєкція без цифрової субтракції. Червоною стрілкою позначена ліва СМена та її гілки, помаранчевою – ліва верхня щелепна артерія, жовтою – рентгенконтрастна проєкція лівої СМена після емболізації Onyx™

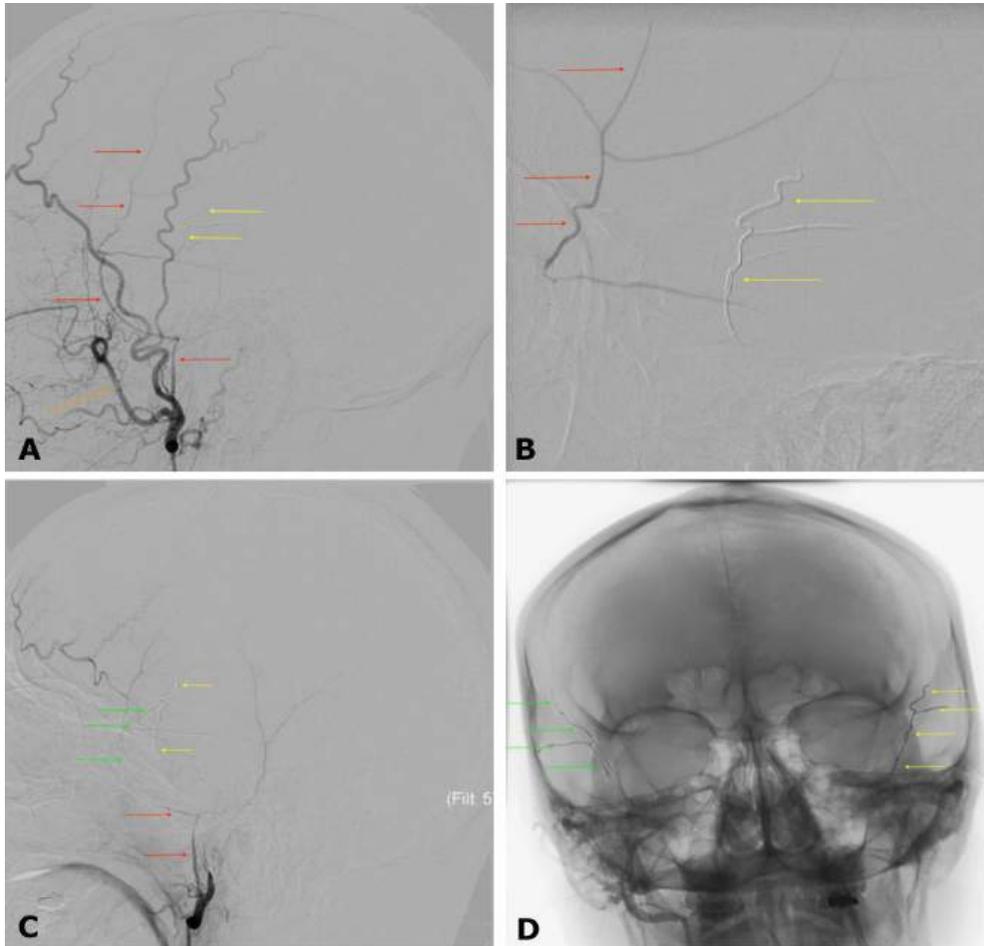


Рис. 3. Інтраопераційна ЦАГ. Басейн правої зовнішньої сонної артерії: А – ліва бічна проєкція, артеріальна фаза; В – ліва бічна проєкція, артеріальна фаза, суперселективна ангиограма правої СМена; С – ліва бічна проєкція, пізня артеріальна фаза. Стан після емболізації правої СМена; D – ангиограма в прямій проєкції без цифрової субтракції, демонструє стан після емболізації обох СМена. Червоною стрілкою позначена права СМена та її гілки, помаранчевою – права верхня щелепна артерія, зеленою – рентгенконтрастна проєкція правої СМена після емболізації Onyx™, жовтою – рентгенконтрастна проєкція лівої СМена після емболізації Onyx™

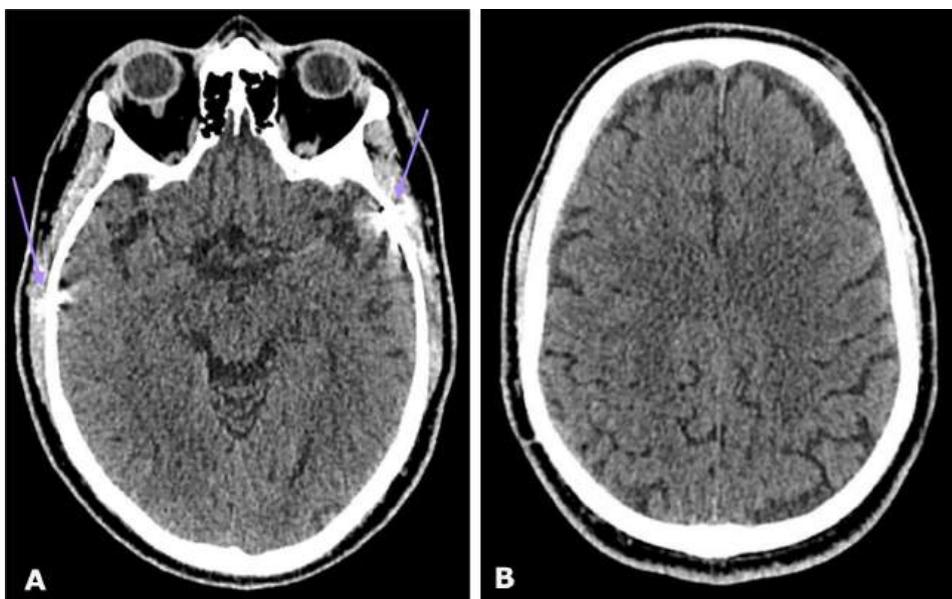


Рис. 4. Післяопераційна КТ головного мозку: А, В – аксіальна проєкція. Фіолетові стрілки вказують на рентгенконтрастну речовину для емболізації Onyx™ у проєкціях лівої та правої СМена

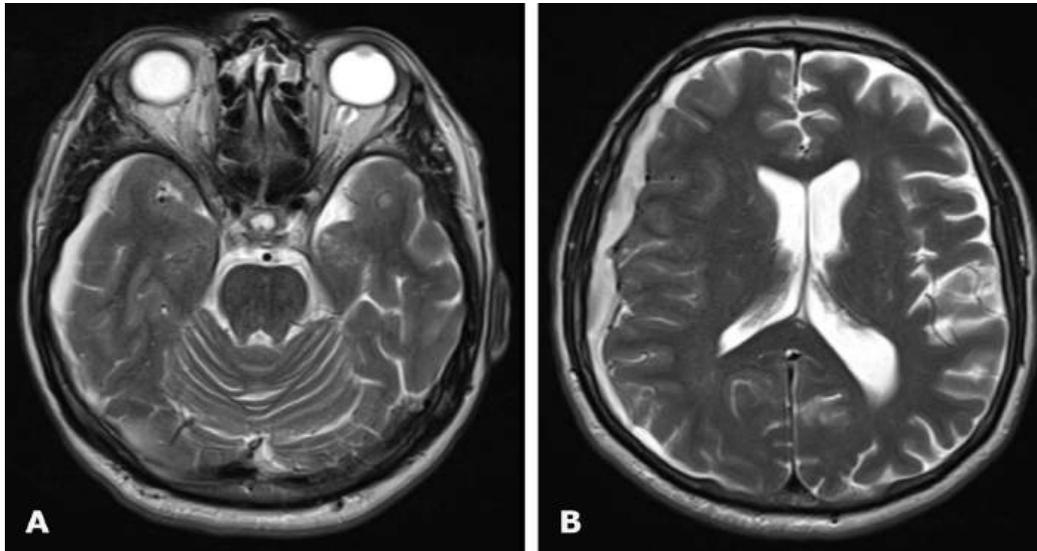


Рис. 5. Доопераційна МРТ головного мозку в режимі T2W: А, В – аксіальна проекція. Півкульна ХСДГ справа

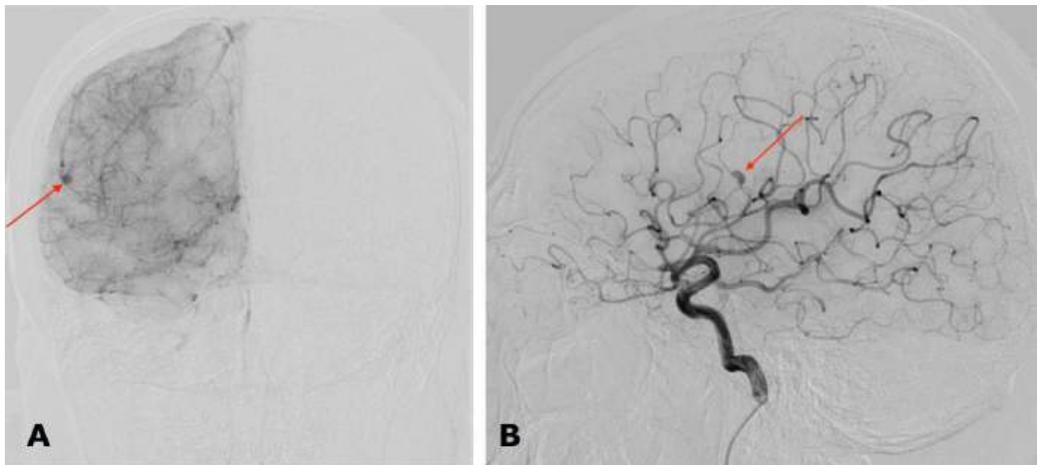


Рис. 6. Доопераційна ЦАГ: Басейн правої внутрішньої сонної артерії: А – фронтальна проекція, пізня артеріальна фаза; В – ліва бічна проекція, артеріальна фаза. Червона стрілка вказує на мікотичну аневризму М₄-сегмента правої середньої мозкової артерії

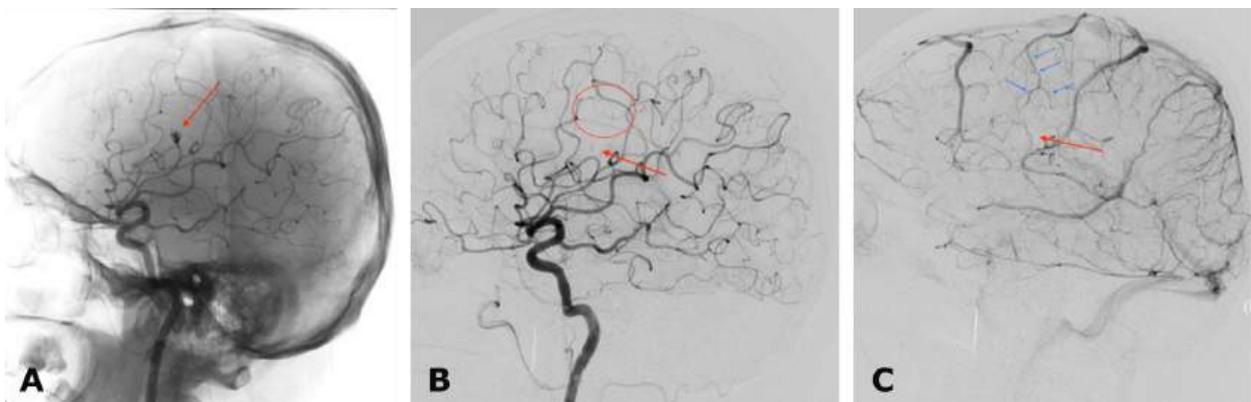


Рис. 7. Післяопераційна ЦАГ. Басейн правої внутрішньої сонної артерії: А – ангиограма у лівій бічній проекції без цифрової субтракції; В – субтракційна ангиограма в лівій бічній проекції, артеріальна фаза; С – субтракційна ангиограма в лівій бічній проекції, пізня артеріальна фаза. Червоною стрілкою позначена виключена аневризма М₄-сегмента правої середньої мозкової артерії, червоним колом – безсудинна ділянка після деконструктивного виключення артеріальної аневризми, синіми стрілками – компенсація артеріального кровотоку в басейні виключеної аневризми.

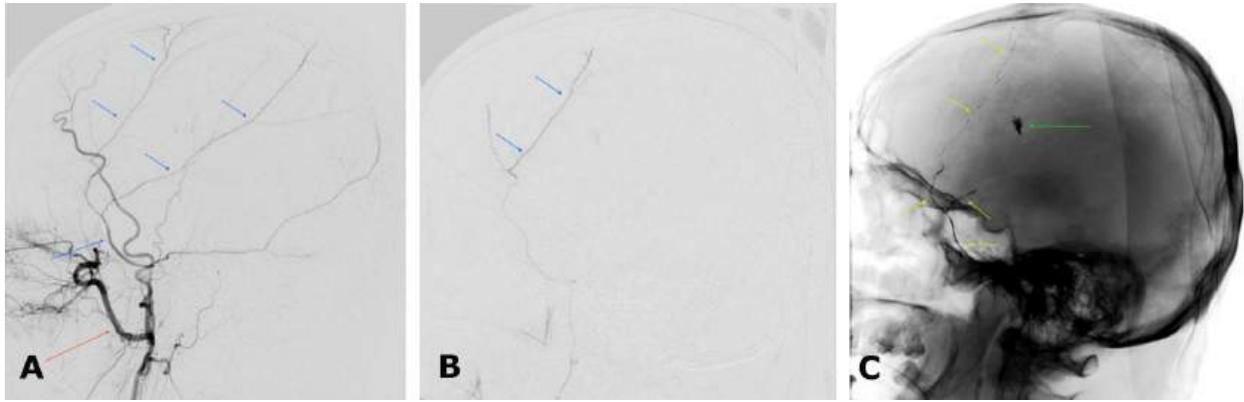


Рис. 8. Післяопераційна ЦАГ. Басейн правої зовнішньої сонної артерії: А – субтракційна ангиограма в лівій бічній проекції; В – суперселективна субтракційна ангиограма СМена в лівій бічній проекції; С – ангиограма в лівій бічній проекції без цифрової субтракції. Червоною стрілкою позначена верхня щелепна артерія, синіми – СМена та її гілки, жовтою – контрастна зона емболізації СМена, зеленою – мікроспіралі в проекції мікотичної аневризми

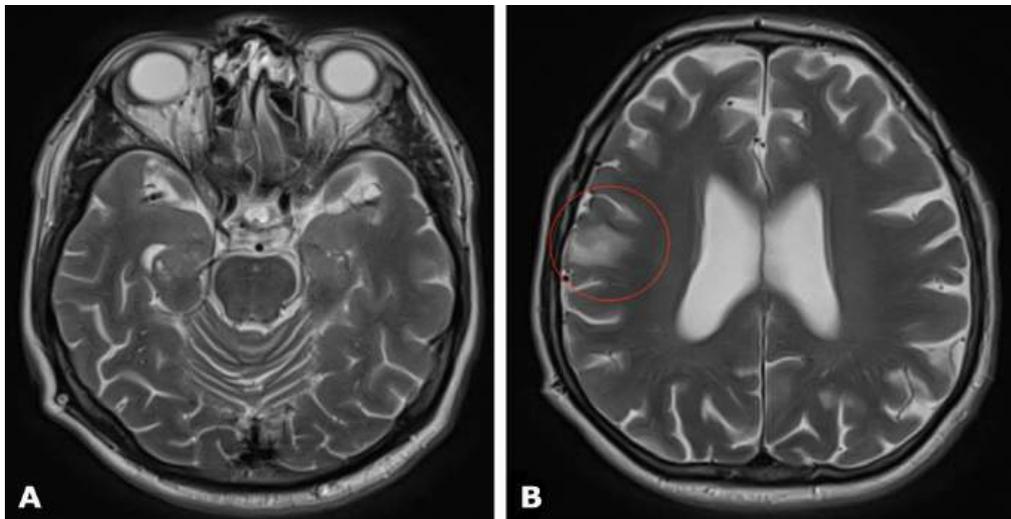


Рис. 9. Післяопераційна (через 3 міс) МРТ головного мозку в режимі Т2W: А, В – аксіальна проекція. Червоне коло вказує на вогнище ішемічного інсульту в правій лобовій частці розміром 19 × 13 мм

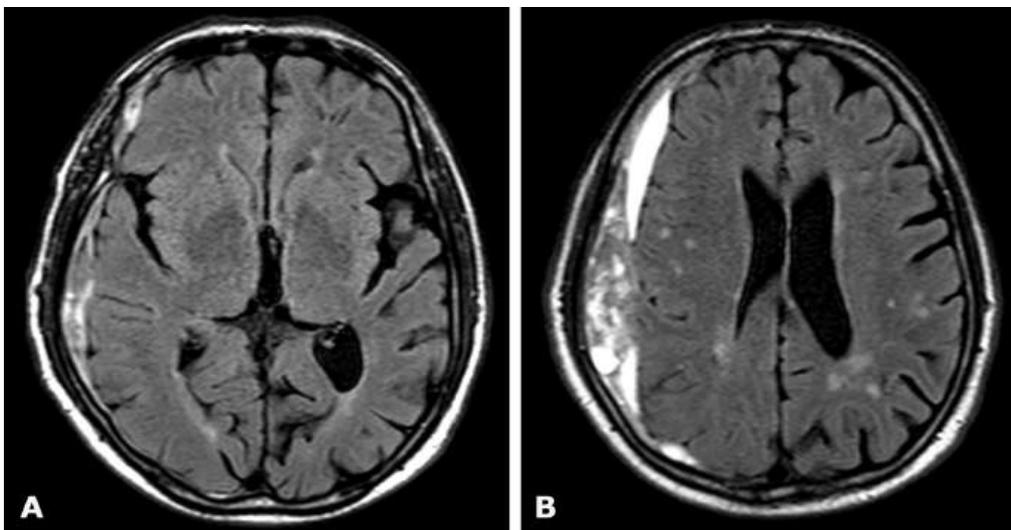


Рис. 10. Доопераційна МРТ головного мозку в режимі Т2 FLAIR: А, В – аксіальні проекції. Півкульна багатокамерна ХСДГ справа

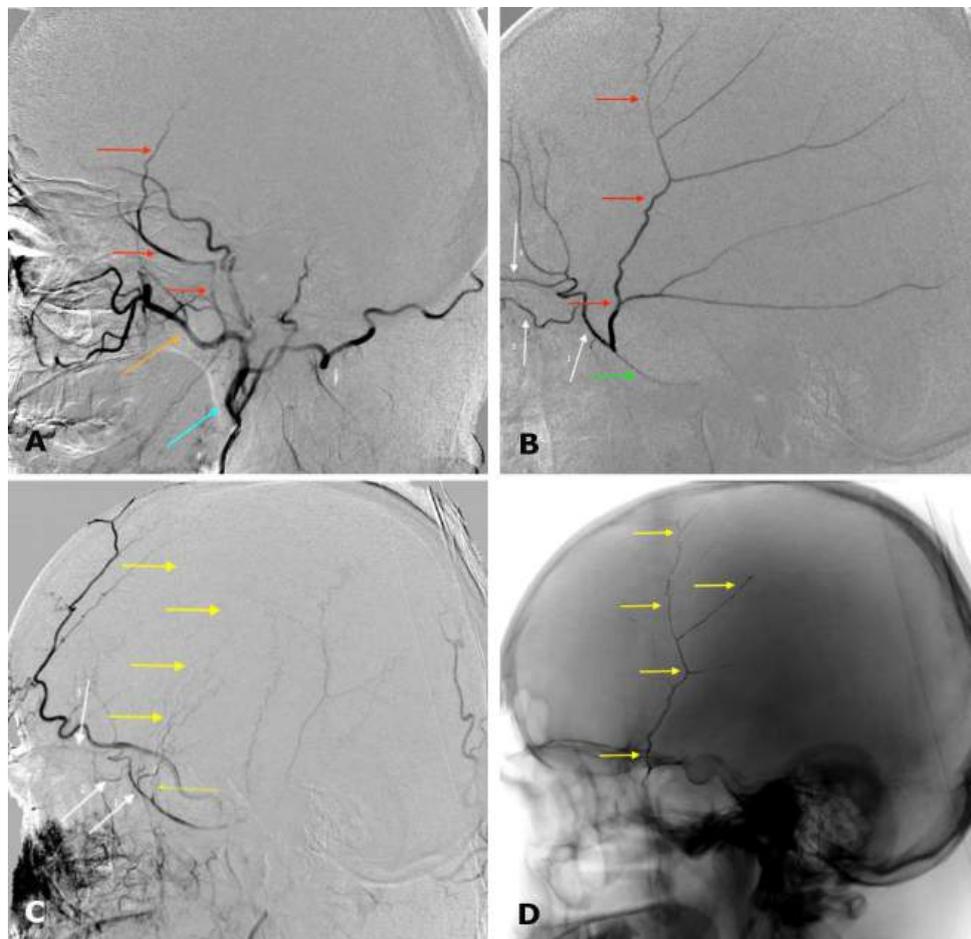


Рис. 11. Інтраопераційна ЦАГ. Басейн правої зовнішньої сонної артерії: А – ліва бічна проекція, артеріальна фаза; В – ліва бічна проекція, артеріальна фаза, суперселективна ангіограма правої СМена; С – ліва бічна проекція, артеріальна фаза. Стан після емболізації лівої СМена; D – ангіограма в лівій бічній проекції без цифрової субтракції. Червоною стрілкою позначена права СМена та її гілки, помаранчевою – права верхня щелепна артерія, блакитною – права зовнішня сонна артерія, зеленою – мікрокатетер, позиціонований у правій СМена, жовтою – рентгенконтрастна проекція правої СМена після емболізації Опух™, білими – небезпечні анастомотичні гілки СМена: 1 – медіальна; 2 – сфеноїдальна; 3 – *ramus meningolacrimalis*

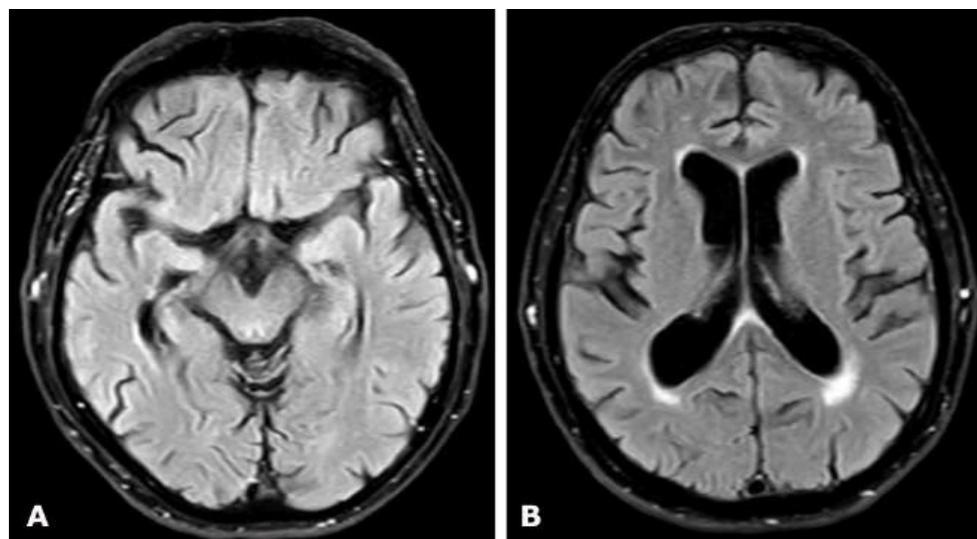


Рис. 12. Післяопераційна МРТ головного мозку в режимі T2 FLAIR: А, В – аксіальні проекції демонструють відсутність ХСДГ справа

Клінічний випадок №4

Чоловік, 74 роки, доставлений до приймально-діагностичного відділення Дніпропетровської обласної клінічної лікарні імені І.І. Мечникова бригадою швидкої медичної допомоги із пригніченням свідомості до глибокого приглушення (12 балів за шкалою ком Глазго), грубим правобічним геміпарезом (2 бали), елементами сенсо-моторної афазії. Відомо, що була побутова травма голови 01.05.2024 р. (за 41 день до операції).

За даними КТ головного мозку виявлена півкульна багатокамерна ХСДГ зліва (товщина/довжина/висота – 17/145/104 мм), зміщення серединних структур на 8 мм вправо (**Рис. 13**).

З огляду на дані КТ головного мозку й тяжкість стану хворого за життєвими показаннями виконано операцію: кістково-пластичну трепанацію черепа в лівій тім'яній ділянці, видалення багатокамерної ХСДГ

зліва, приливно-відливне дренивання субдурального простору зліва (11.06.2024 р.) (**Рис. 14**).

З урахуванням супутньої патології (фібриляція передсердь), з приводу якої пацієнт отримував антикоагулянтну терапію, для запобігання рецидиву ХСДГ виконано рентгеноендоваскулярну емболізацію лівої СМена (11.06.2024 р.) (**Рис. 15**).

Післяопераційний період без особливостей із поступовою позитивною динамікою неврологічного статусу. Ускладнень не було. Хворого виписано зі стаціонару на 10-ту добу після операції.

З огляду на стабільність стану хворого контрольну МРТ головного мозку виконано через 6 міс після операції (**Рис. 16**). Виявлено тотальний регрес ХСДГ зліва, а отже, відсутність рецидиву, нормальну позицію серединних структур головного мозку. Під час контрольного огляду пацієнт був у задовільному стані без вогнищового неврологічного дефіциту.

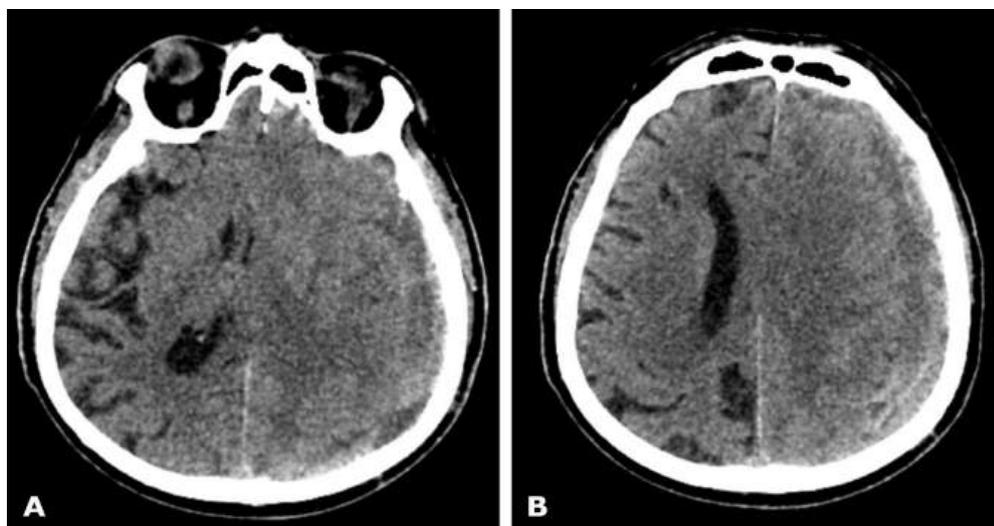


Рис. 13. Доопераційна КТ головного мозку: А, В – аксіальні проєкції демонструють півкульну багатокамерну ХСДГ зліва із виразним стисненням і набряком лівої півкулі головного мозку

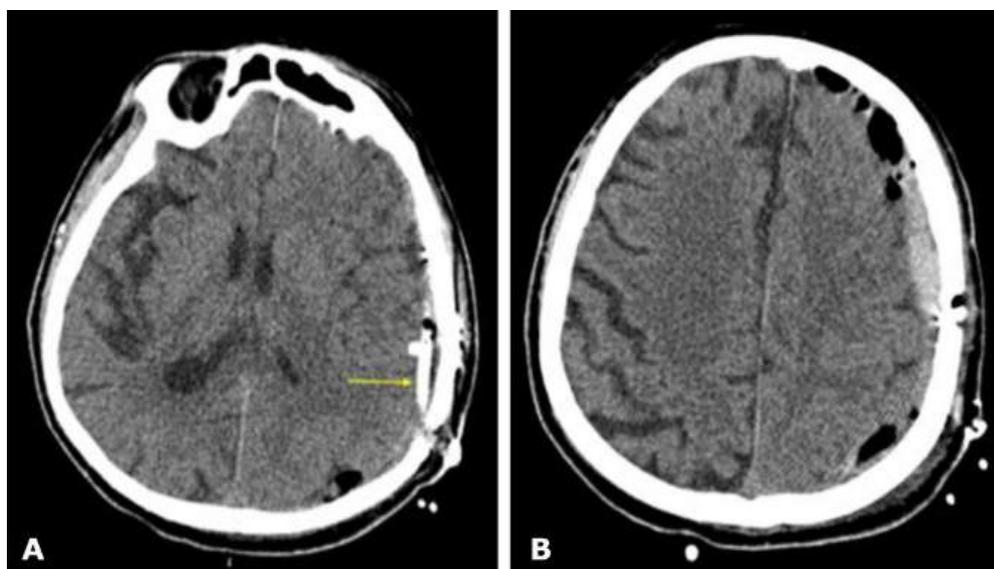


Рис. 14. Контрольна КТ у 1-шу добу після операцій: А, В – аксіальні проєкції. Жовта стрілка вказує на рентгеноконтрастні дренажі приливно-відливної системи

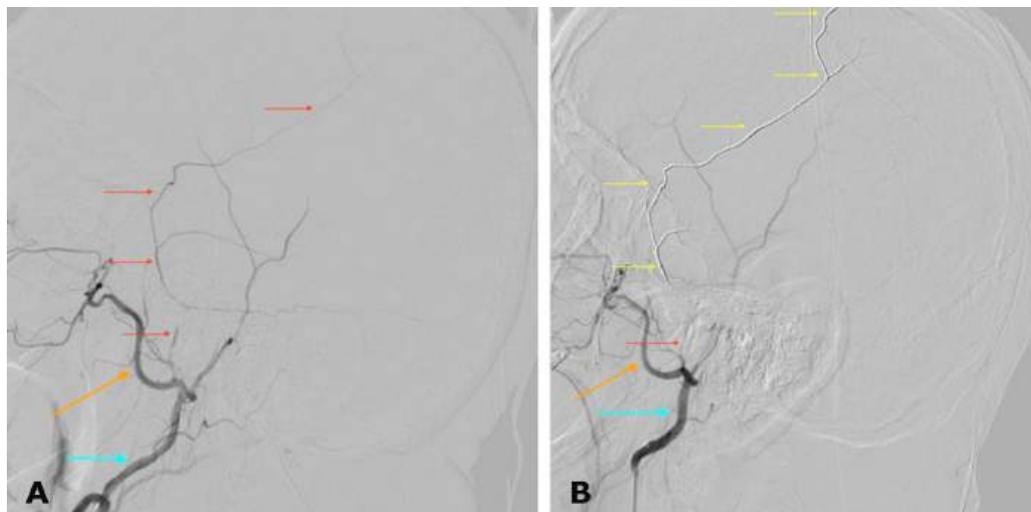


Рис. 15. Інтраопераційна ЦАГ. Басейн лівої зовнішньої сонної артерії: А – ліва бічна проекція, артеріальна фаза до емболізації СМена; В – ліва бічна проекція, артеріальна фаза, після емболізації СМена. Червоною стрілкою позначена ліва СМена та її гілки, помаранчевою – ліва верхня щелепна артерія, блакитною – ліва зовнішня сонна артерія, жовтою – рентгенконтрастна проекція лівої СМена після емболізації Онух™

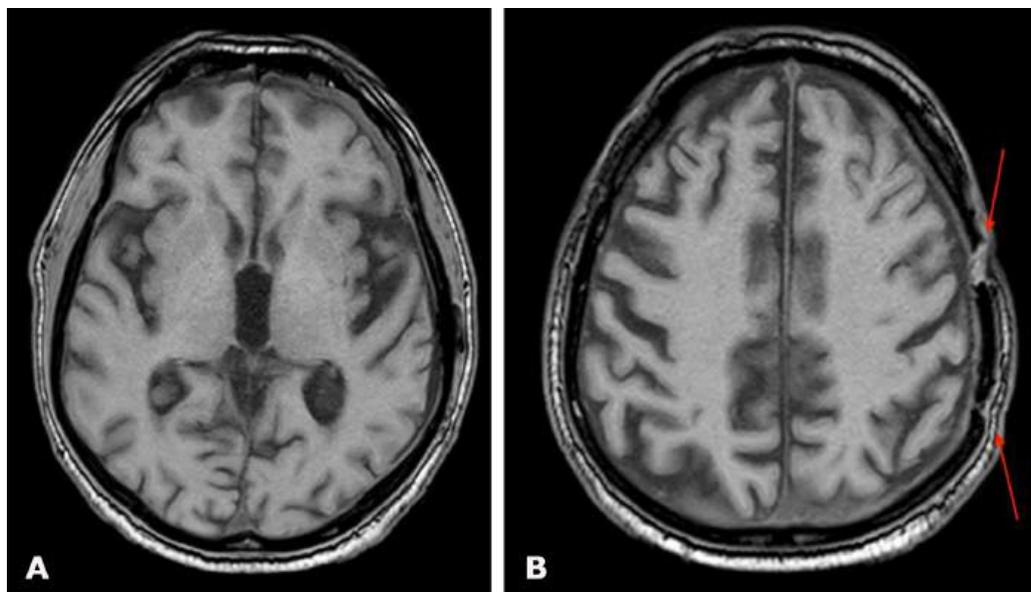


Рис. 16. Післяопераційна МРТ головного мозку в режимі T1W: А, В – аксіальні проекції демонструють відсутність ХСДГ зліва. Червона стрілка вказує на сліди від попередньої трепанації

Обговорення

Чітких даних щодо частоти використання або переваг трансрадіального чи трансфеморального доступу при емболізації СМена в науковій літературі немає. Деякі автори [5, 12] повідомляють, що в більшості випадків використовують трансфеморальний доступ, оскільки його вважають технічно зручним і традиційно застосовують при нейроендоваскулярних втручаннях. У нашому дослідженні в усіх пацієнтів використано лише трансрадіальний доступ, який продемонстрував високу безпечність, особливо в пацієнтів похилого віку або осіб із підвищеним ризиком геморагічних ускладнень. Цей підхід дав змогу зменшити інтраопераційні ризики, а також

суттєво скоротити термін госпіталізації. Середня тривалість перебування в стаціонарі становила $(5,1 \pm 2,6)$ доби.

У більшості досліджень [5, 13–15] основним емболізатом були полівінілові частинки (150–250 мкм). Це пояснюється тим, що їхня вартість значно нижча, ніж Онух™. У деяких країнах Онух™ взагалі відсутній. Окрім цього, полівініловий емболізат має простішу техніку використання та не потребує застосування мікрокатетера, сумісного із диметилсульфоксидом. Тому в багатьох нейроендоваскулярних центрах використання полівінілового матеріалу для емболізації – золотий стандарт. Однак у сучасніших публікаціях [16–18] спостерігається збільшення

використання саме ОпухTM, особливо в складних випадках або за наявності високого ризику. В Ендоваскулярному центрі Дніпропетровської обласної клінічної лікарні імені І.І. Мечнікова у 18 (94,7%) пацієнтів ми використали ОпухTM при емболізації СМена, оскільки завдяки рідкій формі й повільній полімеризації він може проникати в дрібні та патологічно змінені гілки, що живлять мембрану гематоми, забезпечуючи радикальну облітерацію. Особливо це актуально при рецидивних та/або багатокамерних ХСДГ. На відміну від полівінілових частинок, які можуть мігрувати або частково вимитися з часом, полімерний емболізат створює монолітний зліпок, який тривало зберігає оклюзію в дистальних гілках менінгеальних артерій, що зменшує вірогідність заповнення дистального артеріального русла через колатералі з іншими менінгеальними артеріями, а отже, збільшує ефективність блокування судин зовнішньої пластинки капсули ХСДГ. Окрім цього, ОпухTM має рентгенконтрастний склад (тангстен або tantalum powder), що дає змогу в режимі реального часу контролювати його введення, а також напрямок проникнення або рефлюксу, що особливо важливо для запобігання інтраопераційним ризикам оклюзії «небезпечних» анастомозів із басейном внутрішньої сонної та очної артерії, а також джерела кровопостачання мієлінової оболонки черепних нервів (**Рис. 11, В, С, Рис. 17**).

Середня менінгеальна артерія має численні анастомози з гілками внутрішньої сонної, очної, потиличної та висхідної глоткової артерій. Знання топографії та варіабельності цих анастомозів має ключове значення для безпечного проведення емболізації, зменшення ризику неврологічних ускладнень і підвищення ефективності втручань при ХСДГ.

Окрім анатомічно зумовлених небезпечних анастомозів, слід урахувати можливі ускладнення, пов'язані з технікою доступу й вибором матеріалу для емболізації. Використання трансрадіального доступу продемонструвало більшу безпеку порівняно з трансфеморальним завдяки зниженню ризику місцевих ускладнень, зокрема пульсуючих гематом і псевдоаневризм у місці пункції, а також уникненню найнебезпечнішого ускладнення – позачеревної гематоми. Застосування м'яких нейропровідників і мікрокатетерів малого діаметра мінімізує ризик перфорації артеріальної стінки, запобігаючи небажаним внутрішньочерепним крововиливам/гематомам. Використання полівінілових частинок потребує мікрокатетерів більшого діаметра, що підвищує ймовірність механічного ушкодження судини під час роботи в дистальних сегментах. При роботі з проксимальних сегментів зростає небезпека нецільової емболізації дрібними полівініловими частинками, тоді як застосування більших за діаметром частинок знижує ефективність втручання через недостатню пенетрацію в дистальні відділи судинного русла.

Таким чином, українська серія пацієнтів не лише підтверджує ефективність використання трансрадіального доступу та ОпухTM, а й доповнює сучасні міжнародні дані щодо вибору оптимального емболізаційного агента.

Отримані нами результати узгоджуються з даними сучасних рандомізованих досліджень (EMBOLISE, MAGIC-MT, STEM), які підтверджують значне зниження

ризиків невдач лікування при емболізації СМена [4, 7, 8]. Наша робота є унікальною, оскільки демонструє можливість широкого застосування емболізації СМена в умовах обмежених ресурсів, безпечність трансрадіального доступу й використання ОпухTM як основного емболізату.

Представлене дослідження є одним із перших в Україні, що системно описує результати застосування ендоваскулярної емболізації СМена при ХСДГ. Перша операція була виконана 24 березня 2022 р. Досвід Дніпропетровської обласної клінічної лікарні імені І.І. Мечнікова доводить, що впровадження сучасних малоінвазивних методик, які підвищують ефективність лікування та зменшують частоту рецидивів, можливе навіть в умовах війни.

Обов'язкова доопераційна селективна субтракційна дигітальна ангіографія всіх церебральних басейнів дала змогу виявити супутні патології, а в окремих випадках – причину ХСДГ, що впливало на подальшу тактику хірургічного втручання.

В обох пацієнтів зі спонтанними субдуральними гематомами, в яких виявлено мікотичні аневризми коркових (M4) сегментів середніх мозкових артерій, хірургічне втручання передбачало одномоментну емболізацію мікотичної аневризми першим етапом, емболізацію СМена – другим. В інших трьох випадках за допомогою доопераційної ЦАГ у пацієнтів похилого віку були виявлені грубі гемодинамічно значущі стенози внутрішніх сонних артерій. Хірургічне лікування таких хворих передбачало два етапи. Першим етапом проводили емболізацію СМена, через 1–3 міс після стабілізації стану в разі позитивної нейровізуалізаційної картини виконували рентгенендоваскулярну ангіопластику шляхом імплантації стенту з призначенням подвійної антиагрегантної терапії.

У сучасних літературних джерелах [5, 20] повідомляють про високу ефективність емболізації СМена як самостійного методу в пацієнтів із порушенням коагуляції або на тлі антикоагулянтної/антиагрегантної терапії. У нашому дослідженні не було хворих із коагулопатією, але нами проліковано 5 пацієнтів із відхиленнями показників коагуляції (міжнародне нормалізоване відношення >1,2, протромбіновий індекс <90%) на тлі антикоагулянтної/антиагрегантної терапії. У 2 із цих пацієнтів виконано лише емболізацію СМена.

У 13 пацієнтів, яким виконано лише емболізацію, СМена відповідали таким вимогам: товщина гематоми <15 мм, зміщення серединних структур <5 мм і без виразної неврологічної симптоматики. Лише один пацієнт із багатокамерною ХСДГ мав товщину гематоми 27 мм та зміщенням серединних структур головного мозку 5 мм з урахуванням стабільного клінічного перебігу захворювання (**клінічний випадок №3**).

У групу первинної емболізації СМена із подальшим дренажуванням потрапили троє пацієнтів із групи підвищеного ризику (ХСДГ на тлі прийому антикоагулянтної/антиагрегантної терапії, товщина гематоми ≥15 мм, зміщення серединних структур головного мозку ≥5 мм), але з відносно стабільною неврологічною картиною. Спочатку виконували емболізацію СМена не лише для зниження ризику рецидиву, а й для знекровлення капсули гематоми та запобігання інтраопераційним і післяопераційним геморагічним ускладненням під час другого етапу хірургічного лікування.

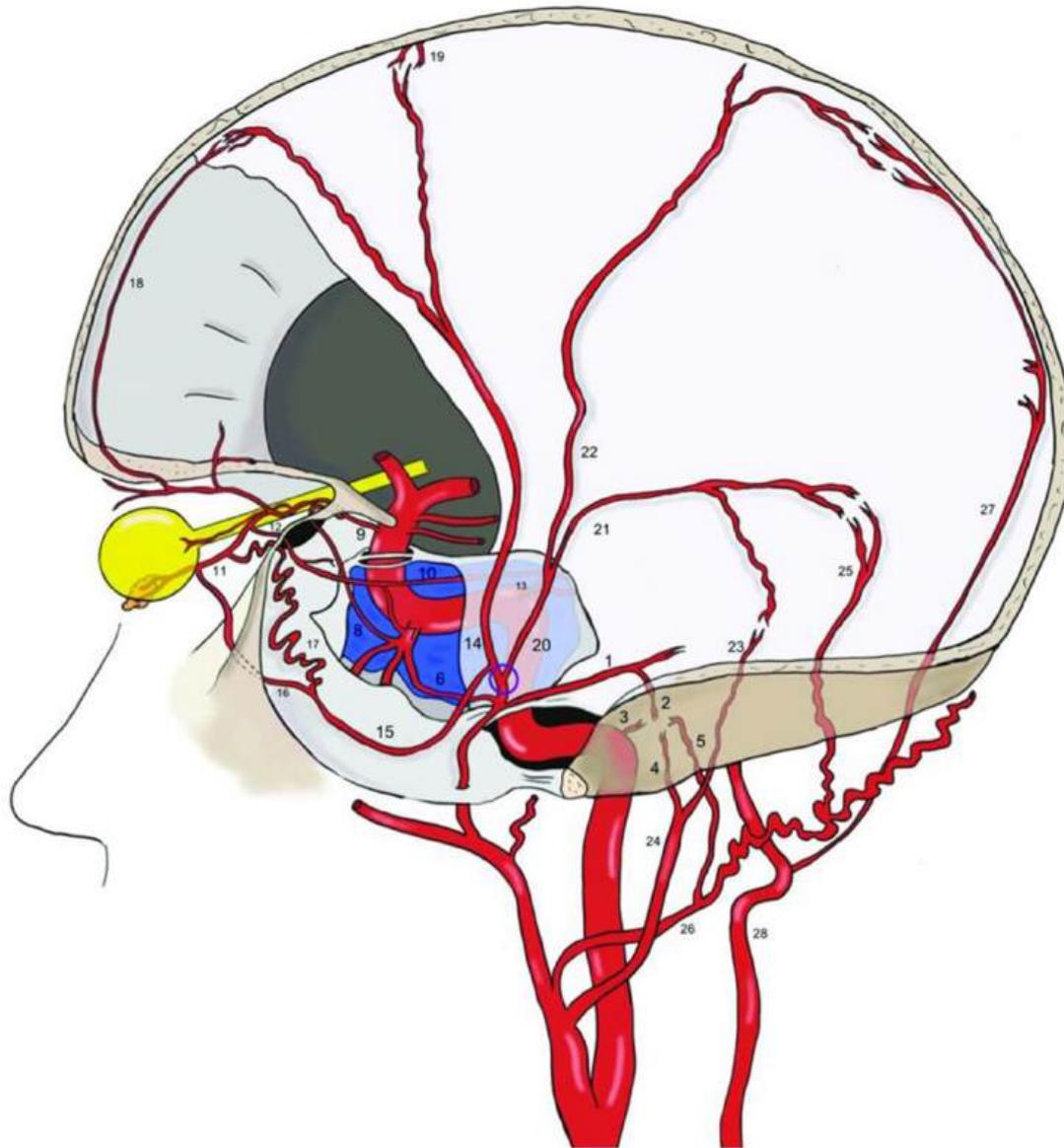


Рис. 17. Схема анастомозів СМена [19]. До її біфуркації (позначено фіолетовим колом) петрозальна гілка (1), від якої відходить верхня барабанна артерія (2), анастомозує в середньому вусі з каротикотимпанічною артерією (3, з внутрішньої сонної артерії), а також з нижньою барабанною артерією (4, з висхідної глоткової артерії) та задньою барабанною артерією (5, з потиличної артерії). Кавернозна гілка СМена (6) на іншому боці анастомозує з інфралатеральним стовбуром (7) і менінго-гіпофізарним стовбуром (13). Інфралатеральний стовбур з'єднаний з очною артерією (9) через її глибоку зворотню гілку (8). Інфралатеральний стовбур, СМена й очна артерія також зв'язані між собою через крайову наметову артерію (10), походження якої може варіювати: від слъзової артерії (11), через поверхневу зворотню гілку очної артерії (12), або від менінго-гіпофізарного стовбура (13). Після біфуркації СМена в ділянці птеріона її фронтальна гілка (14) віддає медіальну гілку (15), яка може розгалужуватися внутрішньочерепно на *ramus meningolacrimalis* (16) та медіальну клиноподібну артерію (17). Обидві ці гілки з'єднуються зі слъзовою артерією, хоча менінго-лакримальна артерія відходить дистальніше за клиноподібну. Анастомози з очною артерією та інфралатеральним стовбуром є найнебезпечнішими під час транскатетерної емболізації СМена через ризик емболізації цих артерій. Фронтальна гілка СМена досягає конвексимальної поверхні, слідуючи за вінцевим швом, та анастомозує з передньою серпоподібною артерією (18, гілка очної артерії – передня етмоїдальна артерія) і з гілками контралатеральної СМена (19). Задня гілка СМена (20) розділяється на петрозально-сквамозну гілку (21) та парієтально-потиличну гілку (22). Перша анастомозує з яремною гілкою (23) висхідної глоткової артерії (24) та соскоподібною гілкою (25) потиличної артерії (26). Друга пов'язана з задньою менінгеальною артерією (27), що походить від хребтової артерії (28) у прикордонних зонах

У трьох пацієнтів першим етапом за життєвими показаннями проведено видалення ХСДГ. Двоє з них мали великі багатокамерні гематоми (товщина >15 мм) зі зміщенням серединних структур головного мозку >5 мм та виразною вогнищевою неврологічною симптоматикою (**клінічний випадок №4**). Третій пацієнт — військовик із наслідками мінно-вибухової травми 2015 р. та рецидивною ХСДГ, яку двічі видаляли (у 2015 і 2022 рр.). Під час останнього рецидиву в 2024 р., після хірургічного видалення гематоми виконано емболізацію СМена (23.05.2024 р.). Спостереження впродовж року рецидиву не виявило.

Суттєвими недоліками нашого дослідження є невелика вибірка (19 пацієнтів), що обмежує статистичну потужність результатів, одноцентровий і проспективний дизайн дослідження, що потенційно може знижувати рівень доказовості та ускладнює можливість узагальнення отриманих даних. Ще одним обмеженням є відсутність контрольної групи для порівняння ефективності емболізації СМена із традиційними методами хірургічного лікування. Це не дає змоги зробити остаточні висновки щодо переваг зазначеної тактики порівняно з «класичними» методами.

Термін спостереження становив до 6 міс, що, хоча й відповідає сучасним протоколам контролю [3], але не виключає ймовірність пізніх рецидивів. Крім того, ми застосовували переважно один вид емболізату — Опух™18, що не дає змоги провести порівняння з полівініловими частинками, які є стандартом у багатьох міжнародних серіях [13, 14].

Економічний аспект використання Опух™ у нашому дослідженні не розкрито достатньою мірою. Це є важливим чинником для системи охорони здоров'я, особливо в країнах з обмеженими ресурсами, де полівініловий емболізат часто застосовують як доступну альтернативу.

Отримані результати підтверджують ефективність і безпеку емболізації СМена, але потребують перевірки. Необхідно провести проспективні багаточентрові дослідження з більшою вибіркою пацієнтів для підтвердження наших результатів та їхньої екстраполяції на різні клінічні групи.

Другим напрямом є порівняння використання Опух™ (полімерного емболізату) і полівінілових частинок як емболізаційних агентів з погляду ефективності, профілю ускладнень й економічної доцільності, що дасть змогу сформулювати оптимальні клінічні рекомендації.

Третім важливим напрямом є дослідження віддалених результатів (>12 міс), зокрема рецидивів, когнітивних наслідків та якості життя пацієнтів після лікування.

Сучасні дані свідчать, що доопераційна емболізація СМена може знижувати ризик повторних втручань, інтраопераційних і післяопераційних ускладнень, особливо в пацієнтів із високим ризиком кровотеч. Проте більшість результатів ґрунтуються на ретроспективних когортних дослідженнях, тому необхідно провести рандомізовані контрольовані випробування для порівняння доопераційної та післяопераційної емболізації з уніфікованими кінцевими точками (рецидив, повторне втручання, якість життя та когнітивні наслідки) [8, 21].

Важливим викликом залишається відсутність єдиних стандартів відбору пацієнтів. Міждисциплінарний консенсус ARISE I запропонував створення реєстрів

та уніфікацію core-outcomes для досліджень. У майбутніх роботах слід окремо аналізувати пацієнтів із первинними та рецидивними ХСДГ, а також виділяти групи високого ризику, зокрема хворих, які отримують антикоагулянтну чи антиагрегантну терапію, або пацієнтів із виразною фрагільністю [9, 22]. Окремої уваги потребує тактика антитромботичної терапії. Хворі, які отримують антикоагулянтну чи антиагрегантну терапію, належать до складної категорії, для якої баланс між ризиком кровотеч і тромбоемболічних ускладнень є критичним. Наявні дані свідчать, що емболізація СМена дає змогу швидше і безпечніше відновлювати антитромботичну терапію, але необхідно провести проспективні дослідження, які підтвердять безпеку раннього відновлення антикоагулянтної/антиагрегантної терапії [8, 23].

У фокусі сучасних досліджень мають бути пацієнт-орієнтовані показники. Йдеться не лише про рецидиви чи повторні операції, а й про відновлення автономності, когнітивні функції, повторні госпіталізації та вплив на якість життя. Такі метрики вже інтегруються в найновіші мультидисциплінарні настанови, що відображає глобальний тренд у сучасній нейрохірургії [8, 24].

Подальший розвиток цього напрямку в Україні має передбачати створення національних клінічних протоколів, адаптованих до умов вітчизняної системи охорони здоров'я. Окремим напрямом досліджень може стати аналіз ролі емболізації СМена у лікуванні нейротравми, отриманої внаслідок військових дій, що є актуальним у сучасних умовах.

Отримані нами результати узгоджуються з даними сучасних літературних джерел, підтверджуючи, що емболізацію СМена можна розглядати як ефективну альтернативу або доповнення до традиційного хірургічного лікування. Ця тема є актуальною в сучасній нейрохірургії, оскільки оптимальну тактику лікування ХСДГ, зокрема роль емболізації СМена, продовжують активно обговорювати. Незважаючи на обнадійливі результати, отримані в нашому дослідженні, для остаточних висновків потрібне підтвердження на більшій вибірці пацієнтів. Подальше вивчення цього питання дасть змогу сформувати чіткі клінічні алгоритми й підвищити ефективність лікування. Ми активно працюємо в цьому напрямі та плануємо продовжити дослідження для розширення наукової доказової бази.

Автори висловлюють вдячність професору Росо Армонда за багаторічну підтримку та надану гуманітарну допомогу, зокрема у вигляді мікроінструментів, емболізаційного матеріалу Опух™ мікроспіралей, що зробило можливим впровадження сучасних методик ендovasкулярного лікування в Дніпропетровській обласній клінічній лікарні імені І.І. Мечникова. Завдяки цій допомозі вдалося забезпечити лікування як військовиків із бойовими пораненнями, так і цивільних пацієнтів із тяжкими нейрохірургічними патологіями.

Особливу подяку автори висловлюють організації Razom for Ukraine, яка надала значну допомогу для забезпечення лікарні необхідними витратними матеріалами для проведення високотехнологічних втручань. Співпраця із зарубіжними колегами та міжнародними благодійними організаціями є надзвичайно важливим чинником для розвитку нейрохірургії **в Україні, особливо в умовах повномасштабної війни.**

Ми переконані, що такі ініціативи сприяють не лише розвитку клінічної практики, а й інтеграції української нейрохірургії у світову медичну спільноту, створюючи основу для подальших наукових досліджень та впровадження інноваційних методів лікування.

Висновки

1. Емболізація СМена є ефективним і безпечним методом лікування ХСДГ: позитивна динаміка відзначена в усіх пацієнтів, повне розсмоктування гематоми — у 89,5% через 6 міс. У 19 пацієнтів не зафіксовано інтраопераційних чи післяопераційних ускладнень.

2. Використання трансрадіального доступу продемонструвало високу безпечність, особливо в пацієнтів похилого віку, та сприяло зменшенню терміну госпіталізації. Пацієнти на антиагрегантній/антикоагулянтній терапії також були успішно проліковані без підвищення ризику рецидивів чи ускладнень.

3. Речовина для емболізації Опух™18 показала переваги порівняно з полівініловими частинками завдяки глибшій penetрації та тривалій оклюзії патологічних судин.

4. Комбіновані підходи (емболізація СМена + дренажування або навпаки) були ефективні у складних випадках (товщина гематоми >15 мм, багатокамерні гематоми, зміщення середніх структур >5 мм). Емболізацію можна застосовувати як самостійний метод у випадках невеликих гематом без мас-ефекту та виразної неврологічної симптоматики.

5. Доопераційна селективна субтракційна дигітальна ЦАГ дала змогу виявити супутню патологію (мікотичні аневризми, стенози магістральних артерій), що впливало на тактику лікування.

6. Описані клінічні випадки (бойова травма, мікотична аневризма, рецидивні ХСДГ) підтверджують універсальність і гнучкість методики, а отримані результати узгоджуються із сучасними даними зарубіжних досліджень (Levitt, 2024, Fiorella, 2025, Gajjar, 2025, Papageorgiou, 2025), підтверджуючи світові тенденції.

Розкриття інформації

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Етичне схвалення

Усі процедури, виконані в дослідженнях за участю людей, відповідали етичним стандартам інституційного та національного дослідницького комітету, а також Гельсінській декларації 1964 р. та її пізнішим поправкам або порівнянням етичним стандартам.

Інформована згода

Письмова інформована згода була отримана від кожного пацієнта або члена сім'ї перед операцією.

Фінансування

Дослідження не мало спонсорської підтримки.

Список літератури

- Findlay MC, Holdaway M, Gautam D, Bauer SZ, Gandhoke G, Grandhi R. Cost-minimizing thresholds and recurrence rates in surgical evacuation with adjunctive middle meningeal artery embolization versus evacuation alone. *J Neurosurg.* 2024 Dec 13;142(5):1457-1464. doi: 10.3171/2024.7.JNS24200
- Mureb MC, Kondziolka D, Shapiro M, Raz E, Nossek E, Haynes J, Farkas J, Riina HA, Tanweer O. DynaCT Enhancement of Subdural Membranes After Middle Meningeal Artery Embolization: Insights into Pathophysiology. *World Neurosurg.* 2020 Jul;139:e265-e270. doi: 10.1016/j.wneu.2020.03.188
- Papageorgiou NM, PalaioDIMOU L, Melanis K, Theodorou A, Stefanou MI, Tsalouchidou PE, Vlotinou P, Stavrinou LC, Boviatsis E, Magoufis G, Themistocleous M, Sarraj A, Sharma VK, Goyal N, Tsvigoulis G. Embolization of Middle Meningeal Artery in Patients with Chronic Subdural Hematoma: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized-Controlled Clinical Trials. *J Clin Med.* 2025 Apr 22;14(9):2862. doi: 10.3390/jcm14092862
- Levitt MR, Hirsch JA, Chen M. Middle meningeal artery embolization for chronic subdural hematoma: an effective treatment with a bright future. *J Neurointerv Surg.* 2024 Mar 14;16(4):329-330. doi: 10.1136/jnis-2024-021602
- Rai AT, Link PS, Lakhani DA. Rising tide of middle meningeal artery embolization for chronic subdural hematomas: current volumes and future growth compared with cerebral aneurysm and stroke interventions. *J Neurointerv Surg.* 2025 Feb 25;jnis-2025-023109. doi: 10.1136/jnis-2025-023109
- Davies JM, Knopman J, Mokin M, Hassan AE, Harbaugh RE, Khalessi A, Fiehler J, Gross BA, Grandhi R, Tarpley J, Sivakumar W. Adjunctive middle meningeal artery embolization for subdural hematoma. *New England Journal of Medicine.* 2024 Nov 21;391(20):1890-900. doi: 10.1056/nejmoa2313472
- Liu J, Ni W, Zuo Q, Yang H, Peng Y, Lin Z, Li Z, Wang J, Zhen Y, Luo J, Lin Y, Chen J, Hua X, Lu H, Zhong M, Liu M, Zhang J, Wang Y, Wan J, Li Y, Li T, Mao G, Zhao W, Gao L, Li C, Chen E, Cheng X, Zhang P, Wang Z, Chen L, Zhang Y, Tian B, Shen F, Lei Y, Wu Y, Li Y, Duan G, Xu L, Lv N, Yu J, Xu X, Du Z, Zhang H, Hu J, Li Z, Yuan Q, Zhou Y, Wu G, Zhang L, Gao C, Dai D, Wu X, Zhang Y, Jiang H, Zhao R, Su J, Xu Y, Ospel JM, Majoie CBLM, Goyal M, Li Q, Yang P, Gu Y, Mao Y; MAGIC-MT Investigators. Middle Meningeal Artery Embolization for Nonacute Subdural Hematoma. *N Engl J Med.* 2024 Nov 21;391(20):1901-1912. doi: 10.1056/NEJMoa2401201
- Fiorella D, Monteith SJ, Hanel R, Atchie B, Boo S, McTaggart RA, Zauner A, Tjoumakaris S, Barbier C, Benitez R, Spelle L, Pierot L, Hirsch JA, Froehler M, Arthur AS; STEM Investigators. Embolization of the Middle Meningeal Artery for Chronic Subdural Hematoma. *N Engl J Med.* 2025 Feb 27;392(9):855-864. doi: 10.1056/NEJMoa2409845
- Kan P, Fiorella D, Dabus P, Samaniego EA, Lanzino G, Siddiqui AH, Chen H, Khalessi AA, Pereira VM, Fifi JT, Bain MD, Colby GP, Wakhloo AK, Arthur AS; ARISE I Academic Industry Roundtable. ARISE I Consensus Statement on the Management of Chronic Subdural Hematoma. *Stroke.* 2024 May;55(5):1438-1448. doi: 10.1161/STROKEAHA.123.044129
- Gajjar AA, Naqvi A, Chen JY, Custozzo A, Boulos AS, Dalfino JC, Field NC, Paul AR. 2024 middle meningeal artery embolization trials: A comprehensive review of past, recent, and ongoing trials. *Interv Neuroradiol.* 2025 Apr 4:15910199251329970. doi: 10.1177/15910199251329970
- Sila D, Casnati FL, Vojtková M, Kirsch P, Rath S, Charvát F. Middle Meningeal Artery Embolization versus Surgery in Patients with Chronic Subdural Hematoma-No More Fence Sitting? *Neurol Int.* 2023 Dec 6;15(4):1480-1488. doi: 10.3390/neurolint15040096
- Wang Y, Zhou Y, Cui G, Xiong H, Wang DL. Transradial versus transfemoral access for posterior circulation endovascular intervention: A systematic review and meta-analysis. *Clin Neurol Neurosurg.* 2023 Nov;234:108006. doi: 10.1016/j.clineuro.2023.108006
- Ban SP, Hwang G, Byoun HS, Kim T, Lee SU, Bang JS, Han JH, Kim CY, Kwon OK, Oh CW. Middle Meningeal Artery Embolization for Chronic Subdural Hematoma. *Radiology.* 2018 Mar;286(3):992-999. doi: 10.1148/radiol.2017170053
- Mishra R, Deora H, Florez-Perdomo WA, Moscote-Salazar LR, Garcia-Ballestas E, Rahman MM, Shrivastava A, Raj S, Chavda V, Montemurro N, Agrawal A. Clinical and Radiological Characteristics for Recurrence of Chronic

- Subdural Hematoma: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Neurol Int.* 2022 Aug 26;14(3):683-695. doi: 10.3390/neurolint14030057
15. Abdollahifard S, Farrokhi A, Yousefi O, Valibeygi A, Azami P, Mowla A. Particle embolic agents for embolization of middle meningeal artery in the treatment of chronic subdural hematoma: A systematic review and meta-analysis. *Interv Neuroradiol.* 2024 Feb;30(1):94-104. doi: 10.1177/15910199221125977
 16. Ellens NR, Schartz D, Kohli G, Rahmani R, Akkipeddi SMK, Mattingly TK, Bhalla T, Bender MT. Safety and efficacy comparison of embolic agents for middle meningeal artery embolization for chronic subdural hematoma. *J Cerebrovasc Endovasc Neurosurg.* 2024 Mar;26(1):11-22. doi: 10.7461/jcen.2023.E2023.04.002
 17. Sioutas GS, Vivanco-Suarez J, Shekhtman O, Matache IM, Salem MM, Burkhardt JK, Srinivasan VM, Jankowitz BT. Liquid embolic agents for middle meningeal artery embolization in chronic subdural hematoma: Institutional experience with systematic review and meta-analysis. *Interv Neuroradiol.* 2023 Jun 15;15910199231183132. doi: 10.1177/15910199231183132
 18. Shehabeldin M, Amllay A, Jabre R, Chen CJ, Schunemann V, Herial NA, Gooch MR, Mackenzie L, Choe H, Tjoumakaris S, Rosenwasser RH, Jabbour P, Kozak O. Onyx Versus Particles for Middle Meningeal Artery Embolization in Chronic Subdural Hematoma. *Neurosurgery.* 2023 May 1;92(5):979-985. doi: 10.1227/neu.0000000000002307
 19. Bonasia S, Smajda S, Ciccio G, Robert T. Middle Meningeal Artery: Anatomy and Variations. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2020 Oct;41(10):1777-1785. doi: 10.3174/ajnr.A6739
 20. Hamou HA, Clusmann H, Schulz JB, Wiesmann M, Altiok E, Höllig A. Chronic Subdural Hematoma. *Dtsch Arztebl Int.* 2022 Mar 25;119(12):208-213. doi: 10.3238/arztebl.m2022.0144
 21. Sioutas GS, Salem MM, Kuybu O, Salih M, Khalife J, Carroll K, Duckworth EA, Vaishnav D, Essibayi MA, Hoang AN, Baker CM, Mendez Ruiz AA, Abecassis Z, Salah WK, Ruiz Rodriguez JF, Charcos I, Cortez GM, Narayanan S, Haim O, Tanweer O, Hanel R, Kan P, Tonetti DA, Nogueira RG, Jovin TG, Altschul DJ, Lang MJ, Srinivasan VM, Jankowitz BT, Thomas AJ, Levitt MR, Ogilvy CS, Gross BA, Burkhardt JK, Grandhi R. Order and Timing of Middle Meningeal Artery Embolization as a Perioperative Adjunct to Surgical Evacuation for Chronic Subdural Hematomas: A Multicenter Study. *Radiology.* 2025 Apr;315(1):e241571. doi: 10.1148/radiol.241571
 22. Bartek J, Biondi A, Bonhomme V, Castellan L, Catapano G, Cenzato M, Di Nuzzo G, De Robertis E, Giordano F, Iaccarino C, Kulcsar Z, Möhlenbruch MA, Raabe A, Rickard F, Romero CS, Schubert T, D S, Sicignano C, Muto M. Multidisciplinary consensus-based statement on the current role of middle meningeal artery embolization (MMAE) in chronic SubDural hematoma (cSDH). *Brain Spine.* 2024 Nov 19;4:104143. doi: 10.1016/j.bas.2024.104143
 23. Shafi M, Badikol SR, Gerstl JVE, Nawabi NLA, Sukumaran M, Kappel AD, Feroze AH, Smith TR, Mekary RA, Aziz-Sultan MA. Complications of Middle Meningeal Artery Embolization: A Systematic Review and Meta-Analysis. *World Neurosurg.* 2025 Feb;194:123541. doi: 10.1016/j.wneu.2024.11.124
 24. Stubbs DJ, Davies BM, Edlmann E, Ansari A, Bashford TH, Braude P, Bulters DO, Camp SJ, Carr G, Coles JP, de Monteverde-Robb D, Dhesei J, Dinsmore J, Evans NR, Foster E, Fox E, Froom I, Gillespie C, Gray N, Grieve K, Hartley P, Lecky F, Kolias A, Jeeves J, Joannides A, Minett T, Moppett I, Nathanson MH, Newcombe VFJ, Outtrim JG, Owen N, Petermann L, Ralhan S, Shipway D, Sinha R, Thomas W, Whitfield PC, Wilson SR, Zolnourian A, Dixon-Woods M, Menon DK, Hutchinson PJ; Improving Care In Elderly Neurosurgery Initiative (ICENI) Working Group. Clinical practice guidelines for the care of patients with a chronic subdural haematoma: multidisciplinary recommendations from presentation to recovery. *Br J Neurosurg.* 2024 Nov 11:1-10. doi: 10.1080/02688697.2024.2413445
 25. National Institute for Health and Care Excellence (UK). IPG 779. Middle meningeal artery embolisation for chronic subdural haematomas. *Interventional procedures guidance.* 2023 December 14. https://www.nice.org.uk/guidance/ipg779?utm_source=chatgpt.com
 26. Carpenter A, Rock M, Dowlati E, Miller C, Mai JC, Liu AH, Armonda RA, Felbaum DR. Middle meningeal artery embolization with subdural evacuating port system for primary management of chronic subdural hematomas. *Neurosurg Rev.* 2022 Feb;45(1):439-449. doi: 10.1007/s10143-021-01553-x

Ukrainian Neurosurgical Journal. 2026;32(1):40-51
doi: 10.25305/unj.339584

Transforaminal lumbar interbody fusion in spondylolisthesis: a prospective evaluation of clinical, radiological, and functional outcomes in a Central Indian cohort

Neeraj Prasad ¹, Manish Kumar Nirala ², Manisha Gupta ³, Abhishek Kumar ⁴

¹ Department of Neurosurgery, Government Superspeciality Hospital, Chhattisgarh Institute of Medical Science, Koni, Bilaspur, India

² Department of Neurosurgery, Artemis Hospital, Gurgoan, India

³ Department of Neurology, Government Superspeciality Hospital, Chhattisgarh Institute of Medical Science, Koni, Bilaspur, India

⁴ Department of Cardiology, Government Superspeciality Hospital, Chhattisgarh Institute of Medical Science, Koni, Bilaspur, India

Received: 24 September 2025

Accepted: 06 October 2025

Address for correspondence:

Dr Neeraj Prasad, Assistant Professor, Department of Neurosurgery, Superspeciality Hospital, Koni, Bilaspur, Chhattisgarh, 495009, India, email: neeraj12prasad12@gmail.com

Background: Spondylolisthesis, or anterior vertebral displacement, is a complex spinal disorder characterized by diverse symptoms and various treatment approaches. Transforaminal Lumbar Interbody Fusion (TLIF) is increasingly preferred over Posterior Lumbar Interbody Fusion (PLIF); however regional data in India are limited.

Objective: This prospective study evaluated clinical, radiological, and functional outcomes after TLIF in lumbar spondylolisthesis patients treated at a tertiary center in central India.

Methods: Fifty adult patients with Grade II–IV lumbar spondylolisthesis underwent TLIF. Assessments included pain (Visual Analogue Scale, VAS), disability (Oswestry Disability Index, ODI), neurological status, slip angle correction, fusion rates, and complications pre- and postoperatively. Statistical significance was set at $p < 0.05$.

Results: Locations L4–L5 (56%) and L5–S1 (44%) were the affected levels. The mean preoperative VAS and ODI scores were 7.4 ± 1.0 and $74 \pm 10\%$. At 6 months follow-up, VAS decreased by 71.6% to 2.1, and ODI by 88% to 9.5% ($p < 0.001$). Neurological recovery included full motor deficit resolution and 92% sensory improvement. The mean slip angle correction was $14.6 \pm 5.3^\circ$, and the fusion success rate was 92%. Complications were minimal, including 4% wound infection and 4% transient neurological deficits, with no implant failures.

Conclusion: TLIF shows excellent short-term results, offering substantial pain relief, functional and neurological recovery, and high fusion rates in Indian patients with moderate-to-severe spondylolisthesis. Further studies with larger sample sizes and longer follow-up periods are warranted to validate these findings.

Keywords: spondylolisthesis; spinal instability; TLIF; ODI; VAS

Introduction

Spondylolisthesis, characterized by the anterior displacement of a vertebra over the one beneath it, is a common spinal pathology with complex etiology and management considerations. Often resulting from spondylolysis, its classifications—such as that proposed by Marchetti and Bartolozzi—distinguish developmental from acquired forms, helping to understand its natural history, risk of progression, and treatment implications [1].

The widely used Meyerding classification grades severity by measuring the degree of vertebral slippage on lateral radiographs, guiding clinical decision-making [1]. Although it is readily identified on imaging, there remains considerable uncertainty about its pathogenesis and optimal treatment. Its prevalence ranges from 5–6% in the general population to as high as 12% among adolescents engaged in vigorous physical activity such as gymnastics and weightlifting, emphasizing mechanical stress as a key factor [2]. Genetic predisposition is also significant, with familial clustering rates ranging from 27% to 69%, as well as associations with congenital

anomalies, such as sacral spina bifida, affecting up to 42% of cases [3].

The most frequently involved segments are L4 and L5, vital for lumbo-sacral stability and load-bearing. Long-term follow-up studies indicate that spondylolisthesis is often benign; however, progression with neurological deficits and chronic pain may occur, correlating with higher Meyerding grades, disc degeneration, and sacral morphology.

Diagnostic accuracy has improved with modalities including oblique radiographs, which reveal the classic “Scotty dog” sign, computed tomography (CT) and single-photon emission computed tomography (SPECT) scans, which enhance the detection of pars interarticularis defects, and MRI, which assesses neural compression and soft tissue damage [4].

Clinically, pain patterns vary by age, with postural and gait abnormalities more common in children due to hamstring tightness, while whereas adults often present with back pain and sciatica, frequently dominated by neurogenic claudication.

Copyright © 2026 Neeraj Prasad, Manish Kumar Nirala, Manisha Gupta, Abhishek Kumar



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Advances in imaging—particularly MRI and dynamic radiographs—have enhanced the evaluation of segmental instability, a critical factor in guiding treatment decisions.

The North American Spine Society (NASS) promotes "advancing spine evidence synthesis" through a rigorous, multidisciplinary approach to developing evidence-based clinical guidelines [5]. The guidelines conclude that low back pain should be diagnosed mainly using patient history and physical examination, with advanced tests reserved for severe or suspicious cases. First-line treatment should focus on non-pharmacological approaches such as exercise and education, while medications or interventions should only be used when clearly needed, with careful consideration of risks and benefits. Individualized care is emphasized to improve patient outcomes and avoid unnecessary interventions. More recently, integration of artificial intelligence in diagnostic imaging has further enhanced sensitivity and accuracy [6].

Despite clear surgical indications in selected patients, controversies persist concerning the optimal surgical technique. Among available techniques, Transforaminal Lumbar Interbody Fusion (TLIF) has gained prominence as the preferred surgical approach, owing to its ability to provide circumferential fusion through a unilateral posterior corridor while minimizing dural and neural retraction, perioperative blood loss, and procedure duration compared to Posterior Lumbar Interbody Fusion (PLIF) [7]. It achieves better restoration of disc height, indirect foraminal decompression, and sagittal alignment correction [7].

Advances in TLIF—particularly with the advent of minimally invasive and expandable cage technologies—have improved fusion rates, functional recovery, and reduced perioperative morbidity [7]. However, there is a paucity of prospective, region-specific data in countries like India, where epidemiological patterns, patient comorbidities, and healthcare accessibility differ significantly from those in Western cohorts. This gap hampers evidence-based surgical planning and decision-making tailored to local needs.

The current study addresses this by systematically correlating clinicoradiological features with outcomes following TLIF, aiming to generate robust evidence for optimizing surgical management in the Indian context, particularly within the tribal belt of central India. Such research is crucial for improving patient-centered outcomes, informing shared decision-making, and enabling efficient allocation of healthcare resources against a backdrop of increasing disability due to spondylolisthesis worldwide.

Materials and methods

Study design and setting

This prospective, observational, single-institution study was conducted in the Department of Neurosurgery at a tertiary care center located in the tribal belt of central India. The study duration was one year. The study protocol was reviewed and approved by the Institutional Ethics Committee. Written informed consent was obtained from all participants or their legal guardians

before their inclusion in the study. The study adhered to the ethical principles outlined in the Declaration of Helsinki (2013 revision), ensuring respect for patient rights, safety, and well-being throughout the research process [8].

Inclusion criteria

All consecutive adult patients presenting with lower back pain suggestive of spinal instability were screened. Patients demonstrating both clinical features and radiological evidence of lumbar spondylolisthesis were prospectively enrolled. Patients were included if they met the following criteria:

1. Adults aged ≥ 18 years.
2. Presentation compatible with clinical features such as chronic low back pain with or without radiculopathy, neurogenic claudication, restricted lumbar spine mobility or segmental instability, neurological deficits including weakness, sensory impairment, or altered reflexes, and positive findings on instability or stretching tests such as the straight leg raising test, femoral stretch test, or instability catch sign.
3. Radiologically confirmed lumbar spondylolisthesis identified on standing lumbosacral X-rays (anteroposterior, lateral, flexion–extension views) and/or lumbar MRI.
4. Single-level spondylolisthesis was included.

Exclusion criteria

Patients were excluded under the following conditions:

1. Presence of scoliosis, abnormal lordosis, or congenital deformities other than spondylolisthesis.
2. Prolapsed intervertebral disc (PIVD) without evidence of spondylolisthesis.
3. Inflammatory spinal disorders (e.g., rheumatoid arthritis, ankylosing spondylitis, seronegative spondyloarthropathies).
4. Patients with previous lumbar spine surgery.
5. Active or recent spinal infections (tuberculous spondylitis, bacterial spondylodiscitis).
6. Spinal tumors or secondary metastatic disease.
7. Severe systemic comorbidities precluding surgery, such as uncontrolled diabetes mellitus, advanced cardiac disease, severe pulmonary compromise, or coagulopathy.
8. Pregnant or lactating women.
9. Patients unwilling or unable to provide informed consent or comply with scheduled follow-up visits.

Preoperative evaluation and data collection

For all included patients, detailed demographic data—including age, sex, residence, occupational history, and contact details—were systematically recorded. A comprehensive medical history was obtained, focusing on presenting symptoms, duration of illness, prior treatments, comorbidities, and both personal and family history. Clinical evaluation involved a thorough general physical examination and detailed neurological assessment, with attention to motor power, sensory perception, reflexes, gait, and spinal flexibility; findings such as instability, radiculopathy, and neurogenic claudication were specifically documented. Preoperative baseline laboratory investigations comprised complete blood count, renal and liver function tests, fasting

This article contains some figures that are displayed in color online but in black and white in the print edition.

or random blood sugar, serum electrolytes, calcium, rheumatoid factor, and C-reactive protein. The following radiological investigations were performed on a need basis:

- **Plain X-rays (lumbosacral spine):** Standing anteroposterior, lateral, oblique, and flexion–extension views were used to assess alignment, slip degree, slip angle, dynamic instability, scoliosis, and sagittal balance.

- **Computed Tomography (CT) (when indicated):** Used selectively for detailed bony anatomy in cases of high-grade slips or complex anomalies.

- **Magnetic Resonance Imaging (MRI):** Performed for all patients to evaluate neural compression, degree of canal stenosis, foraminal narrowing, facet joint morphology, disc degeneration, juxtafacet cysts, and ligamentum flavum hypertrophy. Signal changes on T2-weighted images were noted to assess neural element compromise and loss of cerebrospinal fluid (CSF) signal.

Key spinopelvic parameters include pelvic incidence (PI), pelvic tilt (PT), sacral slope (SS), and lumbar lordosis (LL). These are essential for assessing sagittal balance and spinal alignment [9]. PI, typically ranging from 30° to 80° (average 50°–55°), reflects pelvic anatomy and remains stable post-skeletal maturity; abnormal values may indicate structural imbalances. PT, generally between 10° and 15° (range 5° to 30°), measures pelvic orientation; elevated PT is often seen in spinal deformities. SS assesses the sacrum's inclination,

normally 30° to 50°, with deviations indicating potential mechanical issues. LL, the inward curvature of the lower back, usually spans 40°–60° but can range from 20° to 80°; hypo- or hyper lordosis may be related to various pathologies (**Fig. 1**). Abnormalities in these parameters are associated with spinal malalignment, pain risk, and degenerative conditions.

Surgical intervention

Each patient underwent a thorough pre-anesthetic evaluation and fitness assessment. All patients in the study underwent open TLIF surgery. Additionally, reduction was performed in all high-grade spondylolisthesis cases to restore alignment. Operative steps included a midline posterior incision with subperiosteal exposure of the relevant spinal levels, followed by decompression of neural elements through laminotomy and foraminotomy as needed. The intervertebral disc space was then prepared with thorough disc removal, after which interbody fusion was performed using appropriately sized cages combined with autologous or local bone graft. Pedicle screw fixation with rods was employed to achieve spinal stabilization (**Fig. 2**). Adequate hemostasis was achieved, and the wound was closed in layers, with the placement of a suction drain as indicated. Intraoperative parameters, including blood loss, duration of surgery, complications, and the level of fusion, were carefully documented.

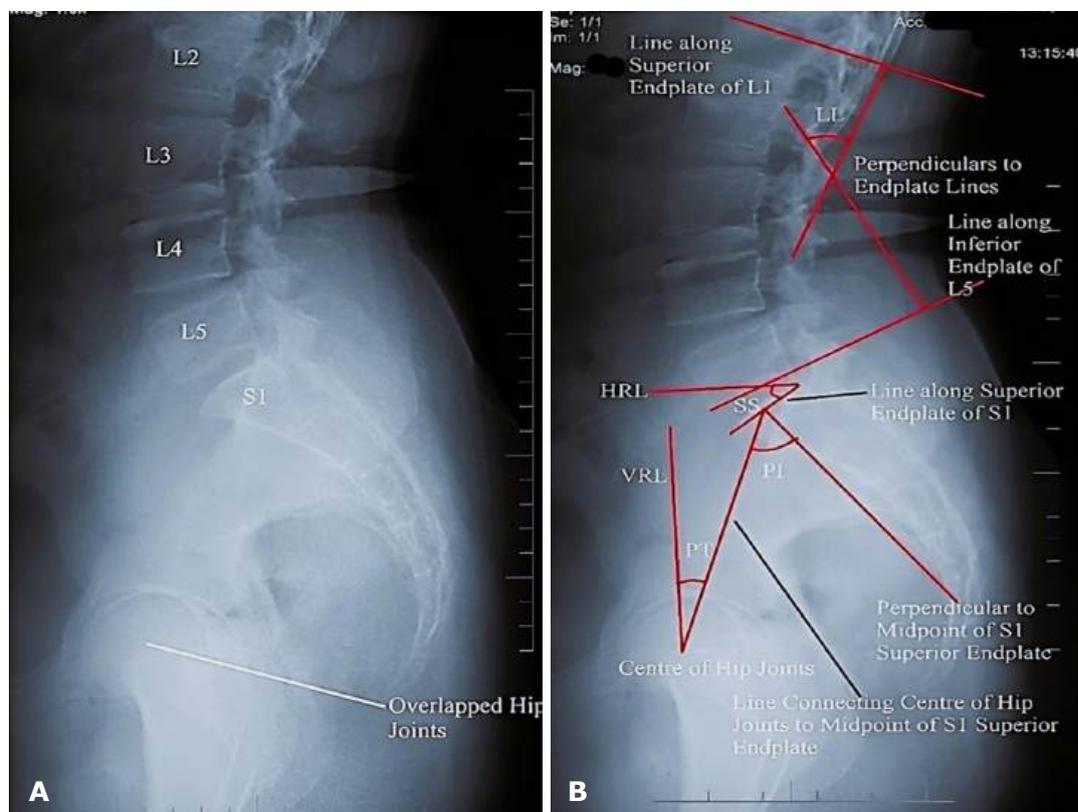


Fig. 1. Standing lateral radiograph of lumbosacral spine. Panel (A): Native image showing vertebral levels (L2–S1) and overlapped hip joints. Panel (B): Same image annotated to demonstrate measurement techniques for spinopelvic parameters. Red lines indicate the superior endplate of L1, the inferior endplate of L5, and the superior endplate of S1. Perpendiculars to endplate lines are shown to illustrate lumbar lordosis (LL), sacral slope (SS), pelvic incidence (PI), pelvic tilt (PT), and vertical reference line (VRL).



Fig. 2. A case study of grade 4 spondylolisthesis. Panel A – MRI of the lumbosacral spine (T2-weighted sagittal images) demonstrates lumbar spondylolisthesis with associated prolapsed intervertebral disc at the L4-L5 level. Panel B – Intraoperative photograph displaying laminotomy (solid white arrow) and placement of a pedicle screw rod construct (solid white star). Panel C – Plain X-rays of the lumbosacral spine (AP and lateral views, preoperative images) show loss of alignment due to spondylolisthesis. Panel D – Postoperative plain X-rays (AP and lateral views) illustrate the pedicle screws, rods, and interbody cage in situ, confirming realignment and stabilization

Postoperative care and follow-up

Patients were mobilized early with lumbar support. Postoperative radiographs were performed to confirm implant placement (**Fig. 2**). Analgesia, physiotherapy, and gradual rehabilitation were provided. Patients were discharged after achieving ambulation with adequate pain relief. Follow-up evaluations were carried out at 1 month, 3 months, and 6 months. Both outpatient visits and telephonic consultations were utilized when in-person visits were not possible.

Outcome measures

Primary outcome measures included postoperative pain, assessed using VAS; functional disability, evaluated with ODI; neurological recovery encompassing motor strength, sensory function, and reflexes; and the average duration of hospital stay [10]. Secondary outcome measures comprised radiographic assessment of vertebral displacement correction, measurement of slip angle reduction, and evaluation of surgical complications, including wound infections, implant-related issues, and any neurological deterioration.

Data analysis

All collected data were entered into a structured database and analyzed using SPSS version 26.0. Continuous variables were expressed as mean±standard deviation (SD), while categorical variables were presented as frequencies and percentages. Paired *t*-tests were used to compare preoperative and postoperative continuous variables, such as VAS and ODI scores. Chi-square tests were employed for the analysis of

categorical data. A *p*-value of less than 0.05 was considered statistically significant.

Results

The demographics and baseline characteristics of the study population are shown in (**Table 1**).

The study cohort comprised 50 patients with a mean age of 58±6.9 years (range 41–83), including 44% males and 56% females. The average BMI was 25.4±3.2 (22.5–31.1), with 72% of participants engaging in mixed occupational activity and 28% being sedentary. Comorbidities included hypertension (32%), diabetes (24%), and cardiovascular disease (20%). The mean duration of symptoms was 5.2±1.1 months. Pain was predominantly radicular (72%), with 48% reporting mechanical pain. Prior conservative treatments were physiotherapy (52%), medications (100%), and injections (36%). Lumbar levels L4–L5 and L5–S1 were affected in 56% and 44% respectively. No patients had Grade I spondylolisthesis; 52% had Grade II, 28% Grade III, and 20% Grade IV. In the study population, isthmic spondylolisthesis accounted for 62% (31 cases), whereas degenerative spondylolisthesis comprised 38% (19 cases). Preoperative VAS averaged 7.4±1.0, and ODI was 54±12%. Baseline neurological deficits were noted in 8% of patients as motor and in all patients as sensory. Imaging revealed canal stenosis in 28%, foraminal stenosis in 76%, and facet arthropathy in 12%. Dynamic X-rays showed instability in 92% of patients. The surgical and radiographic outcomes of the study are shown in (**Table 2**).

Table 1. Patient demographics and baseline characteristics (n=50) of the study population

Characteristic	Value / Number (%)	Range / Mean±SD
Age (years)	–	58±6.9 (41–83)
Gender (male/female)	22 (44%) / 28 (56%)	–
Body Mass Index (BMI)	–	25.4±3.2 (22.5–31.1)
Occupational status	Mixed: 36 (72%) Sedentary: 14 (28%)	–
Comorbidities	Hypertension: 16 (32%) Diabetes: 12 (24%) CVD: 10 (20%)	–
Duration of symptoms (months)	–	5.2±1.1 (1–9)
Pain characteristics	Mechanical: 24 (48%) Radicular: 36 (72%)	–
Previous conservative treatment	Physiotherapy: 26 (52%) Medications: 50 (100%) Injections: 18 (36%)	–
Spine levels affected	L4–L5: 28 (56%) L5–S1: 22 (44%)	–
Grade of spondylolisthesis (Meyerding)	Grade I: 0 (0%) Grade II: 26 (52%) Grade III: 14 (28%) Grade IV: 10 (20%)	–
Types of spondylolisthesis	Isthmic: 31 (62%) Degenerative: 19 (38%) Dysplastic: 0 (0%)	–
Preoperative VAS score	–	7.4±1.0 (6–9)
Preoperative ODI (%)	–	54±12 (40–80)
Baseline neurological deficit	Motor: 24(8%) Sensory: 50 (100%)	–
Imaging findings	Canal stenosis: 14 (28%) Foraminal stenosis: 36 (76%) Facet arthropathy: 6 (12%)	–
Instability on dynamic X-rays	Yes: 46 (92%) No: 4 (8%)	–

Table 2. Radiographic outcomes and surgical complications in the study population

Parameter	Mean±SD / Number of patients (n=50)	Range	Percentage (%)	Notes
Slip angle reduction (degrees)	14.6±5.3	9–30	–	Significant correction
Fusion rate at 6 months	46 patients / 50	–	92%	2 cases of non-union (pseudoarthrosis)
Wound infection (n, %)	2	–	4%	Superficial, resolved with treatment
Implant-related complications (n, %)	0 (0%)	–	0%	None reported
Neurological deterioration (n, %)	1	–	2%	Transient deficit, recovered
Cardiac complication	1	–	2%	Developed heart failure with atrial fibrillation, managed medically
Reoperation rate (n, %)	0 (0%)	–	0%	None
Average hospital stay (days)	12.5±2.1	5–18	–	Standard postoperative stay
Intraoperative blood loss (mL)	610±85.4	410–930	–	Moderate blood loss
Operative time (minutes)	175.2±24.8	140–220	–	Within the expected range

Surgical intervention resulted in a mean reduction of 14.6 ± 5.3 degrees in slip angle (range, 9–30 degrees). Fusion was successful in 92% (46/50) of patients at 6 months. Complications were minimal, with 4% experiencing wound infection (2 patients), 0% having implant-related issues, and 2% presenting with transient neurological deterioration (1 patient). No reoperations were needed. Average hospital stay was 12.5 ± 2.1 days, intraoperative blood loss averaged 610 ± 85.4 mL, and operative time was 175.2 ± 24.8 minutes. At the 6-month follow-up, spinopelvic parameter assessment revealed that pelvic incidence remained stable ($55.4^\circ \pm 7.8^\circ$ pre-operatively vs. $55.2^\circ \pm 7.5^\circ$), indicating no significant change. In contrast, pelvic tilt demonstrated a significant reduction, while sacral slope and lumbar lordosis also showed significant postoperative improvements (**Table 3**). These findings suggest better sagittal alignment and restoration of lumbar curvature following TLIF surgery.

Pre- and post-operative pain assessment is shown in (**Fig. 3**).

The mean VAS scores showed a progressive decrease from 7.4 ± 1.0 preoperatively (median 7, range 5–9) to 4.2 ± 1.3 at 1-month post-op (median 4, range

2–7), reflecting a 43.2% improvement with 44% of patients achieving $\geq 50\%$ pain reduction ($p=0.015$). At 3 months, the mean VAS further declined to 3.3 ± 1.2 (median 3, range 1–5), with a 55.4% improvement and 64% of patients with $\geq 50\%$ improvement ($p=0.009$). Significant pain relief continued at 6 months, with a mean VAS of 2.1 ± 0.8 (median 2, range 1–4), representing a 71.6% reduction and 84% attaining $\geq 50\%$ improvement ($p < 0.001$) (**Table 4**).

The functional outcome of the study is shown in (**Fig. 4**). The mean ODI scores decreased from a preoperative value of $74 \pm 10\%$ (median 75, range 55–90) to $62.5 \pm 6.8\%$ at 1 month (median 60, range 45–78), reflecting a 16% improvement with 28% of patients achieving $\geq 30\%$ improvement ($p=0.08$). At 3 months, mean ODI further improved to $36.5 \pm 4.2\%$ (median 35, range 22–53), representing a 51% reduction and 72% of patients with $\geq 30\%$ improvement ($p=0.005$). By 6 months, the mean ODI declined markedly to $9.5 \pm 1.6\%$ (median 9, range 3–18), showing an 88% improvement with 96% of patients achieving $\geq 30\%$ improvement ($p < 0.001$) (**Table 5**).

The neurological outcomes demonstrated significant recovery over time (**Fig. 5**).

Table 3. Pre- and post-operative assessment of spinopelvic parameters using paired t-test

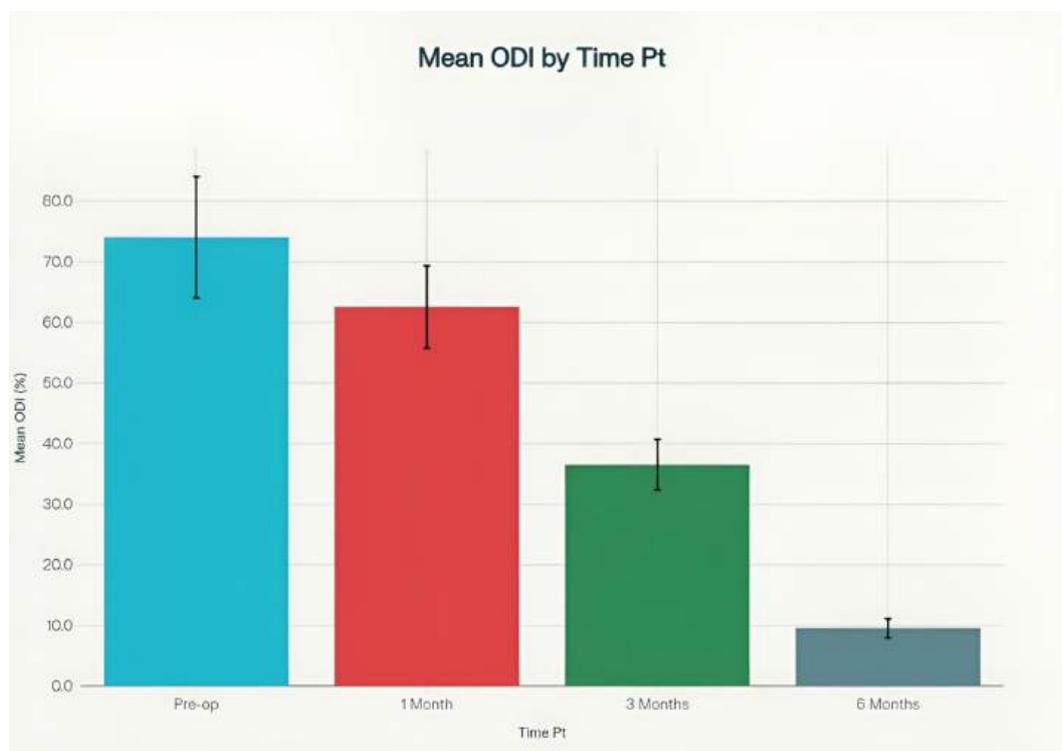
Parameter	Pre-op	Follow-up (6 months)	t-value	p-value
Pelvic incidence (PI)	$55.4^\circ \pm 7.8^\circ$	$55.2^\circ \pm 7.5^\circ$	-0.13	0.8972
Pelvic tilt (PT)	$21.3^\circ \pm 7.4^\circ$	$17.2^\circ \pm 5.1^\circ$	-3.23	0.0017
Sacral slope (SS)	$33.6^\circ \pm 9.5^\circ$	$37.8^\circ \pm 8.3^\circ$	2.35	0.0211
Lumbar lordosis (LL)	$46.5^\circ \pm 12.4^\circ$	$51.4^\circ \pm 11.2^\circ$	2.07	0.0410



Fig. 3. Mean Visual Analogue Scale of patients during pre-op and follow-up

Table 4. Pre-operative and post-operative pain assessment using VAS

Time point	Mean VAS±SD	Median VAS	Range	% Improvement from Baseline	Number of patients with ≥50 % Improvement (%)	p-value (vs Pre-op)
Preoperative	7.4±1.0	7	6–9	–	–	–
1 Month post-op	4.2±1.3	4	2–7	43.2%	22 (44%)	0.015
3 Months post-op	3.3±1.2	3	1–6	55.4%	32 (64%)	0.009
6 Months post-op	2.1±0.8	2	1–4	71.6%	42 (84%)	<0.001

**Fig. 4.** Mean Oswestry Disability Index (ODI) during pre-op and follow-up**Table 5.** Functional disability assessed by ODI during pre-op and follow-up.

Time Point	Mean ODI (%) (Mean±SD)	Median (%)	Range	% Improvement from Baseline	≥30% Improvement (n, %)	p-value
Pre-op	74±10	75	55–90	–	–	–
1 Month	62.5±6.8	60	45–78	16%	14 (28%)	0.08
3 Months	36.5±4.2	35	22–53	51%	36 (72%)	0.005
6 Months	9.5±1.6	9	3–18	88%	48 (96%)	<0.001

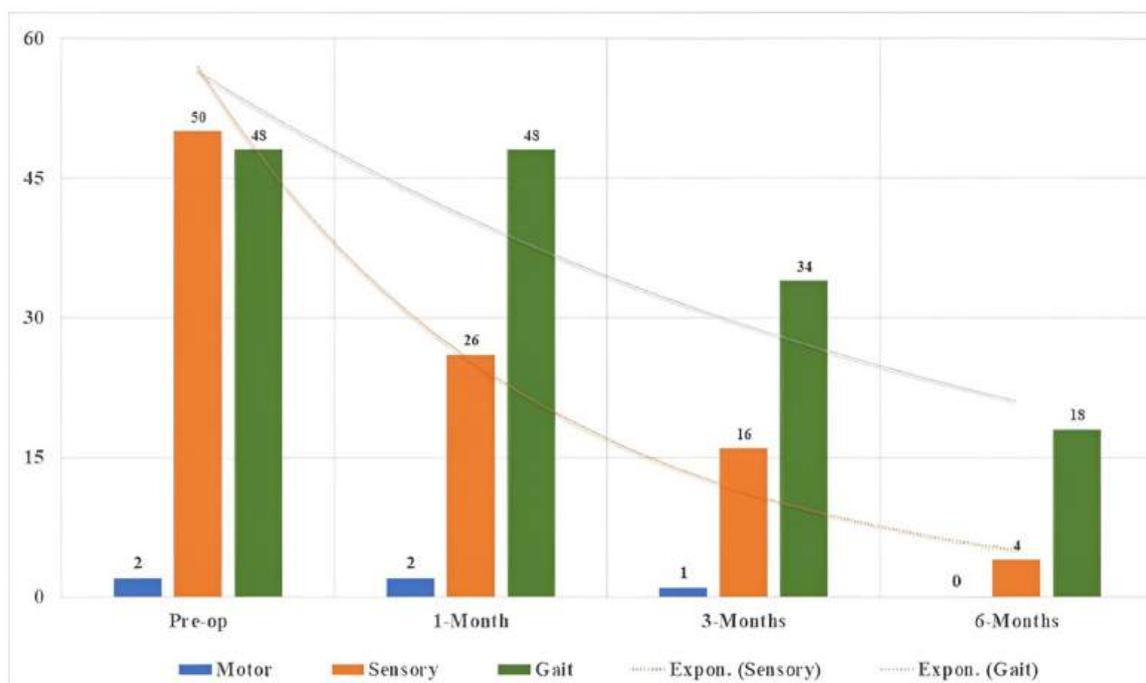


Fig. 5. Neurological recovery histogram at 1,3, and 6 months

A motor deficit was present in 4% of patients preoperatively and persisted immediately and at 1 month postoperatively but resolved completely by 6 months, representing 100% resolution ($p=0.04$). The sensory deficit was universal preoperatively (100%) and reduced to 52% immediately post-op, 32% at 1 month, and 8% at 6 months, reflecting a 92% overall improvement ($p < 0.001$). Gait disturbance affected 96% preoperatively and immediately post-op, improved to 68% at 1 month, and further to 36% at 6 months, demonstrating a 62.5% improvement ($p=0.001$) (Table 6).

The correlation analysis of demographic, clinical, and radiographic variables with study outcomes is shown in Table 7. The analysis of study variables showed that older patients (>70 years) and those with obesity had higher disability and pain scores, with obesity significantly affecting both ODI (9.90 ± 1.52 vs. 8.85 ± 1.74 , $p=0.029$) and VAS (2.05 ± 0.69 vs. 2.30 ± 0.82 , $p=0.001$) outcomes. The L4-L5 spinal level was associated with greater disability (ODI 10.06 ± 1.84) compared to L5-S1 (8.79 ± 1.63 , $p=0.014$). Higher grades of spondylolisthesis correlated with worse outcomes, with grade 4 showing the highest ODI (11.27 ± 1.55 , $p < 0.001$). No significant outcome differences were noted based on sex or hypertension.

Discussion

This prospective study evaluated the short-term clinical, radiological, and functional outcomes of TLIF in patients with spondylolisthesis, with an emphasis on pain relief, functional recovery, and fusion success. Our results demonstrate that TLIF provides effective correction of deformity, promotes high fusion rates, and achieves substantial improvements in pain scores, disability indices, and neurological function, with a low complication profile.

The demographic profile of the cohort—mean age 58 years, female predominance (56%), high prevalence of comorbidities (hypertension 32%, diabetes 24%), and a relatively high rates of grade II–IV slips—reflects the typical clinical scenario of Indian patients presenting for spinal surgery. Compared with international cohorts, where many surgical series focus on lower-grade slips and younger patients, our series included a greater proportion of advanced Meyerding grades (48% grade III–IV) [11]. This may highlight a delay in diagnosis and surgical referral in our setting, likely influenced by socioeconomic and healthcare access disparities.

The pre- and post-operative assessment of spinopelvic parameters demonstrated significant changes in PT, SS, and LL at 6 months follow-up, while PI remained stable with no significant difference ($p=0.8972$). Specifically, PT decreased significantly from $21.3^\circ \pm 7.4^\circ$ to $17.2^\circ \pm 5.1^\circ$ ($t=-3.23$, $p=0.0017$), indicating improved pelvic alignment post-surgery. SS and LL showed a significant increase, suggesting enhanced lumbar curvature contributing to sagittal balance restoration. These findings are consistent with prior studies. Shafiei *et al.* reported that abnormalities in standing pelvic tilt are significantly associated with poorer functional outcomes after total hip arthroplasty, and improvement in PT correlates with better recovery [12]. Similarly, Williams *et al.* found that PT and LL improved significantly post-lumbar fusion surgery, consistent with the paired t-test findings observed in the present study [13]. These studies collectively confirm that surgical realignment positively impacts the key sagittal parameters PT, SS, and LL, while PI remains a fixed anatomical parameter unaffected by surgery.

Table 6. Neurological recovery outcomes during follow-up

Neurological Parameter	Preoperative (n, %)	Immediate post-op (n, %)	1-Month post-op (n, %)	6-Month post-op (n, %)	Improvement (%)	p-value
Motor deficit	2 (4%)	2 (4%)	2 (4%)	0 (0%)	100% resolution	0.04
Sensory deficit	50 (100%)	26 (52%)	16 (32%)	4 (8%)	92% improvement	<0.001
Gait disturbance	48 (96%)	48 (96%)	34 (68%)	18 (36%)	62.5% improvement	0.001

Table 7. Correlation of various demographic, clinical, and radiographical parameters of the study population with study outcomes

Variables	Subclass	Outcome (ODI) Mean±SD	T value / F value (ODI)	P value (ODI)	Outcome (VAS) Mean±SD	T value / F value (VAS)	P value (VAS)
Sex	Male (n=22)	9.79±1.45	1.37157	0.17658	1.83±0.72	1.92345	0.05500
	Female (n=28)	9.27±1.23			2.23±0.78		
Age	<50 Yrs (n=27)	9.00±1.67	4.67581	0.01406	1.97±0.88	2.15790	0.12600
	51-70 Yrs (n=18)	9.95±1.31			2.12±0.74		
	>70 Yrs (n=5)	10.96±1.90			2.31±0.80		
Obesity	Present (n=31)	9.90±1.52	2.24392	0.02949	2.05±0.69	3.33521	0.00110
	Absent (n=19)	8.85±1.74			2.30±0.82		
HTN	Present (n=16)	10.15±1.38	1.76022	0.08474	2.26±0.77	1.15840	0.24560
	Absent (n=34)	9.19±2.00			2.08±0.83		
DM	Present (n=12)	10.00±1.41	0.99836	0.32311	1.85±0.82	3.23211	0.00160
	Absent (n=38)	9.38±1.58			2.21±0.78		
CVD	Present (n=10)	10.02±1.72	1.33140	0.18935	2.49±0.72	2.00822	0.05220
	Absent (n=40)	9.37±1.29			2.03±0.87		
Location	L4-L5 (n=28)	10.06±1.84	2.54546	0.01418	2.19±0.65	1.92830	0.05810
	L5-S1 (n=22)	8.79±1.63			2.00±0.90		
Grade of spondylolisthesis	Grade 2 (n=26)	8.59±1.47	9.79907	0.00028	1.89±0.95	9.36251	0.00150
	Grade 3 (n=14)	9.93±2.10			2.09±0.72		
	Grade 4 (n=10)	11.27±1.55			2.43±0.78		

Postoperative VAS scores demonstrated a significant and sustained decline from 7.4 preoperatively to 2.1 at 6 months, with 84% of patients reporting $\geq 50\%$ pain relief. Similarly, ODI improved by 88% at final follow-up, with almost all patients (96%) achieving a clinically meaningful improvement. These outcomes are consistent with previous reports demonstrating the efficacy of TLIF for spondylolisthesis. For instance, Hartmann *et al.* have reported VAS backache pain reduction of 69.6% at 12 weeks post-TLIF, comparable to our 71.6% VAS reduction at 6 months [14]. Also, the ODI scores in this study improved by 53.8% comparable to our study comparable to our study (51% reduction) [14].

The early disability improvement lag at 1 month, followed by sharp gains at 3 and 6 months, may reflect the time required for postoperative rehabilitation and gradual fusion-related stability. Integrating high-intensity interval training (HIIT) into rehabilitation protocols can accelerate these functional gains, as HIIT has been shown to significantly boost cardiovascular fitness, quality of life, and postoperative recovery in patients—suggesting a promising strategy to optimize outcomes in surgical populations [15]. The mean correction in slip angle (14.6 degrees) and the high 6-month fusion rate (92%) confirm TLIF's biomechanical advantages in restoring sagittal balance and promoting stability. Our fusion rate aligns with previously published pooled values of 84.7–94.3% in TLIF series and compares favorably to PLIF, where fusion is often slightly lower and implant-related complications are higher due to bilateral retraction [16]. Notably, our series achieved this with minimal complications and no implant failures, supporting TLIF as a reliable technique for correcting multi-grade spondylolisthesis. Compared to other studies, where at least one complication rates range from approximately 20%—including dural tears, nerve injuries, and pseudoarthrosis—our outcomes were at the lower end, possibly reflecting careful case selection and adherence to surgical protocols [17–18].

Neural decompression is a key advantage of TLIF, where cage placement restores disc height and foramina. In our study, 76% had foraminal stenosis, yet the majority showed neurological recovery. Neurological deterioration was transient in one patient, and there was a single cardiac complication involving heart failure with atrial fibrillation [19–21]. It was managed medically, in line with modern perioperative risk assessments that highlight cardiac morbidity as rare but significant in this and similar populations [3, 22]. Average hospital stays (12.5 ± 2.1 days), intraoperative blood loss (610 ± 85.4 mL), and operative time (175.2 ± 24.8 minutes) were consistent with results from large comparative studies, supporting TLIF's status as an effective technique for spondylolisthesis with a favourable safety and recovery profile that matches current evidence-based guidelines and outcomes research [18].

In the evaluation of neurological outcomes, significant improvements were observed across motor, sensory, and gait parameters over six months. Motor deficits resolved completely by six months ($p=0.04$). Sensory deficits were initially present in 100% of patients but improved dramatically to 8% at six months, reflecting a 92% improvement with high statistical significance. Gait disturbance was noted in 96% preoperatively,

decreasing to 36% by six months, indicating a 62.5% improvement ($p=0.001$). These findings align well with published data by Balasubramanian *et al.* showing that TLIF effectively decompresses neural elements, promotes nerve root recovery, and facilitates substantial functional neurological recovery, with most deficits improving gradually over months postoperatively without persistent major deficits [23].

Studies have also emphasized that the unilateral posterior approach preserves posterior soft tissues, aiding neurological recovery, and that early motor improvements portend good clinical outcomes [24]. Although some sensory symptoms may persist longer, a profound reduction over time indicates successful nerve decompression and stabilization achieved by TLIF. These neurological outcome trends are supported by both retrospective and prospective clinical series investigating TLIF in the treatment of spondylolisthesis [25]. However, our cohort adds valuable data specific to the Indian context, where higher preoperative disability, advanced slip grades, and delayed presentation are common.

The correlation of various demographic, clinical, and radiographic parameters with study outcomes, measured by ODI and VAS, reveals significant associations, particularly with age, obesity, location of pathology, and grade of spondylolisthesis. Patients >70 years had higher disability scores. Obesity was significantly correlated with worse outcomes in both ODI ($p=0.02949$) and VAS ($p=0.00110$), consistent with recent findings by Garcia *et al.*, who reported that higher BMI negatively affects recovery and results in elevated pain and disability scores postoperatively [26]. Spondylolisthesis grade also showed a highly significant correlation with both ODI ($p=0.00028$) and VAS ($p=0.00150$), with higher grades associated with worse disability and pain, echoing the observations by Nedelea *et al.* regarding functional impairment increasing with severity of spondylolisthesis [27]. The location at L5-S1 was associated with significantly higher ODI compared to L5-S1 ($p=0.00848$). Sex and hypertension showed no significant correlation with outcomes in this cohort. Diabetes mellitus was significantly correlated with VAS scores ($p=0.00160$), which aligns with recent data highlighting altered pain perception in diabetic patients [28]. These findings underscore the need for individualized patient assessment incorporating these variables to optimize treatment strategies and prognostication in spinal disorders.

Study strengths and limitations

This study possesses many strengths including its prospective design, which ensures systematic and unbiased data collection; comprehensive evaluation of multiple clinical, radiographic, and functional outcomes such as pain (VAS), disability (ODI), neurological recovery, and fusion rates, providing a holistic picture of TLIF efficacy; and its focus on an Indian patient cohort, filling an important regional data gap and addressing demographic and healthcare nuances. Additionally, the detailed reporting of neurological and functional improvements with statistically significant results, strengthens the clinical relevance of the findings. However, the study has few limitations such as a relatively small sample size of 50 patients, potentially limiting the power to detect rare complications and

reducing generalizability; a short-term follow-up period of six months, which is insufficient to assess long-term fusion success and late complications. Furthermore, its single-center nature, absence of a control or comparison group, and limited detail on rehabilitation protocols may influence functional recovery outcomes and prevent standardization of postoperative care. Despite these limitations the study provides important contribution to Indian spine surgery literature while identifying areas for further research to confirm and expand these findings in larger, multi-center, randomized trials with extended follow-up.

Conclusion

This prospective study highlights that TLIF is an effective and safe surgical option for managing spondylolisthesis in an Indian patient cohort, demonstrating significant postoperative improvements in pain, disability, neurological recovery, and sagittal spinal alignment. Key findings include a significant reduction in pelvic tilt, increased sacral slope and lumbar lordosis, and high fusion rates with minimal complications. Clinical outcomes were influenced by patient- and disease-related factors including age, obesity, diabetes, anatomical level, and grade of spondylolisthesis, emphasizing the need for individualized patient assessment. These results contribute valuable region-specific data to support tailored surgical planning and improve functional and neurological outcomes in patients with varying degrees of spondylolisthesis. However, larger, multi-center studies with longer follow-up are warranted to validate these findings, assess the long-term durability of fusion, and optimize perioperative care protocols tailored to regional patient populations.

Disclosure

Conflict of Interest

None

Funding

No funding is available

Approval of Institutional Ethics Review Board

GMC/KRB/IEC/2023/28 dated 02.05.2023

Authors' Contributions

Neeraj Prasad designed the study, acquired the data, and supervised the work; Manish Kumar Nirala contributed to data collection, methodology, and manuscript revision; Abhishek Kumar performed statistical analysis, data interpretation, and literature review; Manisha Gupta assisted with data validation, figures, editing, and final approval. All authors reviewed and approved the final manuscript.

References

- Xu C, Wu Y, Bao B, Liu X, Zhang Y, Li R, Yang T, Tang J. Deep Learning-Based Diagnosis of Lumbar Spondylolisthesis Using X-Ray Imaging. *Diagnostics* (Basel). 2025 Aug 12;15(16):2015. doi: 10.3390/diagnostics15162015
- Al-Witri A, Li Y. Prevalence of occult spina bifida in isthmic versus degenerative spondylolisthesis: retrospective radiographic review of consecutive surgical patients. *J Spine Surg*. 2025 Jun 27;11(2):227-233. doi: 10.21037/jss-24-151
- Walker CT, Bonney PA, Martirosyan NL, Theodore N. Genetics Underlying an Individualized Approach to Adult Spinal Disorders. *Front Surg*. 2016 Nov 22;3:61. doi: 10.3389/fsurg.2016.00061
- Zukotynski K, Curtis C, Grant FD, Micheli L, Treves ST. The value of SPECT in the detection of stress injury to the pars interarticularis in patients with low back pain. *J Orthop Surg Res*. 2010 Mar 3;5:13. doi: 10.1186/1749-799X-5-13
- Kreiner DS, Matz P, Bono CM, Cho CH, Easa JE, Ghiselli G, et al. Guideline summary review: an evidence-based clinical guideline for the diagnosis and treatment of low back pain. *Spine J*. 2020 Jul;20(7):998-1024. doi: 10.1016/j.spinee.2020.04.006
- Kumar A, Gupta M, Varshney A, Kumari S, Sahu RN. Artificial Intelligence in Cardiac Healthcare: Advancements in Managing Coronary Artery Disease and Acute Coronary Syndrome. *Disease and Health Research: New Insights Vol 10*. 2024 Nov 23:91-115. doi: 10.9734/bpi/dhrni/v10/3057
- Nedelea DG, Vulpe DE, Gherghiceanu F, Capitanu BS, Dragosloveanu S, Stoica IC. Surgical and non-surgical management of spondylolisthesis: a comprehensive review. *J Med Life*. 2025 Mar;18(3):196-207. doi: 10.25122/jml-2025-0039
- Ehni HJ, Wiesing U. The Declaration of Helsinki in bioethics literature since the last revision in 2013. *Bioethics*. 2024 May;38(4):335-343. doi: 10.1111/bioe.13270
- Cho Y, Jo DJ, Hyun SJ, Park JH, Yang NR. From the Spinopelvic Parameters to Global Alignment and Proportion Scores in Adult Spinal Deformity. *Neurospine*. 2023 Jun;20(2):467-477. doi: 10.14245/ns.2346374.187
- Adhikari P, Çetin E, Çetinkaya M, Nabi V, Yüksel S, Vila Casademunt A, Obeid I, Sanchez Perez-Gruoso F, Acaroğlu E; European Spine Study Group (ESSG). Ability of Visual Analogue Scale to predict Oswestry Disability Index improvement and surgical treatment decision in patients with adult spinal deformity. *Brain Spine*. 2022 Aug 28;2:100934. doi: 10.1016/j.bas.2022.100934
- Zhang Q, Yuan Z, Zhou M, Liu H, Xu Y, Ren Y. A comparison of posterior lumbar interbody fusion and transforaminal lumbar interbody fusion: a literature review and meta-analysis. *BMC Musculoskelet Disord*. 2014 Nov 5;15:367. doi: 10.1186/1471-2474-15-367
- Shafei SH, Plaskos C, Bromwich L, Baré JV, McMahon S, Shimmin A. Impact of preoperative spinopelvic risk factors on functional outcomes after total hip arthroplasty: a retrospective cohort study. *Bone Joint J*. 2025 Aug 1;107-B(8):777-783. doi: 10.1302/0301-620X.107B8.BJJ-2024-1441.R1
- Williams GP, Giraldo JP, Zhou JJ, Sawa AGU, Lee JJ, Abbatematteo JM, Kelly BP, Turner JD, Snyder LA, Uribe JS. Prediction of Postoperative Segmental Lordosis at L5 to S1 After Single-Level Anterior Lumbar Interbody Fusion. *Int J Spine Surg*. 2025 Apr 11:8751. doi: 10.14444/8751
- Hartmann S, Lang A, Lener S, Abramovic A, Grassner L, Thomé C. Minimally invasive versus open transforaminal lumbar interbody fusion: a prospective, controlled observational study of short-term outcome. *Neurosurg Rev*. 2022 Oct;45(5):3417-3426. doi: 10.1007/s10143-022-01845-w
- Kumar A, Gupta M, Kohat AK, Agrawal A, Varshney A, Chugh A, Koshy DI, Gurjar R, Kumar P. Impact of High-Intensity Interval Training (HIIT) on Patient Recovery After Myocardial Infarction and Stroke: A Fast Track to Fitness. *Cureus*. 2024 Nov 18;16(11):e73910. doi: 10.7759/cureus.73910
- Levin JM, Tanenbaum JE, Steinmetz MP, Mroz TE, Overley SC. Posterolateral fusion (PLF) versus transforaminal lumbar interbody fusion (TLIF) for spondylolisthesis: a systematic review and meta-analysis. *Spine J*. 2018 Jun;18(6):1088-1098. doi: 10.1016/j.spinee.2018.01.028
- Poppenborg P, Liljenqvist U, Gosheger G, Schulze Boevingloh A, Lampe L, Schmeil S, Schulte TL, Lange T. Complications in TLIF spondylodesis-do they influence the outcome for patients? A prospective two-center study. *Eur Spine J*. 2021 May;30(5):1320-1328. doi: 10.1007/s00586-020-06689-w
- Chen X, Lin GX, Rui G, Chen CM, Kotheeranurak V, Wu HJ, Zhang HL. Comparison of Perioperative and Postoperative Outcomes of Minimally Invasive and Open TLIF in Obese Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Pain Res*. 2022 Jan 6;15:41-52. doi: 10.2147/JPR.S329162
- Kumar DA, Muneer DK, Qureshi DN. Relationship between

- high sensitivity troponin I and clinical outcomes in non-acute coronary syndrome (non-ACS) acute heart failure patients - a one-year follow-up study. *Indian Heart J.* 2024 Mar-Apr;76(2):139-145. doi: 10.1016/j.ihj.2024.04.003
20. Kumar A, Gupta M, Varshney A, Kumar R. Flecainide fallout: a rare case report of refractory ventricular tachycardia and updated management strategies. *Eur Heart J Case Rep.* 2025 Jul 29;9(8):yaf368. doi: 10.1093/ehjcr/yaf368
 21. Kumar A, Gupta M, Kumar M, Varshney A. High-Sensitivity Cardiac Troponin Assays in Acute Heart Failure, Moving Beyond Myocardial Infarction. *Cardiol Rev.* 2024 Nov 27. doi: 10.1097/CRD.0000000000000732
 22. Sharma AY, Tiwari B, Ekka S, Kumar A, Jangir M, Peswani M, Agrawal S. Postoperative Clinical Outcomes of Transurethral Resection of the Prostate (TURP) Combined With Otis Urethrotomy in High-Risk Patients With Coronary Artery Disease (Post-Angioplasty): Insights From a Prospective Observational Cohort. *Cureus.* 2025 Sep 1;17(9):e91439. doi: 10.7759/cureus.91439
 23. Balasubramanian VA, Douraiswami B, Subramani S. Outcome of transforaminal lumbar interbody fusion in spondylolisthesis-A clinico-radiological correlation. *J Orthop.* 2018 Feb 24;15(2):359-362. doi: 10.1016/j.jor.2018.02.017
 24. Murrad K, Al Harbi Y, Alsabbagh LM, Alwehaibi K, Al Salhi R, Awwad W. Clinical Outcomes of the Transforaminal Lumbar Interbody Fusion Technique Among Patients With Low Back Pain Showing Type 1 Modic Changes on MRI. *Cureus.* 2024 Jun 5;16(6):e61745. doi: 10.7759/cureus.61745
 25. Shahzad H, Lee M, Epitropoulos F, Bhatti N, Singh VK, Kavuri V, Yu E. Comparing trends and outcomes of minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion (TLIF) procedures: A retrospective analysis. *J Orthop.* 2024 Jul 25;59:82-85. doi: 10.1016/j.jor.2024.07.010
 26. Garcia R, Odland K, Sembrano J. Effects of Body Mass Index on Spondylolisthesis Surgery and Associated Patient-Reported Outcomes: A Retrospective Review. *Int J Spine Surg.* 2025 Sep 2;19(4):375-382. doi: 10.14444/8752
 27. Nedelea DG, Vulpe DE, Dragosloveanu S, Stoica IC. Primary Versus Iatrogenic Spondylolisthesis: A Multi-Dimensional Comparison of Outcomes. *J Clin Med.* 2025 Mar 23;14(7):2193. doi: 10.3390/jcm14072193
 28. Zhang J, Liu Y, Zeng Y, Yuan L, Li W. Correlations between spinopelvic parameters and health-related quality of life in degenerative lumbar scoliosis patients before and after long-level fusion surgery. *BMC Musculoskelet Disord.* 2025 Jan 25;26(1):84. doi: 10.1186/s12891-025-08336-1

Трансфорамінальна поперекова міжтілова фіксація при спондилолітезі: проспективна оцінка клінічних, радіологічних і функціональних результатів у когорті пацієнтів Центральної Індії

Нірадж Прасад¹, Маніш Кумар Нірала², Маніша Гупта³, Абхішек Кумар⁴

¹ Відділення нейрохірургії, Державна багатопрофільна лікарня, Інститут медичних наук Чхаттисгарха, Коні, Білапур, Індія

² Відділення нейрохірургії, Лікарня Артеміда, Гургаон, Індія

³ Відділення неврології, Державна багатопрофільна лікарня, Інститут медичних наук Чхаттисгарха, Коні, Білапур, Індія

⁴ Відділення кардіології, Державна багатопрофільна лікарня, Інститут медичних наук Чхаттисгарха, Коні, Білапур, Індія

Надійшла до редакції 24.09.2025
Прийнята до публікації 06.10.2025

Адреса для листування:
Dr Neeraj Prasad, Assistant Professor, Department of Neurosurgery, Superspeciality Hospital, Koni, Bilaspur, Chhattisgarh, 495009, India, email: neeraj12prasad12@gmail.com

Спондилолітез, або переднє зміщення хребця, — це складне захворювання хребта, що характеризується різноманітними симптомами та потребує різних підходів до лікування. Трансфорамінальна поперекова міжтілова фіксація (TLIF) має переваги перед задньою поперековою міжтіловою фіксацією (PLIF), але регіональні дані з Індії обмежені.

Мета: оцінити клінічні, радіологічні та функціональні результати після виконання TLIF у пацієнтів зі спондилолітезом поперекового відділу.

Матеріали і методи. Проведено проспективне дослідження клінічних, радіологічних і функціональних результатів у 50 пацієнтів зі спондилолітезом поперекового відділу II–IV ступеня після виконання TLIF у медичному центрі третинної медичної допомоги в Центральній Індії. Оцінювали інтенсивність болю за візуальною аналоговою шкалою (ВАШ), інвалідизацію за індексом інвалідності Освестрі (ODI), неврологічний статус, корекцію кута зміщення, частоту зрощення й ускладнення до та після операції. За критичний рівень значущості приймали 0,05.

Результати. Ураженими рівнями були L4–L5 (56%) та L5–S1 (44%). Доопераційні середні значення оцінки за ВАШ і ODI становили 7,4±1,0 та (74±10)% відповідно. Через 6 міс інтенсивність болю за ВАШ знизилася на 71,6% (до 2,1), ODI — на 88% (до 9,5%) (p<0,001). Зареєстровано неврологічне відновлення: повне усунення моторного дефіциту та поліпшення чутливості на 92%. Середня корекція кута зміщення становила (14,6±5,3)°, частота успішного зрощення — 92%. Ускладнення були мінімальними: у 4% випадків — інфекція рани, ще в 4% — тимчасові неврологічні порушення. Випадків відмови імплантатів не було.

Висновки. Застосування TLIF продемонструвало відмінні короткострокові результати, зокрема дало змогу значно зменшити інтенсивність болю, сприяло функціональному та неврологічному відновленню, підвищило частоту успішного зрощення в пацієнтів із середньотяжким і тяжким спондилолітезом в Індії. Для підтвердження результатів необхідно провести тривалі дослідження у великих когортах.

Ключові слова: спондилолітез; нестабільність хребта; TLIF; ODI; ВАШ

Ukrainian Neurosurgical Journal. 2026;32(1):52-59
doi: 10.25305/unj.338724

Factors contributing to surgical complexity in giant parasagittal and falx meningiomas: a case-based review

Tommy A. Nazwar¹, Nasim Amar², Farhad Bal'afif¹, Donny W. Wardhana¹, Fachriy Bal'afif¹

¹ Division of Neurosurgery, Department of Surgery, Faculty of Medicine, Brawijaya University-Saiful Anwar General Hospital, Malang, East Java, Indonesia

² Faculty of Medicine, Brawijaya University-Saiful Anwar General Hospital, Indonesia

Received: 07 September 2025

Accepted: 16 October 2025

Address for correspondence:

Tommy A. Nazwar, Division of Neurosurgery, Department of Surgery, Brawijaya University/Saiful Anwar General Hospital, GPT II Building, 2nd Floor, Malang, East Java, 65112, Indonesia, email: tommy@ub.ac.id

Introduction: Giant parasagittal and falx meningiomas are surgically challenging due to their frequent involvement of the superior sagittal sinus (SSS), proximity to eloquent cortex, and complex venous anatomy. Although these tumors carry a high operative risk, detailed analyses of surgical difficulty remain limited in the literature.

Objective: This narrative review of published case reports and series aims to delineate the key determinants of surgical complexity in giant parasagittal and falx meningiomas, including tumor size, sinus involvement, anatomical constraints, and intraoperative decision-making while emphasizing the balance between surgical radicality and patient safety.

Methods: A narrative review and multicase synthesis were performed, analyzing 22 published reports (19 case reports and 3 case series) describing the microsurgical management of giant parasagittal and falx meningiomas. Studies were included based on the PICOS framework, focusing on tumors ≥ 5 cm with original surgical and outcome data. Extracted variables included demographics, tumor size, location, SSS involvement, histology, surgical technique, and clinical outcomes.

Results: A total of 36 patients were identified. Most tumors were parasagittal (52.8%), involved the middle third of the SSS (38.9%), and demonstrated SSS invasion (78.6%), with complete occlusion in 64.3% of cases. Gross total resection was achieved in 75.7% of cases. Pediatric patients (11.1%) were more frequently associated with high-grade histology and intraoperative complications. Tumors involving the middle third of the SSS and those with parasagittal location were consistently associated with increased technical difficulty, venous bleeding, and postoperative deficits. Overall, 72.2% of patients experienced favorable recovery, while 11.1% had poor outcomes, including tumor recurrence or death.

Conclusion: Surgical management of giant parasagittal and falx meningiomas is technically demanding, particularly in pediatric cases and when tumors involve the parasagittal region or the middle third of the SSS. Careful preoperative venous evaluation and individualized strategies are crucial for optimizing the resection while minimizing complications.

Keywords: parasagittal meningioma; falx meningioma; giant meningioma; surgical complexity

Introduction

Parasagittal and falx meningiomas are among the most frequently encountered intracranial tumors, ranking second only to convexity meningiomas in terms of location [1, 2]. Arising from the arachnoid cap cells, often near the arachnoid villi along the falx cerebri or superior sagittal sinus (SSS), these tumors are associated with significant surgical morbidity and account for approximately 2.6–6.7% of meningioma-related deaths [3]. Although they are generally histologically benign, their proximity to essential venous structures and cortical regions poses considerable surgical challenges [4].

Parasagittal meningiomas, which are defined by their involvement with the wall or lumen of the SSS, represent approximately 20–30% of all intracranial meningiomas [5]. Surgical complexity is amplified in giant tumors, commonly defined as those measuring more than 5 cm in diameter [6]. These large tumors often compress or invade the SSS, impair venous drainage, and distort adjacent brain tissue, elevating the risks of venous infarction, cerebral edema, and neurological deficits [4, 7, 8]. The challenges are particularly pronounced when the lesion involves the middle or posterior thirds of the sinus or is situated near eloquent brain areas, such as the sensorimotor

Copyright © 2026 Tommy A. Nazwar, Nasim Amar, Farhad Bal'afif, Donny W. Wardhana, Fachriy Bal'afif



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

or supplementary motor cortex [1, 9, 10]. Similarly, parafalcine meningiomas, typically located parafalcine meningiomas, typically located deep within the interhemispheric fissure, pose challenges due to limited surgical exposure and proximity to critical structures [5, 11].

While gross total resection (GTR) offers the best chance of minimizing recurrence, its feasibility is often constrained by the need to preserve vital venous and cortical anatomy [11, 12]. Despite the growing awareness of the complexities associated with parasagittal and falcine meningiomas, giant variants remain underrepresented in the literature, particularly in terms of detailed, case-level surgical evaluations [8, 13]. Additionally, there remains limited consensus on optimal strategies for managing tumors with partial or complete SSS occlusion [6]. These gaps underscore the need for a focused synthesis of case-level data on surgical complexity, venous sinus management, and outcomes in giant parasagittal and falcine meningiomas.

Objective

This narrative review of published case reports and series aims to delineate key determinants of surgical complexity in giant parasagittal and falcine meningiomas including tumor size, degree of sinus invasion or occlusion, venous and cortical anatomical constraints, and intraoperative decision making. The review also aims to relate these factors to the extent of resection, perioperative complications, and overall clinical outcomes, while emphasizing the need to balance surgical radicality with patient safety.

Methods

This narrative review was conducted to systematically identify clinical and anatomical factors contributing to surgical complexity in giant parasagittal and falcine meningiomas, based on published case reports and case series.

Eligibility criteria

The study followed the PICOS framework:

Population: Patients of any age diagnosed with parasagittal or falcine meningiomas ≥ 5 cm, with or without SSS invasion.

Intervention: Microsurgical resection, including GTR, near total, or subtotal resection (STR) approaches, with or without adjunctive measures such as sinus reconstruction, preoperative embolization, or radiotherapy.

Comparison: Cases were analyzed based on degree of sinus invasion (none, partial, complete), tumor location (anterior, middle, posterior third), patient age (pediatric

vs. adult), histological grade (WHO I–III), and extent of resection.

Outcomes:

- Primary: Identification of factors associated with increased surgical difficulty, including sinus invasion, tumor location, patient age, etc.

- Secondary: Neurological recovery, extent of resection, recurrence, and surgical complications.

Study Design: Case reports and series with original surgical and outcome data.

Only full-text articles published in English were included.

Studies were excluded if tumors were < 5 cm, located outside the parasagittal or falcine region, or lacked surgical or outcome details.

Search strategy

A structured search of PubMed, ScienceDirect, SpringerLink, and the Cochrane Library was conducted for articles published up to May 2025, using the following terms: "Falcine meningioma" OR "parasagittal meningioma") AND ("surgical resection" OR "Simpson grade") AND ("superior sagittal sinus" OR "SSS invasion") AND ("case report" OR "case series"). Relevant references from selected studies were also reviewed.

Data extraction and analysis

Two reviewers independently extracted data using a standardized form, collecting patient demographics, tumor features (size, location, SSS involvement, histology), surgical strategy, and clinical outcomes. Descriptive statistics were applied, and a structured comparison was used to explore associations between specific factors (e.g., venous anatomy, pediatric status, tumor site) and surgical complexity or outcomes.

Results

Study selection and identification

A total of 548 records were identified through a systematic literature search of four databases: PubMed (n=127), ScienceDirect (n=173), SpringerLink (n=130), and the Cochrane Library (n=148). After removing duplicates, the remaining articles were screened based on title, abstract, relevance to the predefined inclusion criteria, language (English), and full-text accessibility. Following full-text assessment, 22 studies, comprising 19 case reports [5, 7, 13–29] and 3 case series [6, 9, 30], met all eligibility criteria and were included in the final analysis.

Summary of findings

A total of 36 patients were included in the analysis (**Table 1**), comprising 19 males (52.8%) and 17 females

(47.2%). The majority were adults (n=32, 88.9%), with a mean age of 52.5 ± 12.5 years, while four patients (11.1%) were children (mean age 5.75 ± 3.8 years). The most common presenting symptoms were motor or sensory deficits, reported in 14 patients (38.9%), including weakness, hemiparesis, foot drop, and gait disturbances. Symptoms of raised intracranial pressure were present in 10 patients (27.8%), while seizures occurred in 9 cases (25%), including generalized, focal, and complex partial types. Cognitive or behavioral changes were reported in 4 patients (11.1%), such as memory impairment, aggression, or glossolalia.

The average tumor size was $7.69 \times 5.80 \times 5.56$ cm, indicating a large lesion volume, primarily parasagittal (n=19, 52.8%) and falcine (n=16, 44.4%), with one patient (2.8%) exhibiting combined falcine–parasagittal involvement. Regarding tumor site within the SSS, the middle third was the most commonly affected region (n=14, 38.9%), followed by the anterior third (n=12, 33.3%). Multiple adjacent segments were also involved (anterior–middle: n=3, 8.3%; middle–posterior: n=1, 2.8%). Posterior third involvement was noted in 2 cases (5.6%). Overall, SSS invasion occurred in 22 patients (78.6%), with complete invasion in 18 (64.3%) and partial invasion in 4 (14.3%).

Gross total resection (GTR) was achieved in 28 patients (75.7%), including two cases who underwent simultaneous sinus reconstruction. Incomplete resection was reported in 4 cases (10.8%). Histopathologically, meningothelial meningioma was the most common subtype (n=12, 33.3%), followed by atypical (n=9, 25%), transitional (n=7, 19.4%), and malignant variants, including anaplastic and malignant meningiomas (n=2, 5.6%). Most tumors were WHO Grade I (n=19, 52.8%), with Grade II in 9 cases (25%) and Grade III in 2 (5.6%).

Postoperatively, 26 patients (72.2%) had favourable recovery, while 6 (16.7%) experienced residual neurological deficits (mild hemiparesis, seizures well controlled with anticonvulsants, apraxia, intermittent headaches, and sixth nerve palsy). Four patients (11.1%) who experienced tumor recurrence had poor outcomes (worsening of symptoms, metastases, progressive tumor enlargement, multiple tumors detected, and death). The median follow-up duration was 17.5 months (range 2–180 months), and the mean length of hospital stay was 10.77 ± 8.36 days.

Factors Contributing to Surgical Difficulty Pediatric meningioma

The surgical management of giant parasagittal and falcine meningiomas is frequently complicated by a combination of factors, including patient age, vascular involvement, tumor location, and anatomical

Table 1. Descriptive Analysis

Variable	Descriptive Data (n=36)
Gender	
Male	19 (51.4%)
Female	17 (45.9%)
Age Group	
Adults	32 (88.9%), 52.5 ± 12.5
Children	4 (11.1%), 5.75 ± 3.8
Presenting Symptoms	
Seizures	9 (25%)
ICP-related symptoms	10 (27.8%)
Motor/sensory deficits	14 (38.9%)
Cognitive/behavioral changes	4 (11.1%)
Tumor size (mean)	$7.69 \times 5.80 \times 5.56$
Tumor Location	
Falcine	16 (44.4%)
Parasagittal	19 (52.8%)
Falcine–Parasagittal	1 (2.8%)
Tumor Site (SSS thirds)	
Anterior third	12 (33.3%)
Middle third	14 (38.9%)
Posterior third	2 (5.6%)
Anterior–Middle	3 (8.3%)
Middle–Posterior	1 (2.8%)
SSS Invasion	
Complete	18 (64.3%)
Partial	4 (14.3%)
None	6 (21.4%)
Extent of Resection	
Gross Total Resection (GTR)	28 (75.7%)
Incomplete Resection	4 (10.8%)
GTR with sinus reconstruction	2 (5.4%)
Histopathological Subtype	
Meningothelial meningioma	12 (33.3%)
Transitional meningioma	7 (19.4%)
Atypical meningioma	9 (25%)
Anaplastic meningioma	1 (2.8%)
Malignant meningioma	1 (2.8%)
WHO Grade	
Grade I	19 (52.8%)
Grade II	9 (25%)
Grade III	2 (5.6%)
Postoperative Outcomes	
Good recovery	26 (72.2%)
Recovery with deficits	6 (26.7%)
Poor outcome / Recurrence	4 (11.1%)
Follow-up Duration (months)	17.50 (IQR 2–180)
Length of Hospital Stay (days)	10.77 ± 8.36

subtype (**See Table 2 at the link <https://theunj.org/article/view/338724/331688>**). Pediatric patients, for instance, present unique challenges due to more aggressive tumor behaviour and a higher risk of intraoperative complications [5, 7, 21, 22]. In our review, four children (11.1%) were identified, with a mean age of 5.75 ± 3.8 years; three had atypical and one had anaplastic meningioma. Li *et al.* reported a 2-year-old child with a $14.2 \times 13.5 \times 11.1$ cm occipitotemporo-parietal tumor featuring necrosis, vascularity, and bone erosion. The patient underwent staged resection but experienced two episodes of hemorrhagic shock, including one with unrecordable intraoperative blood pressure; nonetheless, gross total resection was achieved, and the child remained recurrence-free at 5 years [5]. Similarly, Savateev *et al.* described a 10-year-old with an 11×8.5 cm parasagittal tumor extending intra- and extracranially with SSS invasion; initial surgery was aborted due to hemorrhage, and the tumor was removed during a second-stage operation, followed by complete recovery and adjuvant stereotactic radiotherapy [18]. Other cases, such as those reported by Honda and Doxtader, involved high-grade meningiomas with recurrence or metastasis despite surgical resection [21, 22]. These pediatric cases highlight the need for cautious, individualized, and often staged approaches as well as long-term postoperative surveillance.

Vascular complexity and middle third SSS involvement

Vascular factors, particularly SSS invasion, high tumor vascularity, and dependence on collateral venous pathways, pose significant challenges in resecting giant parasagittal and falcine meningiomas [7, 9, 26]. These challenges are especially pronounced when the tumor involves the middle third of the SSS, a region closely associated with the eloquent cortex and prominent bridging veins such as the rolandic and precentral veins [5]. In our review, nine cases (37.5%) demonstrated involvement of the middle third segment, resulting in SSS occlusion. Otani *et al.* (2018) utilized 3D computed tomography (CT) venography to visualize multiple rolandic veins near a 6 cm falcine tumor, enabling a gravity-assisted interhemispheric approach [9]. Similarly, Wang *et al.* (2022) described a large parasagittal meningioma infiltrating the middle third of the SSS, with CT venography revealing complete sinus occlusion and displacement of the right precentral vein [7]. Consequently, surgical strategies should prioritize the preservation of collateral venous pathways and employ patient positioning techniques that enhance cerebral venous drainage, thereby minimizing the risk of postoperative neurological deficits.

Several cases further illustrate the surgical impact of venous anatomy. In Bederson's 1995 report, partial SSS occlusion in an 8 cm parasagittal tumor led to significant sinus bleeding, requiring a staged resection [15]. In Kusdiansah's 2023 case, CT venography revealed complete SSS occlusion with compensatory diploic vein bypass. This finding led the surgical team to design an "L"-shaped craniotomy that preserved venous outflow, allowing for safe resection without compromising the bypass [28]. Rajagopal (2022) described a case with complete sinus blockage and prominent bridging vein networks, which necessitated an intrinsic resection strategy to avoid venous infarction [19]. Li and Gotohda each reported highly vascular tumors that resulted in intraoperative hemorrhagic shock; in Gotohda's case, prior embolization of arterial feeders made resection safer [5, 14]. Psaras *et al.* (2009) were only able to do subtotal resection of a middle-third SSS tumor due to dense sinus adherence and bleeding; tumor recurrence and lung metastasis developed 15 years later [27].

Falcine vs parasagittal meningioma

Finally, tumor location plays a key role in determining surgical complexity. Parasagittal meningiomas are generally more challenging to resect than falcine tumors due to higher rates of SSS invasion, peritumoral edema, and hyperostotic bone changes [16, 20, 22]. In this review, 18 cases (64.3%) of parasagittal meningiomas invaded the SSS, compared to just 3 cases (10.7%) of falcine tumors. Parasagittal tumors more frequently exhibited vasogenic edema, which complicates resection and recovery. For example, Walker *et al.* (2023) described a parasagittal tumor with extensive edema and intraoperative evidence of pial invasion [16]. Similarly, Bederson (1995) and Okunlola (2024) reported neurological decline associated with peritumoral edema and cystic changes [15, 20]. Hyperostosis further complicates surgery in parasagittal lesions. Rajagopal (2022) described hypervascular bone overlying a parasagittal tumor requiring a sinus-sparing approach [19]. Moreover, Savateev (2016) and Wang *et al.* (2016) noted cases where bony hyperostosis contributed to increased intracranial pressure, prompting decompressive craniectomy [6, 18]. Overall, these findings highlight parasagittal meningiomas are often more invasive and technically demanding than their falcine counterparts.

Discussion

Gross total resection (GTR) remains the primary surgical goal in the management of meningiomas due to its consistently superior outcomes in progression-free survival (PFS) and overall survival (OS), as demonstrated across multiple studies [31–34]. In our review, GTR was

achieved in 75.7% of patients, while STR was performed in 10.8%. Soyuer *et al.* (2004), reported significantly higher 5-year PFS rates in patients undergoing GTR compared to STR (77% vs. 52%, $p=0.02$) [35]. Similarly, Aizer *et al.* (2014) reported improved 5-year OS in patients with atypical and malignant meningiomas who underwent GTR [36]. Sun *et al.* (2015) also demonstrated superior PFS rates in favor of GTR [37]. In pediatric populations, Wach *et al.* (2025) reported significantly longer PFS and OS for GTR over STR based on pooled data from 20 studies (PFS: 113.8 vs. 40.1 months; OS: 602.9 vs. 173.8 months; both $p<0.001$) [31].

In this review, the extent of resection was recorded as described by the original authors. Most studies defined GTR as Simpson Grade I–III removal, consistent with evidence showing no significant difference in recurrence between these grades when modern microsurgical techniques are used [38]. In cases with SSS invasion or occlusion, GTR often referred to complete macroscopic removal of the extraluminal component with preservation or reconstruction of venous outflow. For example, Aguiar *et al.* (2022) achieved favorable outcomes following Simpson Grade II resection and sinus preservation, while Alzughaybi *et al.* (2024) and Aboud *et al.* (2021) reported complete excision of tumors invading occluded sinus segments, the latter with venous graft reconstruction. Consistent with this strategy, Sirko *et al.* (2022) and Kvasha & Spiridonov (2024) showed that tailoring the extent of resection to preoperative assessment of SSS patency and collateral venous outflow can increase completeness (Simpson Grade I–II) while lowering complications and subsequent tumor regrowth [40] [41].

Conversely, when safe sinus resection was not feasible, subtotal removal followed by observation or adjuvant radiotherapy was employed, as illustrated by Psaras *et al.* (2009) and Kusdiansah *et al.* (2023) [27,28]. Thus, the 28 cases labeled as GTR in this review should be interpreted within this context of “functional total resection,” emphasizing maximal tumor removal while maintaining venous integrity. This approach reflects the current surgical philosophy that achieving a balance between radicality and preservation of venous drainage is crucial in the management of giant parasagittal and falicine meningiomas.

Despite its benefits, GTR is not always feasible, particularly in giant parasagittal or falicine meningiomas with high vascularity, SSS invasion, or proximity to eloquent cortex. For example, Savateev (2016) reported the need for staged resection due to intraoperative hemorrhage risk, resulting in a Simpson Grade IV resection [18]. Similarly, Li *et al.* (2016) described a successful two-stage GTR in a highly vascular pediatric tumor with bone erosion and mass effect [5]. These cases highlight that STR followed by delayed resection

may be a safe and pragmatic alternative. In elderly patients, since the risk of recurrence may be unlikely within the patient’s lifetime, and if the tumors are adjacent to critical structures, STR may be preferable. GTR may not confer significant survival benefits [42]. Studies by Psaras *et al.* (2009), Kusdiansah *et al.* (2023), and Karthigeyan *et al.* (2018) support STR with adjuvant radiotherapy or delayed GTR as effective strategies for long-term symptom control and favorable outcomes [27, 28, 30]. Therefore, while GTR should be pursued when safely achievable, STR remains a valid option to balance oncological control with surgical safety in selected cases.

Although tumor size often contributes to surgical complexity, our analysis suggests that biological behavior and tumor aggressiveness are more critical determinants. In our review, 72.2% of patients had favorable postoperative outcomes despite large tumor size, indicating that size alone is not a reliable predictor of surgical difficulty or outcome. Aggressive features—such as high vascularity, sinus invasion, and intraosseous extension—were more strongly associated with intraoperative challenges [5, 18, 26]. Pediatric patients, in particular, frequently presented with WHO grade II or III tumors requiring complex or staged resections. For instance, Savateev *et al.* (2016) described a 10-year-old with a large parasagittal meningioma invading both the SSS and the skull; although initially suspected to be grade I, the tumor was confirmed as atypical (grade II) during surgery [18]. The operation was halted due to life-threatening hemorrhage. Arivazhagan *et al.* (2008) and Tufan *et al.* also reported increased surgical risks and the need for staged operations in pediatric patients, primarily due to excessive bleeding [43, 44]. Lakhdar *et al.* (2010) identified radiographic signs—such as hyperostosis and intracranial hypertension that indicated aggressive tumor behavior, regardless of tumor size [45]. These findings underscore the need for further large-scale studies to clarify the association between tumor behavior and surgical complexity, particularly in high-risk populations.

Management of meningiomas involving the SSS, especially those affecting the middle third, remains controversial due to the complexity of venous anatomy and functional implications. Some authors including Aboud *et al.* (2021) and Sindou *et al.* (1997) advocate sinus reconstruction. They recommend resecting the invaded segment and restoring venous flow using autologous grafts when collateral drainage is insufficient [13, 46]. Sindou emphasized that reconstruction may help maintain venous circulation and prevent delayed complications even in completely occluded sinuses [15, 46]. Conversely, other studies challenge this approach. Wang *et al.* (2016) found that in cases of complete sinus

occlusion with adequate collateral flow, reconstruction may be unnecessary and it is associated with increased risks such as infection, prolonged operative time, and graft thrombosis. Similarly, Al-Mefty *et al.* also warned that reconstruction in well-collateralized sinuses could compromise critical cortical veins with limited benefit [6, 15]. In our review, SSS invasion was observed in 78.6% of cases, with complete occlusion in 64.3%, predominantly involving the middle third. While favorable outcomes following sinus reconstruction have been reported by Bederson (1995) and Aboud (2021), the decision to reconstruct should be individualized based on sinus patency, collateral circulation, anatomical location, and patient-specific factors [13, 15]. Reconstruction may be beneficial in select cases but is not universally required.

Surgical outcomes for giant parasagittal and falcine meningiomas are generally favorable, though complications and recurrences remain possible, especially in tumors with aggressive features or critical anatomical involvement. In our series, 72.2% of patients had favorable outcomes, while 16.7% experienced mild neurological deficits including hemiparesis, seizures, or cranial nerve palsies. Poor outcomes (11.1%) were mainly due to recurrence, progressive disease, or metastasis. Özsoy *et al.* highlighted the role of tumor location: among parasagittal meningiomas, GTR was achieved in seven patients, with six experiencing good recovery, two remaining unchanged, and two showing poor outcomes, including one fatality due to cerebral edema. In contrast, falcine meningiomas had more favorable results: seven out of eight underwent total resection, five experienced good recovery, and only one death occurred due to postoperative meningitis, with no recurrence reported [47].

Kalfas *et al.* reported that 87% of patients with parasagittal and falcine meningiomas experienced no complications postoperatively, with brain edema being the most common complication, although none required surgical intervention [32]. Similarly, Narayan *et al.* reported a 5% operative mortality rate in patients with large meningiomas (≥ 5 cm), while Yaşar *et al.* observed no deaths among patients with giant tumors who underwent Simpson grade I or II resections [4, 8].

This study presents a focused exploratory analysis of the surgical challenges associated with giant parasagittal and falcine meningiomas, emphasizing key factors such as sinus invasion, vascular complexity, and anatomical constraints. Synthesizing detailed case-level data offers practical insights that may inform surgical planning and guide future research. However, limitations include the heterogeneity and incompleteness of available reports, variability in surgical techniques, and short-term follow-up, all of which restrict the generalizability of the

findings. Further large-scale studies are warranted to validate these observations and develop standardized management protocols.

Conclusion

Giant parasagittal and falcine meningiomas pose significant surgical challenges, primarily due to SSS invasion, vascular complexity, and high-grade pathology in pediatric cases. Parasagittal tumors, particularly with middle-third SSS involvement, are associated with greater technical difficulty and surgical risk. Despite these factors, gross total resection and favorable outcomes can be achieved in most cases. Optimal results depend on careful preoperative venous assessment and individualized surgical strategies that balance maximal tumor resection with preservation of critical venous structures.

Disclosure

Clinical trial number

Not applicable.

Competing interests

The authors declare that there is no conflict of interest regarding publication of this paper.

Funding

No funding is available

Authors' contributions

TAN and NA conceptualized the study, designed the protocol and methodology, conducted the literature search and article screening, and contributed to drafting the manuscript. FB, DWW, and FB2 assisted in drafting the manuscript, supervised the overall process, and validated the findings. All authors read and approved the final version of the manuscript.

Acknowledgments

We thank all contributors for their work in creating the paper.

Consent to Publish declaration

Not applicable.

References

1. Byard RW, Bourne AJ, Clark B, Hanieh A. Clinicopathological and radiological features of two cases of intraventricular meningioma in childhood. *Pediatr Neurosci.* 1989;15(5):260-4. doi: 10.1159/000120478
2. Casali C, Del Bene M, DiMeco F. Falcine meningiomas. *Handb Clin Neurol.* 2020;170:101-106. doi: 10.1016/B978-0-12-822198-3.00032-X
3. Black P, Kathiresan S, Chung W. Meningioma surgery in the elderly: a case-control study assessing morbidity and mortality. *Acta Neurochir (Wien).* 1998;140(10):1013-6; discussion 1016-7. doi: 10.1007/s007010050209
4. Narayan V, Bir SC, Mohammed N, Savardekar AR, Patra DP, Nanda A. Surgical Management of Giant Intracranial Meningioma: Operative Nuances, Challenges, and Outcome. *World Neurosurg.* 2018 Feb;110:e32-e41. doi: 10.1016/j.wneu.2017.09.184
5. Li J, Mzimhiri JM, Zhao J, Zhang Z, Liao X, Liu J. Surviving the Largest Atypical Parasagittal Meningioma in a 2-Year-

- Old Child: A Case Report and a Brief Review of the Literature. *World Neurosurg.* 2016 Mar;87:662.e1-6. doi: 10.1016/j.wneu.2015.10.078
6. Wang X, Wu R, Zhang P, Zhang C, Song G, Gao Z. Superior Sagittal Sinus Obstruction by Giant Meningiomas: Is Total Removal Feasible? *World Neurosurg.* 2016 Oct;94:111-119. doi: 10.1016/j.wneu.2016.06.113
 7. Wang H, Yang Z, You H, Song J. How I do it: the surgical resection of a middle third parasagittal meningioma with venous preservation strategy. *Acta Neurochir (Wien).* 2022 May;164(5):1385-1389. doi: 10.1007/s00701-022-05129-6
 8. Yaşar S, Kırık A. Surgical Management of Giant Intracranial Meningiomas. *Eurasian J Med.* 2021 Jun;53(2):73-78. doi: 10.5152/eurasianjmed.2021.20155
 9. Otani N, Wada K, Toyooka T, Mori K. Occipital Interhemispheric Approach for Surgical Removal of the Middle Third Falx Meningioma: Two Case Reports. *Asian J Neurosurg.* 2018 Jul-Sep;13(3):789-791. doi: 10.4103/ajns.AJNS_158_16
 10. Bansal C, Shah H, Bora SK, Suri A. Middle third falcine meningiomas-surgical nuances for cortical venous preservation. *Acta Neurochir (Wien).* 2024 May 18;166(1):220. doi: 10.1007/s00701-024-06088-w
 11. Luther E, Ramsay I, Berke C, Makhoul V, Lu V, Elarjani T, Burks J, Berry K, Eichberg DG, Di L, Mansour S, Echeverry N, Morell A, Ivan M, Komotar R. Widening the Operative Corridor-Evaluating the Transcortical Approach to Giant Falcine Meningiomas. *World Neurosurg.* 2024 May;185:e442-e450. doi: 10.1016/j.wneu.2024.02.046
 12. Dudley RWR, Torok MR, Randall S, Béland B, Handler MH, Mulcahy-Levy JM, Liu AK, Hankinson TC. Pediatric versus adult meningioma: comparison of epidemiology, treatments, and outcomes using the Surveillance, Epidemiology, and End Results database. *J Neurooncol.* 2018 May;137(3):621-629. doi: 10.1007/s11060-018-2756-1
 13. Aboud E, Tamer WA, Ibn Essayed W, Al-Mefty O. Resection of Giant Invasive Parasagittal Atypical Meningioma With a Venous Graft Reconstruction of the Sagittal Sinus: 2-Dimensional Operative Video. *Oper Neurosurg.* 2021 Sep 15;21(4):E332-E333. doi: 10.1093/ons/opab232
 14. Gotohda K, Uchino A, Suzuki T, Mishima K, Homma T, Miyama Y, Baba Y. Acute subdural hematoma caused by hemorrhagic falx meningioma: A case report and review of the literature. *Radiol Case Rep.* 2024 Apr 24;19(7):2804-2811. doi: 10.1016/j.radcr.2024.03.056
 15. Bederson JB, Eisenberg MB. Resection and replacement of the superior sagittal sinus for treatment of a parasagittal meningioma: technical case report. *Neurosurgery.* 1995 Nov;37(5):1015-8; discussion 1018-9. doi: 10.1227/00006123-199511000-00026
 16. Walker SE, Kaoutzani L, Vale FL. Supplementary Motor Area Syndrome After Resection of a Dominant Hemisphere Parasagittal Meningioma: A Case Report. *Neurosurg Pract.* 2023 Oct 13;4(4):e00067. doi: 10.1227/neuprac.0000000000000067
 17. Dimou S, Nehoff HL, Jackson S. Falcine meningioma masquerading as biliary colic - Case report and literature review. *J Clin Neurosci.* 2021 May;87:66-68. doi: 10.1016/j.jocn.2021.02.004
 18. Savateev AN, Konovalov AN, Gorelyshev SK, Satanin LA, Khukhlaeva EA, Shishkina LV, Ozerova VI, Valiakhmetova EF, Medvedeva OA. A giant hyperostotic parasagittal meningioma in a child with neurofibromatosis type II (a case report and literature review). *Zh Vopr Neirokhir Im N N Burdenko.* 2016;80(6):66-73. English, Russian. doi: 10.17116/neiro201680666-73
 19. Rajagopal M, Toms J, Graham RS. Meningioma with holo-sagittal sinus involvement treated successfully with intrinsic sinus surgery: illustrative case. *J Neurosurg Case Lessons.* 2022 Apr 18;3(16):CASE21710. doi: 10.3171/CASE21710
 20. Okunlola AI, Ibijola AA, Babalola OF, Okunlola CK, Erinomo OO. Parasagittal cystic meningioma mimicking hemangioblastoma: A case report. *Surg Neurol Int.* 2021 Jul 27;12:368. doi: 10.25259/SNI_507_2021
 21. Honda Y, Shirayama R, Morita H, Kusuohara K. Pulmonary and pleural metastasis of intracranial anaplastic meningioma in a 3-year-old boy: A case report. *Mol Clin Oncol.* 2017 Oct;7(4):633-636. doi: 10.3892/mco.2017.1375
 22. Doxtader EE, Butts SC, Holsapple JW, Fuller CE. Aggressive pediatric meningioma with soft tissue and lymph node metastases: a case report. *Pediatr Dev Pathol.* 2009 May-Jun;12(3):244-8. doi: 10.2350/08-07-0501.1
 23. Alzughabi RA, Almuhammadi GA, Alasmari SS, Khoja MM, Almashni AA. Challenging Resection of Bilateral Parasagittal and Falcine Meningioma Involving Both Anterior Third and Middle Third of the Superior Sagittal Sinus: A Case Report and Literature Review. *Cureus.* 2024 Jul 18;16(7):e64865. doi: 10.7759/cureus.64865
 24. Hassan M, Salman I, Salman A, Tofan S, Salman I. Massive cystic falcine meningioma presented with slight symptoms: a case report. *Ann Med Surg (Lond).* 2024 Apr 29;86(6):3766-3769. doi: 10.1097/MS9.0000000000002108
 25. Sim SK, Khairul Aizad A, Lim SS, Wong A. Large falcine meningioma presented as treatment-resistant depression: A case report. *Med J Malaysia.* 2019 Feb;74(1):87-89.
 26. Papadimitriou K, Rocca A, Dunet V, Daniel RT. Feeding artery aneurysms associated with large meningiomas: case report and review of the literature. *Heliyon.* 2020 May 28;6(5):e04071. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04071
 27. Psaras T, Pantazis G, Steger V, Meyermann R, Honegger J, Beschoner R. Benign meningioma developing late lung metastases: case report and review of the literature. *Clin Neuropathol.* 2009 Nov-Dec;28(6):453-9. doi: 10.5414/npp28453
 28. KUSDiansah M, Benet A, Ota N. Adaptive Diploic Vein Bypass of the Superior Sagittal Sinus in a Large Falcine Meningioma. *World Neurosurg.* 2023 Jul;175:45-46. doi: 10.1016/j.wneu.2023.04.023
 29. Mathuriya SN, Vasishtha RK, Khandelwal N, Pathak A, Sharma BS, Khosla VK. Calcified falx meningioma. *Neurol India.* 2000 Sep;48(3):285-7.
 30. Karthigeyan M, Rajasekhar R, Salunke P, Singh A. Modified unilateral approach for mid-third giant bifalcine meningiomas: resection using an oblique surgical trajectory and falx window. *Acta Neurochir (Wien).* 2019 Feb;161(2):327-332. doi: 10.1007/s00701-018-3770-y
 31. Wach J, Vychopen M, Basaran AE, Tatagiba M, Goldbrunner R, Güresir E. Overall survival and progression-free survival in pediatric meningiomas: a systematic review and individual patient-level meta-analysis. *J Neurooncol.* 2025 Apr;172(2):289-305. doi: 10.1007/s11060-024-04917-7
 32. Kalfas F, Scudieri C. Neurosurgical Management of Parasagittal and Falcine Meningiomas: Judicious Modern Optimization of the Results in a 100-Case Study. *Asian J Neurosurg.* 2019 Nov 25;14(4):1138-1143. doi: 10.4103/ajns.AJNS_245_18
 33. Armocida D, Catapano A, Palmieri M, Arcidiacono UA, Pesce A, Cofano F, Picotti V, Salvati M, Garbossa D, D'Andrea G, Santoro A, Frati A. The Surgical Risk Factors of Giant Intracranial Meningiomas: A Multi-Centric Retrospective Analysis of Large Case Serie. *Brain Sci.* 2022 Jun 22;12(7):817. doi: 10.3390/brainsci12070817
 34. Hua L, Wang D, Zhu H, Deng J, Luan S, Chen H, Sun S, Tang H, Xie Q, Wakimoto H, Gong Y. Long-term outcomes of multimodality management for parasagittal meningiomas.

- J Neurooncol. 2020 Apr;147(2):441-450. doi: 10.1007/s11060-020-03440-9
35. Soyuer S, Chang EL, Selek U, Shi W, Maor MH, DeMonte F. Radiotherapy after surgery for benign cerebral meningioma. *Radiother Oncol.* 2004 Apr;71(1):85-90. doi: 10.1016/j.radonc.2004.01.006
 36. Aizer AA, Arvold ND, Catalano P, Claus EB, Golby AJ, Johnson MD, Al-Mefty O, Wen PY, Reardon DA, Lee EQ, Nayak L, Rinne ML, Beroukhi R, Weiss SE, Ramkissoon SH, Abedalthagafi M, Santagata S, Dunn IF, Alexander BM. Adjuvant radiation therapy, local recurrence, and the need for salvage therapy in atypical meningioma. *Neuro Oncol.* 2014 Nov;16(11):1547-53. doi: 10.1093/neuonc/nou098
 37. Sun SQ, Hawasli AH, Huang J, Chicoine MR, Kim AH. An evidence-based treatment algorithm for the management of WHO Grade II and III meningiomas. *Neurosurg Focus.* 2015 Mar;38(3):E3. doi: 10.3171/2015.1.FOCUS14757
 38. Chotai S, Schwartz TH. The Simpson Grading: Is It Still Valid? *Cancers (Basel).* 2022 Apr 15;14(8):2007. doi: 10.3390/cancers14082007
 39. Aguiar PHP, Dos Santos RRP, Marson FAL, Dezena RA, Rampazzo ACMR. What is the ideal grade of resection for parasagittal meningiomas with the invasion of superior sagittal sinus? Simpson I or Simpson II resection? A retrospective observational study. *Surg Neurol Int.* 2022 Sep 16;13:423. doi: 10.25259/SNI_436_2022
 40. Sirko AH, Perepelytsia VA. Parasagittal meningiomas: surgical treatment outcomes. *Ukr Neurosurg J.* 2022 Sep;29;28(3):33-42. doi: 10.25305/unj.259324
 41. Kvasha MS, Spiridonov AV. Surgical treatment of meningiomas invading the superior sagittal sinus. *Ukr Neurosurg J.* 2024 Dec;30;30(4):51-6. doi: 10.25305/unj.312398
 42. Amoo M, Henry J, Farrell M, Javadpour M. Meningioma in the elderly. *Neurooncol Adv.* 2023 Jun 3;5(Suppl 1):i13-i25. doi: 10.1093/noonajnl/vdac107
 43. Arivazhagan A, Devi BI, Kolluri SV, Abraham RG, Sampath S, Chandramouli BA. Pediatric intracranial meningiomas—do they differ from their counterparts in adults? *Pediatr Neurosurg.* 2008;44(1):43-8. doi: 10.1159/000110661
 44. Tufan K, Dogulu F, Kurt G, Emmez H, Ceviker N, Baykaner MK. Intracranial meningiomas of childhood and adolescence. *Pediatr Neurosurg.* 2005 Jan-Feb;41(1):1-7. doi: 10.1159/000084858
 45. Lakhdar F, Arkha Y, El Ouahabi A, Melhaoui A, Rifi L, Derraz S, El Khamlichi A. Intracranial meningioma in children: different from adult forms? A series of 21 cases. *Neurochirurgie.* 2010 Aug;56(4):309-14. doi: 10.1016/j.neuchi.2010.05.008
 46. Sindou M. Meningiomas invading the sagittal or transverse sinuses, resection with venous reconstruction. *J Clin Neurosci.* 2001 May;8 Suppl 1:8-11. doi: 10.1054/jocn.2001.0868
 47. Özsoy KM, Ökten Aİ, Ateş T, Arslan A, Menekşe G, Çikili M, Güzel A. Intracranial benign giant meningiomas: a clinical analysis of 56 cases. *Neurosurgery Quarterly.* 2013 Feb 1;23(1):27-32. doi: 10.1097/WNQ.0b013e318266c501

Чинники, що зумовлюють хірургічну складність при гігантських парасагітальних і фалькс-менінгіомах: огляд клінічних випадків

Томмі А. Назвар ¹, Насім Амар ², Фархад Бальяфіф ¹, Донні В. Вардхана ¹, Факрій Бальяфіф ¹

¹ Відділення нейрохірургії, Хірургічний департамент, Медичний факультет Університету Бравіджая — Загальна лікарня Сайфул Анвар, Маланг, Східна Ява, Індонезія
² Медичний факультет, Університет Бравіджая — Загальна лікарня Сайфул Анвар, Маланг, Східна Ява, Індонезія

Надійшла до редакції 07.09.2025
 Прийнята до публікації 16.10.2025

Адреса для листування:

Tommy A. Nazwar, Division of Neurosurgery, Department of Surgery, Brawijaya University/ Saiful Anwar General Hospital, GPT II Building, 2nd Floor, Malang, East Java, 65112, Indonesia, email: tommy@ub.ac.id

Гігантські парасагітальні й фалькс-менінгіоми асоціюються зі значною хірургічною складністю через часте ураження верхнього сагітального синуса (SSS), близькість до функціонально важливої кори та складну венозну анатомію. Незважаючи на високі операційні ризики, детальний аналіз технічних труднощів у літературі обмежений.

Мета: визначити ключові чинники хірургічної складності при гігантських парасагітальних і фалькс-менінгіомах, зокрема розмір пухлини, ураження SSS, анатомічні обмеження, інтраопераційне прийняття рішень, з акцентом на баланс між радикальністю втручання та безпекою пацієнта.

Матеріали і методи. Проведено нарративний огляд і синтез багатоваріантних випадків, проаналізовано 22 опублікованих джерела (19 клінічних випадків і 3 серії), в яких описано мікрохірургічне лікування гігантських парасагітальних і фалькс-менінгіом. Відбір публікацій проводили за принципом PICOS з акцентом на пухлини розміром ≥ 5 см, з оригінальними даними щодо хірургії та результатів лікування. Аналізували такі змінні: демографічні дані, розміри пухлини, локалізація, ураження SSS, гістологія, хірургічна техніка та клінічні результати.

Результати. Виявлено 36 пацієнтів. Більшість пухлин були парасагітальними (52,8%), уражали середню третину SSS (38,9%) і демонстрували інвазію в SSS (78,6%), із повною оклюзією в 64,3% випадків. Повного видалення пухлини досягнуто в 75,7% випадків. У педіатричних пацієнтів (11,1%) виявлено більшу частоту пухлин високого ступеня злякості й інтраопераційних ускладнень. Пухлини середньої третини SSS і парасагітальної локалізації послідовно асоціювалися з підвищеною технічною складністю, венозною кровотечею та післяопераційними дефіцитами. У 72,2% пацієнтів зареєстровано відновлення, у 11,1% — несприятливі результати (рецидив або смерть).

Висновки. Хірургічне лікування гігантських парасагітальних і фалькс-менінгіом є технічно складним, особливо в дітей та у випадках ураження парасагітальної ділянки або середньої третини SSS. Ретельна доопераційна оцінка венозної анатомії та індивідуалізовані хірургічні стратегії є ключовими для оптимізації резекції та мінімізації ускладнень.

Ключові слова: парасагітальна менінгіома; фалькс-менінгіома; гігантська менінгіома; хірургічна складність

Ukrainian Neurosurgical Journal. 2026;32(1):60-68
doi: 10.25305/unj.339497

Global research trends on seizure detection in critical care after decompressive craniectomy: A bibliometric analysis

Kuat Widodo, Saryono, Novita Anggraeni

Department of Nursing, Jenderal Soedirman University, Purwokerto, Indonesia

Received: 17 September 2025

Accepted: 03 November 2025

Address for correspondence:

Kuat Widodo, Departemen of Nursing, Jenderal Soedirman University, Jalan Prof. Dr. HR. Boenjamin 708, Purwokerto 53122, Indonesia, e-mail: kuat.widodo@mhs.unsoed.ac.id

Background: Postoperative seizures are a recognized complication following decompressive craniectomy (DC); the global research landscape regarding seizure detection in this context remains insufficiently characterized. Bibliometric mapping provides insights into emerging trends and knowledge gaps.

Objective: This study aims to map and evaluate international research output on seizure detection in critically ill patients after decompressive craniectomy.

Methods: Relevant literature was collected from Scopus, PubMed, CrossRef, and Google Scholar using the terms 'decompressive craniectomy AND seizure AND detected' via the Publish or Perish software. Records were exported in RIS format and analysed with VOSviewer to generate keyword co-occurrence networks, cluster maps, and temporal trend visualizations.

Results: A total of 1,605 publications from 2015–2025 were analyzed. Annual research volume increased, particularly since 2018. The co-occurrence network analysis identified four thematic clusters: (1) clinical outcomes and prognosis, (2) surgical techniques and perioperative management, (3) intracranial pressure and monitoring strategies, and (4) seizure detection and critical neurological care. Overlay analysis revealed a gradual thematic shift toward seizure monitoring and electroencephalography EEG-based approaches in recent years, while density visualization confirmed that seizure detection remains an emerging but relatively underdeveloped research area. The most prolific contributor was identified with 126 publications.

Conclusion: Although publications on decompressive craniectomy have grown rapidly, seizure detection remains a relatively small but growing research topic. Increased focus on neurocritical monitoring indicates future opportunities for developing evidence-based protocols and collaborative studies in this field.

Keywords: *decompressive craniectomy; seizure detection; intensive care; bibliometric studies; VOSviewer*

Introduction

Decompressive craniectomy (DC) is a crucial surgical intervention often performed to reduce intracranial pressure in patients with severe brain injury, ischaemic or haemorrhagic stroke who experience refractory cerebral oedema [1-3]. Although DC can save lives by reducing herniation and improving cerebral perfusion, the procedure also places patients at risk of short-term and long-term neurological complications [4-6].

One of the most commonly reported complications is seizures. Seizures in post-DC patients not only worsen neurological dysfunction but are also associated with increased length of intensive care, morbidity, and mortality [7,8]. Therefore, early detection and monitoring of seizures in the critical care unit is an important aspect of postoperative management. The prevalence of post-craniotomy seizures varies, generally ranging from 3% to 30% in various studies, depending on the patient's condition and the type of surgical procedure performed [9, 10].

Clinical challenges surrounding seizure detection in the complex post-DC population: seizures can be clinical

or subclinical (non-convulsive), and clinical signs are often masked by sedation, paralysis, or comorbid medical conditions, making clinical-based detection difficult. In this context continuous electroencephalography (cEEG) monitoring, automatic detection algorithms, multimodal monitoring including EEG, intracranial pressure, oximetry), and other non-invasive techniques play a crucial role [11-13].

However, the diversity of protocols, resource availability, variations in seizure definitions, and differences in reported outcomes make the consolidation of clinical knowledge and research challenging.

Although seizures are a common complication after severe brain injury, patients undergoing decompressive craniectomy represent a distinct subgroup due to their altered intracranial physiology and cortical exposure. This subgroup requires specific EEG monitoring approaches and postoperative management strategies, justifying the bibliometric focus on this population.

Over the past two decades, the literature on post-DC seizure detection has grown alongside advances in monitoring technology about portable EEG, machine

Copyright © 2026 Kuat Widodo, Saryono, Novita Anggraeni



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

learning for EEG pattern detection and increased awareness of the importance of subclinical seizures [14-16]. In the present study, we employed bibliometric approach to describe research trends about seizure in post decompressive craniectomy patient based on numerous case studies such as case series, observational studies, and a number of narrative or systematic reviews.

The reasons for choosing bibliometric studies on this topic are based on several practical and scientific considerations. First, there has been no bibliometric study that systematically maps global trends in research on seizure detection in post-DC with outcomes in intensive care. Second, bibliometric research can also identify methodological trends, whether studies tend to be observational, experimental, or registry-based, thereby providing input for stronger study designs in the future. Third, the identification of international collaboration networks and funding sources can assist policymakers and researchers in designing collaboration strategies or resource allocation.

Given the complexity of clinical phenomena involved and the heterogeneity of the literature, bibliometric studies must be conducted with a clear scope regarding the range of publication years, databases and structured keywords. Analysis methods may involve basic quantitative metrics such as annual publication numbers, citations and H-index. Network analyses — such as author collaboration, citation collaboration, and bibliographic linking — as well as topic modelling or clustering using VOSviewer, CiteSpace, or other bibliometric tools, can be used to identify research trends and topic evolution over time.

Although the number of publications related to decompressive craniectomy has increased rapidly, research on the detection of post-DC seizures is still relatively limited, fragmented, and mostly in the form of observational studies or case reports. In addition, there has been no bibliometric analysis that specifically maps global trends, collaborations, and the direction of research development in this field.

Therefore, this study aims to present a bibliometric mapping of seizure detection in critically ill patients after decompressive craniectomy, thereby providing a foundation for future research development, clinical practice, and health policy.

Materials and methods

Study design

This study employed a bibliometric design to describe publication trends, author collaborations, and research topics related to seizure detection in patients after decompressive craniectomy in the last decades from 2015-2025.

Data sources and search strategy

Bibliographic data were collected from four main sources: Scopus, CrossRef, PubMed, and Google Scholar. Scopus was selected as the primary source due to its broad coverage and high indexing standards. CrossRef was used to obtain publication metadata including titles, authors, publication years, digital object identifiers (DOIs), journal names, and citations. PubMed was selected because it is relevant to the fields of medicine

and critical care nursing, and provides peer-reviewed literature in the fields of neuroscience and intensive care. Google Scholar was used to supplement the literature search with a broader range of publications, including articles that may not be indexed in traditional databases. Data collection was carried out using the latest version of Publish or Perish software, which can extract publication metadata from these three sources in RIS format. The search strategy was formulated using a combination of the keywords 'decompressive craniectomy' AND 'seizures' AND 'detected' and complete Boolean operators such as "decompressive craniectomy" OR "craniectomy" AND "seizure" OR "epilepsy" OR "convulsion" AND "detection" OR "monitoring" OR 'EEG' OR "continuous EEG". The search was limited to the year range between 2015 and 2025, publication type must be research articles and reviews, in English and research procedure.

The search was restricted to the period from 2015-2025 in order to capture the post-digital monitoring era, during which continuous EEG and algorithmic seizure detection became more widespread in critical care and neurosurgical settings.

Data analysis

Vosviewer

The analysis was performed using the latest VOSviewer software (version 1.6.19) with the following steps: Descriptive bibliometric analysis: calculating the number of publications per year, journal distribution, citations, and H-index. Network analysis by Co-authorship: to map author and institutional collaborations, Co-citation: to identify the most influential references and Keyword co-occurrence: to find dominant research topics (research hotspots). Bibliometric map visualisation: created with VOSviewer, producing network visualisation, density visualisation, and temporal visualisation (overlay visualisation) maps to see developments.

PRISMA flowchart

Brief methodology used by researchers during processing. RIS parsing: each RIS file is separated per entry, then common tags are extracted. Duplicate removal prioritises DOI as the key and when DOI is unavailable, normalised titles are used. Records are filtered to include only publications between 2015 ≤ year ≤ 2025. Prioritise relevance of titles, abstracts and keywords containing the terms decompressive craniectomy, craniectomy and craniotomy as well as terms related to seizures. Only documents with tags, journal indicators or articles included are retrieved. Each included record was manually screened to confirm that the population involved decompressive craniectomy or hemicraniectomy. Studies limited to closed-skull traumatic brain injury (TBI) without surgical decompression were excluded. Heuristic clinical trial method by searching for the phrases clinical trial, randomised, RCT, controlled trial, or tags containing Clinical Trial.

Results

Although 1,605 records were analysed for bibliometric mapping, only 13 met strict inclusion for detailed descriptive synthesis focusing specifically on

This article contains some figures that are displayed in color online but in black and white in the print edition.

EEG-based seizure detection following DC. This explains the apparent discrepancy between PRISMA and total bibliometric data (**Fig. 1**).

Base on mapping of research topic clusters, keywords related to decompressive craniectomy and seizure detection are distributed across several main clusters. The purple cluster focuses on seizures, detection, and neurocritical care representing research on post-operative seizure complications following craniectomy and both clinical and instrumental detection efforts. The green cluster is related to the terms management, review, craniotomy, acute subdural haematoma, and medical treatment emphasizing aspects of critical care management following DC. The blue cluster is dominated by the keywords including cranioplasty, intracranial hypertension, monitoring, and risk factors, reflecting research on postoperative intracranial pressure management and associated risks. The red cluster contains terms such as admission, Glasgow Coma Scale (GCS), discharge, mean age, outcome, and significant difference indicating a focus on patient characteristics, neurological assessment scores, and clinical outcomes. Notably, the keywords 'seizure' and 'detection' are located at the edge of the network, suggesting that these topics are still niche research area with limited connectivity compared to other major topics such as intracranial hypertension and postoperative management (**Fig. 2**).

The changes in research focus based on year of publication shows the distribution of research publication. Yellow indicates more recent research (2021–2022), while blue-violet denotes earlier research. Initial research predominantly focused on intracranial hypertension, cranioplasty, and management. In contrast, current trends (2021–2022) show an increased focus on admission characteristics, outcome measures (GOS, the Rankin scale), and seizure detection in critical care units. This indicates a shift in research from purely surgical aspects to neurological monitoring and patient outcomes, including seizure complications (**Fig. 3**).

Base on the research topic intensity and saturation level, the yellow areas indicate the most frequently occurring keywords and the focus of the research. The most prominent words are 'management', 'intracranial hypertension', and 'cranioplasty'. Meanwhile, the terms 'seizure', 'detection', and 'neurocritical care', although appearing, are still in areas with lower intensity, indicating that literature related to seizure detection after decompressive craniectomy is still relatively limited compared to other topics (**Fig. 4**).

Description

Based on **Figs. 2, 3 and 4**, research on seizure detection in patients after DC has begun to appear in the literature, but it is still marginalized compared to major themes such as intracranial hypertension management and post-operative outcomes. Recent trends show a shift in focus towards neurological monitoring, patient

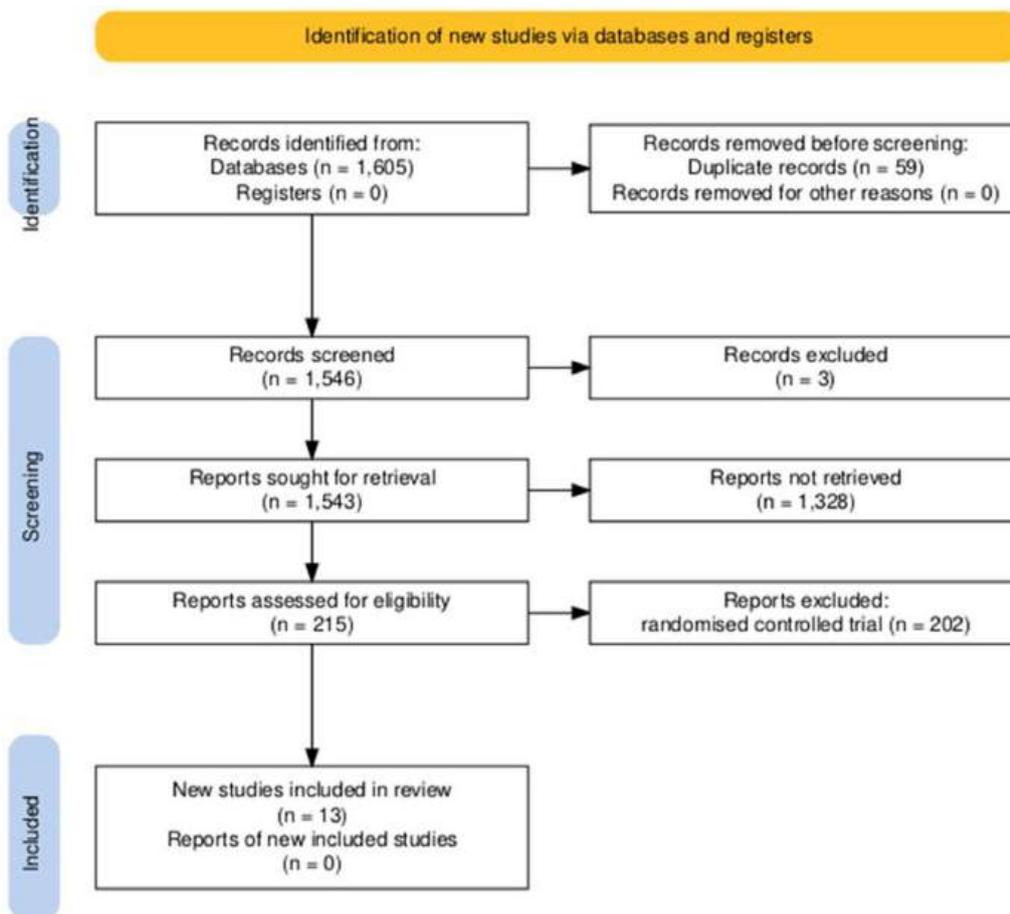


Fig. 1. PRISMA flow chart

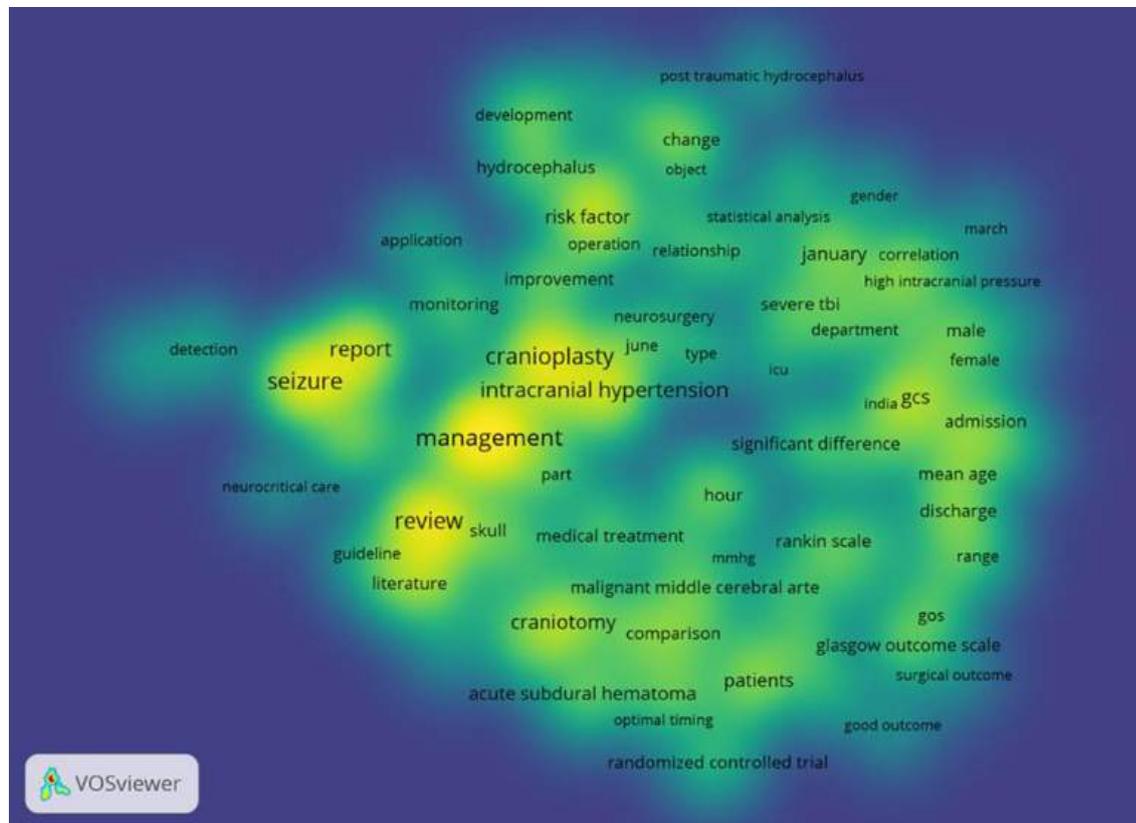


Fig. 4. Research topic intensity and saturation level

outcomes, and post-surgical complications, including seizures. These developments highlight opportunities for further research with a continuous EEG monitoring approach, the use of artificial intelligence (AI) for automatic detection, and the relationship between subclinical seizures and long-term functional outcomes.

Discussion

Bibliometric analysis shows that publications on seizure detection in patients after decompressive craniectomy increased between 2015 and 2025. This trend illustrates the growing attention of clinicians and researchers to the problem of neurological complications in the form of seizures that can affect patient outcomes in critical care units. Studies on the use of continuous EEG in the ICU support these findings, as many critically ill patients experience subclinical seizures or non-convulsive status epilepticus that can only be detected with specialised monitoring [17]. Integrated bibliometric findings, covering author productivity, international contributions, methodological characteristics, instruments, and thematic grouping (**Tables 1–3**), provide a comprehensive overview of current research trends in decompressive craniectomy and seizure detection.

Publication patterns show a dominance of developed countries, such as the United States, Europe, and Japan, which have comprehensive neurocritical facilities as summarised in **Table 3**. Conversely, contributions from developing countries remain limited due to constraints in resources, technology, and research funding. This

pattern is consistent with bibliometrics on the topic of epilepsy, where the most numerous and influential publications originate from research centres in developed countries [18, 19].

Keyword analysis using VOSviewer reveals three main clusters: continuous EEG, seizure monitoring, and neurocritical outcome. These clusters emphasise that research is not only focused on seizure identification, but also on early detection efforts and their relationship with patient clinical outcomes as shown in **Table 1 and 3**. This finding aligns with previous articles emphasising the importance of continuous EEG monitoring to detect non-convulsive seizures and their relationship with neurological outcomes [16, 20–22].

Compared with general TBI literature, publications focusing on decompressive craniectomy reveal distinct thematic patterns (**Table 1**), particularly cortical excitability and postoperative electrophysiology. While seizure risk is inherently linked to the primary brain injury, the DC procedure introduces secondary factors such as dural irritation and hemodynamic shifts which may modulate epileptogenesis. Therefore, bibliometric separation from the broader TBI population is justified to capture these unique research patterns.

The overlay map reveals a shift in research focus from descriptive studies to clinical trials assessing the effectiveness of detection methods, particularly continuous EEG. Whereas previous research mostly described phenomena, more recent publications explore new technologies, including the use of machine learning-based algorithms for automatic seizure detection [23–25].

EEG acquisition in post-craniectomy patients differs technically from conventional scalp EEG due to bone flap removal. The absence of skull attenuation enhances cortical potentials, possibly altering spectral power. Several studies place electrodes near the defect margins, whereas others employ intracranial or hybrid electrode arrays. Such heterogeneity in electrode configuration and montage contributes to methodological variation in seizure detection reports.

In terms of authors and institutions, it is evident that a number of highly productive researchers form centres of excellence in the field of neurocritical care as shown in **Table 2 and 3**. However, international collaboration in publications remains relatively limited. This presents an opportunity to expand international collaboration to standardise seizure detection worldwide. A similar phenomenon is observed in epilepsy research, where global collaboration remains suboptimal [26-28].

Most publications appear in high-impact journals such as Neurocritical Care and the Journal of Clinical Neurophysiology. Related articles are also found in general neurology and intensive care journals, demonstrating the interdisciplinary nature of this research. One example is a publication in the Journal of Intensive Care highlighting non-convulsive seizures in intensive care unit (ICU) patients [17, 29, 30].

In terms of citations, articles discussing continuous EEG monitoring received the most attention. This is understandable given that subclinical seizures are

often not identified through conventional methods. For example, research conducted in patients after brain tumour surgery have proved that non-convulsive seizures are more effectively detected using cEEG.

Temporally, publications increased sharply after 2020, coinciding with the development of bedside monitoring technology and increased clinical awareness of hidden seizures (**Table 2 and 3**). Additionally, there have been more clinical trials and research on new devices that enable real-time seizure detection using dual sensors such as accelerometers and oximeters [13, 16, 31].

However, limitations remain evident. Most publications are retrospective or based on a single research centre, resulting in insufficient external evidence. Multicentre studies with large populations and long-term observations are urgently needed to strengthen the scientific basis regarding the effectiveness of post-surgical seizure detection [32, 33].

Overall, these bibliometric findings confirm that the topic of post-decompressive craniectomy seizure detection is a rapidly developing and clinically important field. Future efforts should focus on enhancing international collaboration, conducting multicentre research, and the use of advanced, accessible technology, especially in developing countries. Evaluations of the effectiveness of detection methods should also consider aspects of sensitivity, specificity, and readiness for implementation in various healthcare settings.

Table 1. Mapping of keyword co-occurrence analysis produced several clusters

Cluster	Main topic	Keyword	Interpretation
Red	Clinical outcome	admission, GCS, discharge, outcome	Focus on the condition of patients admitted to the ICU and outcomes after discharge
Green	Management & Surgery	management, craniotomy, acute subdural hematoma	Management, craniotomy, acute subdural haematoma. Emphasises surgical aspects and critical care management
Blue	Intracranial Pressure	intracranial hypertension, monitoring, risk factor	Related to physiological complications after surgery
Purple	Seizures & Detection	seizure, detection, neurocritical care	Begins to highlight issues of clinical and subclinical seizure detection

Table 2. Mapping the most productive authors

No	Author	Number of publications	Description
1	Honeybul, Stephen	126	Numerous publications related to craniectomy & complications
2	Beucler, Nathan	10	Focus on patient outcomes
3	Kolias, Angelos G.	8	Neurosurgeon, active in DC research
4	Wettersvik, Teodor Svedung	7	Focus on neurocritical care & monitoring
5	(others)	5-7	Researchers related to DC management

Table 3. Mapping country with high contributions

No	Country	Number of publications	Main focus	Register of bibliometric
1	United States	32	cEEG, post-craniectomy outcomes, ICU seizures	Highest citation dominance
2	Germany	15	Neurotrauma, detection of seizures after TBI and stroke	Central European collaboration
3	Japan	12	Neurosurgery, post-operative monitoring of brain tumours	Many single-center studies
4	China	11	Non-invasive detection, AI algorithms for seizure detection	Increasing trend since 2020
5	United Kingdom	10	Post-DC neurological prognosis, cEEG monitoring	Focus on clinical trials
6	South Korea	9	Brain trauma, post-DC outcomes with EEG	Active neurotrauma centers
7	Canada	7	Multicenter studies, neurocritical care guidelines	Collaboration with the US
8	Italy	6	Post-stroke and DC neurological outcomes	Focus on functional outcomes
9	France	6	Neurointensive monitoring, post-operative epilepsy	Mixed cohort & trial studies
10	India	5	Limited access to EEG, clinical focus on TBI	Few publications
11	Australia	4	Small ICU & post-brain trauma studies	International collaboration
12	Netherlands	3	Outcome & seizure prediction models	Computational focus
13	Spain	3	Neuroprognosis and post-operative epilepsy	ICU Based studies
14	Turkey	2	Case studies of DC and post-operative seizures	Limited publications
15	Other countries (misc.)	5	Sporadic studies (Sweden, Brazil, Egypt, Iran, Taiwan)	Minor contributions

Conclusion

Although research on decompressive craniectomy has advanced significantly over the past two decades, yet seizure detection remains an understudied area. Increased research in this area is crucial for improving clinical outcomes and guiding evidence-based practice in the critical care management of patients following decompressive craniectomy.

Future research directions

Given the number of studies related to early detection of post-DC seizures, further research is needed. This includes multicenter cohort studies to evaluate the incidence of seizures after DC, the application of advanced EEG techniques and digital biomarkers in seizure detection, and outcome-based studies linking seizure occurrence to functional recovery, clinical trials evaluating seizure monitoring interventions, and consensus guidelines that integrate seizure detection into the DC care pathway.

Declaration of interest

There is no conflict of interest in this study

Acknowledgements

The author would like to thank the Master's Programme in Nursing, Faculty of Health Science, Jenderal Soedirman University for supporting this study.

References

1. Honeybul S, Ho KM. Decompressive craniectomy--a narrative review and discussion. *Aust Crit Care*. 2014 May;27(2):85-91. doi: 10.1016/j.aucc.2013.06.001
2. Laurent D, Mohan A, Lucke-Wold B, Hoh B. Decompressive Hemispheric Craniectomy and Suboccipital Craniectomy for Acute Ischemic Stroke. In: Ovbiagele B, Kim AS. *Ischemic Stroke Therapeutics: A Comprehensive Guide*. Springer International Publishing; 2024. P. 101-109. doi: 10.1007/978-3-031-49963-0
3. Mezue W, Ndubuisi C. Decompressive craniectomy in the management of traumatic brain injury: a review of

- current practice. *Open Access Surgery*. 2015;8:73-83 <https://doi.org/10.2147/OAS.S52742>
4. Miller CA, Coughlin DJ, Bell R. Decompressive Craniectomy for Severe TBI. In: Ecklund J, Moores L, editors. *Neurotrauma Management for the Severely Injured Polytrauma Patient*. Springer International Publishing; 2017. P. 167-191 doi: 10.1007/978-3-319-40208-6_19
 5. Pallesen LP, Barlinn K, Puetz V. Role of Decompressive Craniectomy in Ischemic Stroke. *Front Neurol*. 2019 Jan 9;9:1119. doi: 10.3389/fneur.2018.01119
 6. Venturini S, Hutchinson P, Koliass AG. Decompressive Craniectomy in the Management of Traumatic Brain Injury. In: Honeybul S, Koliass AG, editors. *Traumatic Brain Injury*. Springer; 2021. P. 205-214. doi: 10.1007/978-3-030-78075-3_20
 7. Gopalakrishnan MS, Shanbhag NC, Shukla DP, Konar SK, Bhat DI, Devi BI. Complications of Decompressive Craniectomy. *Front Neurol*. 2018 Nov 20;9:977. doi: 10.3389/fneur.2018.00977
 8. Mraček J, Mork J, Dostal J, Tupy R, Mrackova J, Priban V. Complications Following Decompressive Craniectomy. *J Neurol Surg A Cent Eur Neurosurg*. 2021 Sep;82(5):437-445. doi: 10.1055/s-0040-1721001
 9. Paquin-Lanthier G, Subramaniam S, Leong KW, Daniels A, Singh K, Takami H, Chowdhury T, Bernstein M, Venkatraghavan L. Risk Factors and Characteristics of Intraoperative Seizures During Awake Craniotomy: A Retrospective Cohort Study of 562 Consecutive Patients With a Space-occupying Brain Lesion. *J Neurosurg Anesthesiol*. 2023 Apr 1;35(2):194-200. doi: 10.1097/ANA.0000000000000798
 10. Sueiras M, Thonon V, Santamarina E, Sánchez-Guerrero Á, Riveiro M, Poca MA, Quintana M, Gándara D, Sahuquillo J. Is Spreading Depolarization a Risk Factor for Late Epilepsy? A Prospective Study in Patients with Traumatic Brain Injury and Malignant Ischemic Stroke Undergoing Decompressive Craniectomy. *Neurocrit Care*. 2021 Jun;34(3):876-888. doi: 10.1007/s12028-020-01107-x
 11. Desai M, Lewis C, Badjatia N. Multimodal Monitoring in Decompressive Craniectomy for Traumatic Brain Injury and Stroke. In: Aarabi B, Simard JM, editors. *Decompressive Craniectomy*. New York: Nova Science Publishers; 2018. P. 43-84.
 12. Makarenko S, Griesdale DE, Gooderham P, Sekhon MS. Multimodal neuromonitoring for traumatic brain injury: A shift towards individualized therapy. *J Clin Neurosci*. 2016 Apr;26:8-13. doi: 10.1016/j.jocn.2015.05.065
 13. Casault C, Couillard P, Kromm J, Rosenthal E, Kramer A, Brindley P. Multimodal brain monitoring following traumatic brain injury: A primer for intensive care practitioners. *J Intensive Care Soc*. 2022 May;23(2):191-202. doi: 10.1177/1751143720980273
 14. Freund BE, Feyissa AM, Khan A, Middlebrooks EH, Grewal SS, Sabsevitz D, Sherman WJ, Quiñones-Hinojosa A, Tatum WO. Early Postoperative Seizures Following Awake Craniotomy and Functional Brain Mapping for Lesionectomy. *World Neurosurg*. 2024 Jan;181:e732-e742. doi: 10.1016/j.wneu.2023.10.119
 15. Manzouri F, Duempelmann M, Heller S, Woias P, Schulze-Bonhage A. Patient-based feature optimization of a seizure detector for closed-loop stimulation. *Brain Stimulation: Basic, Translational, and Clinical Research in Neuromodulation*. 2019 Mar 1;12(2):411.
 16. Nouboue C, Selfi S, Diab E, Chen S, Périn B, Szurhaj W. Assessment of an under-mattress sensor as a seizure detection tool in an adult epilepsy monitoring unit. *Seizure*. 2023 Feb;105:17-21. doi: 10.1016/j.seizure.2023.01.005
 17. Kubota Y, Nakamoto H, Egawa S, Kawamata T. Continuous EEG monitoring in ICU. *J Intensive Care*. 2018 Jul 17;6:39. doi: 10.1186/s40560-018-0310-z
 18. Huo Q, Luo X, Xu ZC, Yang XY. Machine learning applied to epilepsy: bibliometric and visual analysis from 2004 to 2023. *Front Neurol*. 2024 Apr 2;15:1374443. doi: 10.3389/fneur.2024.1374443
 19. Schenck HE, Mangat HS. Towards Improved Organizational Governance of Neurotrauma Surveillance Comment on "Neurotrauma Surveillance in National Registries of Low- and Middle-Income Countries: A Scoping Review and Comparative Analysis of Data Dictionaries". *Int J Health Policy Manag*. 2023;12:7554. doi: 10.34172/ijhpm.2022.7554
 20. Brondani R, Garcia de Almeida A, Abraham Cherubini P, Mandelli Mota S, de Alencastro LC, Antunes ACM, Bianchin Muxfeldt M. High Risk of Seizures and Epilepsy after Decompressive Hemicraniectomy for Malignant Middle Cerebral Artery Stroke. *Cerebrovasc Dis Extra*. 2017;7(1):51-61. doi: 10.1159/000458730
 21. Rowberry T, Kanthimathinathan HK, George F, Notghi L, Gupta R, Bill P, Wassmer E, Duncan HP, Morris KP, Scholefield BR. Implementation and Early Evaluation of a Quantitative Electroencephalography Program for Seizure Detection in the PICU. *Pediatr Crit Care Med*. 2020 Jun;21(6):543-549. doi: 10.1097/PCC.0000000000002278
 22. Statsenko Y, Babushkin V, Talako T, Kurbatova T, Smetanina D, Simiyu GL, Habuza T, Ismail F, Almansoori TM, Gorkom KN, Szólics M, Hassan A, Ljubisavljevic M. Automatic Detection and Classification of Epileptic Seizures from EEG Data: Finding Optimal Acquisition Settings and Testing Interpretable Machine Learning Approach. *Biomedicines*. 2023 Aug 24;11(9):2370. doi: 10.3390/biomedicines11092370
 23. Chawla D, Sharma E, Rajab N, Łajczak P, Silva YP, Baptista JM, Pomianoski BW, Ahmed AR, Majeed MW, de Sousa YG, Pinto ML, Sahin OK, Ibrahim MH, Guedes IHL, Chatterjee A, Barbosa RG, Fagundes W. Utilizing machine learning techniques for EEG assessment in the diagnosis of epileptic seizures in the brain: A systematic review and meta-analysis. *Seizure*. 2025 Mar;126:16-23. doi: 10.1016/j.seizure.2025.01.021
 24. Vitt JR, Mainali S. Artificial Intelligence and Machine Learning Applications in Critically Ill Brain Injured Patients. *Semin Neurol*. 2024 Jun;44(3):342-356. doi: 10.1055/s-0044-1785504
 25. Lamichhane B, Kim Y, Segarra S, Zhang G, Lhatoo S, Hampson J, Jiang X. Automated detection of activity onset after postictal generalized EEG suppression. *BMC Med Inform Decis Mak*. 2020 Dec 24;20(Suppl 12):327. doi: 10.1186/s12911-020-01307-7
 26. Bakula DM, Junger KW, Guilfoyle SM, Mara CA, Modi AC. Key predictors of the need for a family-focused pediatric epilepsy adherence intervention. *Epilepsia*. 2022 Aug;63(8):2120-2129. doi: 10.1111/epi.17302
 27. Mariajoseph FP, Chen Z, Sekhar P, Rewell SS, O'Brien TJ, Antonic-Baker A, Semple BD. Incidence and risk factors of posttraumatic epilepsy following pediatric traumatic brain injury: A systematic review and meta-analysis. *Epilepsia*. 2022 Nov;63(11):2802-2812. doi: 10.1111/epi.17398
 28. Rosenthal ES. Seizures, Status Epilepticus, and Continuous EEG in the Intensive Care Unit. *Continuum (Minneapolis)*. 2021 Oct 1;27(5):1321-1343. doi: 10.1212/CON.0000000000001012
 29. Limotai C, Jirasakuldej S, Wongwiangint S, Tumnark T, Suwanpakdee P, Wangponpattanasiri K, Rakchue P, Tungkasereerak C, Pleumpanupatand P, Tansuhaj P, et al. Efficacy of delivery of care with Tele-continuous EEG in critically ill patients: a multicenter randomized

- controlled trial (Tele-cRCT study) study. Crit Care. 2025 Jan 7;29(1):15. doi: 10.1186/s13054-024-05246-x
30. Rubinos C, Alkhachroum A, Der-Nigoghossian C, Claassen J. Electroencephalogram Monitoring in Critical Care. Semin Neurol. 2020 Dec;40(6):675-680. doi: 10.1055/s-0040-1719073
31. Tagore S, Reche A, Paul P, Deshpande M. Electromyography: Processing, Muscles' Electric Signal Analysis, and Use in Myofunctional Orthodontics. Cureus. 2023 Dec 19;15(12):e50773. doi: 10.7759/cureus.50773
32. Karagianni MD, Brotis AG, Gatos C, Kalamatianos T, Vrettou C, Stranjalis G, Fountas KN. Neuromonitoring in Severe Traumatic Brain Injury: A Bibliometric Analysis. Neurocrit Care. 2022 Jun;36(3):1044-1052. doi: 10.1007/s12028-021-01428-5
33. Sconzo D, Wadhwa A, Balagurunath K, Berube M, Wetsel Z, Sakthiyendran NA, Penumaka A, Enriquez-Marulanda A, Ravina K, Binello E. Predictors of seizures in postoperative traumatic brain injury patients: A single center retrospective study. Clin Neurol Neurosurg. 2025 Oct;257:109116. doi: 10.1016/j.clineuro.2025.109116

Глобальні тенденції досліджень щодо виявлення судом у відділенні інтенсивної терапії після декомпресивної краніектомії: бібліометричний аналіз

Куат Відодо, Саріоно, Новіта Ангрраєні

Факультет медсестринства,
Університет Джендерал Содірман,
Пурвокерто, Індонезія

Надійшла до редакції 17.09.2025
Прийнята до публікації 03.11.2025

Адреса для листування:

*Kuat Widodo, Departemen of
Nursing, Jenderal Soedirman
University, Jalan Prof. Dr. HR.
Boenjamin 708, Purwokerto 53122,
Indonesia, email: kuat.widodo@mhs.
unsoed.ac.id*

Післяопераційні судоми є відомим ускладненням після декомпресивної краніектомії, але глобальний дослідницький ландшафт щодо виявлення судом у цьому контексті мало вивчено. Бібліометричне картування дає змогу визначити нові тенденції та прогалини в знаннях.

Мета: оцінити міжнародні наукові напрацювання щодо виявлення судом у критично хворих пацієнтів після декомпресивної краніектомії.

Матеріали і методи. Відповідні публікації відібрано в базах даних SCOPus, PubMed, CrossRef і Google Scholar із використанням ключових слів «decompressive craniectomy AND seizure AND detected» за допомогою програмного забезпечення Publish or Perish. Записи експортовано у форматі RIS і проаналізовано за допомогою VOSviewer для створення мереж співтрапляння ключових слів, кластерних мап та візуалізацій часових тенденцій.

Результати. Проаналізовано 1605 публікацій за 2015–2025 рр. Щорічний обсяг досліджень збільшувався, особливо після 2018 р. Мережа співтрапляння ключових слів виявила чотири тематичні кластери: 1) клінічні результати й прогноз, 2) хірургічні техніки та періопераційне ведення, 3) внутрішньочерепний тиск і стратегії моніторингу, 4) виявлення судом та нейрокритична допомога. Аналіз накладання показав поступовий зсув уваги до моніторингу судом і методів на основі електроенцефалографії останніми роками, тоді як щільніша візуалізація підтвердила, що виявлення судом є новою, але недостатньо розвинутою темою. Найпродуктивнішим автором був дослідник, який мав 126 публікацій.

Висновки. Хоча кількість публікацій щодо декомпресивної краніектомії швидко збільшується, праць, присвячених виявленню судом мало, хоча ця тема динамічно розвивається. Збільшення уваги до нейрокритичного моніторингу вказує на перспективи розвитку доказових протоколів і розширення міжнародної співпраці в цій сфері.

Ключові слова: декомпресивна краніектомія; виявлення судом; інтенсивна терапія; бібліометричні дослідження; VOSviewer

Ukrainian Neurosurgical Journal. 2026;32(1):69-91
doi: 10.25305/unj.341693

Розробка та валідація багаторівневої шкали кількісної оцінки механічної експозиції при травматичних ушкодженнях хребта

О.С. Нехлопочин¹, В.В. Вербов², Є.В. Чешук², М.В. Вороді²

¹ Відділення патології спинного мозку, Інститут нейрохірургії імені акад. А.П. Ромоданова НАМН України, Київ, Україна

² Відділення відновлювальної нейрохірургії, Інститут нейрохірургії імені акад. А.П. Ромоданова НАМН України, Київ, Україна

Надійшла до редакції 19.10.2025
Прийнята до публікації 14.11.2025

Адреса для листування:

Нехлопочин Олексій Сергійович,
Відділення патології спинного мозку, Інститут нейрохірургії імені акад. А.П. Ромоданова, вул. Платона Майбороди, 32, Київ, Україна, 04050, e-mail: AlexeyNS@gmail.com

Мета: розробити, теоретично обґрунтувати та провести первинну валідацію багаторівневої (0–10 балів) шкали кількісної оцінки інтенсивності зовнішнього механічного впливу при травматичних ушкодженнях хребта.

Матеріали і методи. Дизайн дослідження відповідає принципам COSMIN (Consensus-based Standards for selection of health Measurement Instruments) для розробки та валідації вимірних інструментів у медицині, що забезпечує достатній рівень наукової обґрунтованості й відтворюваності отриманих результатів. Літературний аналіз (PubMed, Scopus, Web of Science, 1990–2025) дав змогу визначити порогові значення та модифікаційні чинники (маса тіла пацієнта, коефіцієнт передачі імпульсу (T_{land}), ефективна дистанція уповільнення (S_{land})). Для валідації використано два набори даних: 40 стандартизованих клінічних віньєток та 52 реальні випадки травми грудо-поперекового переходу (Th11–L2) з обов'язковою верифікацією за допомогою комп'ютерної томографії/магнітно-резонансної томографії. Оцінювали конструктивну та критеріальну валідність, міжекспертну надійність (ICC, κ), абсолютну надійність (SEM, MDC₉₅), діагностичну цінність (ROC-аналіз), рівень згоди (Bland-Altman) і сталість порогових значень.

Результати. В результаті аналізу та зіставлення різних підходів запропоновано концепцію використання «еквівалентної висоти падіння» як універсального критерію механічної експозиції при травмах хребта. На її основі розроблено 11-рівневу шкалу (0–10 балів) та спінально-орієнтовану похідну метрику. Первинна валідація показала високу міжекспертну узгодженість (ICC(2,1): 0,84 для базового показника та 0,79 для спінального; ICC(2,k): 0,95 і 0,92), прийнятну абсолютну точність (SEM 0,80–0,95, MDC₉₅ 2,2–2,6 бала) і сталість порогів (розбіжності більш ніж на ± 1 рівень траплялися в менш ніж 7% випадків). Показники статистично асоціювалися з клиноподібною деформацією тіл хребців ($r=0,58$), компрометацією хребтового каналу ($r=0,49$) та порядковою тяжкістю пошкоджень за AO Spine ($\rho=0,62$; $p<0,001$). У логістичній моделі приріст на 1 м збільшував імовірність пошкоджень $\geq A3$ майже вдвічі (відношення шансів – 1,85, 95% довірчий інтервал – 1,45–2,38). Підтверджені діагностичну цінність шкали (AUC=0,82) для виявлення переломів хребця (оптимальний поріг $\approx 1,3$ м, чутливість – 0,76, специфічність – 0,72).

Висновки. Розроблена шкала забезпечує кількісний, масо-нейтральний і клінічно інтерпретований опис «жорсткості події», доповнює морфологічні класифікації, поліпшує стратифікацію ризику та може бути використана для маршрутизації, планування діагностики й багатоцентрових досліджень.

Ключові слова: травма хребта; грудо-поперековий перехід; механічна експозиція; еквівалентна висота падіння; спінально-еквівалентна висота; кількісна шкала; валідація вимірних інструментів; індивідуалізація

Вступ

Травматичні пошкодження хребта є гетерогенною групою станів, що виникають при впливі широкого спектру механічних чинників — від низькоенергетичних подій (наприклад, падіння з висоти власного зросту) до високоенергетичних механізмів (падіння з великої висоти, дорожньо-транспортна пригода (ДТП), спортивна та вибухова травма) [1,2]. За даними популяційних досліджень, річна частота травм хребта становить 23–40 випадків на 100 тис. населення, з них 15–20% супроводжуються неврологічним

дефіцитом різного ступеня тяжкості [2]. Наведені дані потребують уточнення з урахуванням методологічних відмінностей між дослідженнями та регіонами.

Ушкодження хребта можуть виникати в результаті як прямого, так і непрямого впливу. Пряме пошкодження розвивається при безпосередньому прикладанні сили до хребтового стовпа (удар важким предметом, вогнепальне або колото-різане поранення, здавлення між масивними об'єктами) [3]. Такі травми трапляються відносно рідко та частіше обмежуються локальними ушкодженнями остистих і поперечних

Copyright © 2026 О.С. Нехлопочин, В.В. Вербов, Є.В. Чешук, М.В. Вороді



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

відростків чи м'яких тканин. Непрямий механізм, який спричиняє понад 90% пошкоджень хребта в мирний час, реалізується через передачу зовнішньої сили на тіло загалом [1, 4]. До нього належать падіння різного характеру та ДТП, при яких хребет ушкоджується за рахунок осевого навантаження, флексійно-ротацийних чи комбінованих зусиль [3, 5-8].

У міжнародній клінічній практиці переломи, що відбуваються за низькоенергетичного впливу — механічної сили, яка в нормі не має спричинити порушення цілісності кісткової тканини, традиційно відносять до категорії *fragility fractures* (остеопоротичні переломи) [9]. Класичним прикладом є падіння «з висоти власного зросту або нижче» (*standing height or less*) [10,11]. Це визначення наведене в документах ВООЗ та широко використовується в сучасних клінічних рекомендаціях [9,12]. На протилежному полюсі енергетичного спектру розташовані високоенергетичні механізми: у протоколах догоспітального етапу США падіння дорослої людини з висоти понад 20 футів (~6 м) історично сприймається як маркер високої кінетичної енергії та підвищеного ризику політравми [13]. У сучасних матеріалах American College of Surgeons трапляється нижчий поріг (>10 футів), що свідчить про варіативність порогів і потребу в уніфікації термінів [14, 15].

Більшість поширених класифікаційних систем у вертебродології та травматології фокусуються на характеристиках результату ушкодження, а не на кількісній оцінці інтенсивності зовнішнього впливу [16]. Так, *Abbreviated Injury Scale (AIS)* являє собою анатомічно обґрунтовану 6-бальну систему оцінки тяжкості пошкоджень за ділянками тіла [17,18], а *AO Spine Thoracolumbar Classification* структурує пошкодження грудо-поперекового відділу за морфологічним типом (A, B, C), неврологічним статусом і модифікаторами (оцінка цілісності заднього зв'язкового комплексу) [19–21]. Ці інструменти є незамінними для стандартизованого опису травми, стратифікації ризику та вибору тактики лікування, але вони не надають кількісної характеристики «енергії події» (механічної експозиції), що передуює розвитку пошкодження [16].

У повсякденній практиці механізм травми нерідко описують спрощено — бінарними чи якісними категоріями («низько-/високоенергетична травма», «легка/тяжка»), що не дає уявлення про безперервний характер градації механічної експозиції та призводить до втрати клінічно значущої інформації [22, 23]. Відсутність стандартизованого кількісного інструменту ускладнює зіставлення когорт та інтерпретацію результатів досліджень, а також обмежує потенціал профілактичних і реабілітаційних заходів [24]. З огляду на це слід розробити багаторівневу шкалу кількісної оцінки інтенсивності зовнішнього механічного впливу, що ґрунтується на фундаментальних принципах механіки (енергія, імпульс, прискорення) і придатна для застосування в реальних клінічних умовах. Ключовим методологічним рішенням є введення універсальної міри, що дає змогу привести різні механізми травми до єдиної енергетичної шкали, а отже, уніфікувати опис «сили події» для клінічної комунікації та наукового аналізу [5, 25].

Мета: Розробити, теоретично обґрунтувати та провести первинну валідацію багаторівневої (0–10 балів) шкали кількісної оцінки інтенсивності зовнішнього механічного впливу при травматичних ушкодженнях хребта.

Матеріали і методи

Дизайн дослідження відповідає принципам COSMIN (*Consensus-based Standards for selection of health Measurement Instruments*) для розробки та валідації вимірювальних інструментів у медицині, що забезпечує достатній рівень наукової обґрунтованості та відтворюваності отриманих результатів [26, 27].

Літературний пошук проведено в два етапи.

Етап 1 (аналітичний огляд шкал і термінології). Метою була ідентифікація використовуваних на практиці та в керівництвах класифікацій/шкал, порогових значень і принципів, що лежать в їхній основі, необхідних для формулювання концепції шкали, що розробляється. Ключові слова: *AO Spine thoracolumbar classification, TLICS, Abbreviated Injury Scale, Injury Severity Score, spinal injury classification reliability, CDC field triage guidelines, mechanism of injury, fall height threshold, fall >10 ft, standing height or less, fragility fracture, osteoporotic vertebral fracture, mechanical exposure, energy of event, biomechanics of spinal injury*.

Етап 2 (збір кількісних орієнтирів). Метою було визначення порогових орієнтирів для градації падінь і формування типових діапазонів/медіан параметрів, застосовуваних при побудові шкали (сценарії зіткнень, передача імпульсу на хребет, ефективна дистанція уповільнення, модифікаційні чинники середовища/покривтів). Ключові слова: *delta-v estimation, rollover, mass ratio, coefficient of restitution, impact angle, EDR, spine load transmission, landing biomechanics, knee flexion, energy absorption, feet-first, buttocks impact, supine impact, seat belt, airbag, torso kinematics, effective stopping distance, impact attenuation, concrete, asphalt, sand, snow, water entry, gym mat, tatami, HIC, g-max, fall from height, injury severity threshold adults, fragility fracture standing height*.

Бази та параметри пошуку: PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science; матеріали AO Spine, Всесвітньої організації охорони здоров'я та Міжнародного фонду остеопорозу (*International Osteoporosis Foundation*). Мова публікацій – англійська, часовий діапазон – 1990–2025 (для фундаментальних механічних праць – без жорсткого порога).

Скринінг виконано поетапно двома рецензентами (спочатку за назвами й анотаціями, потім – за повними текстами) із додатковим пошуком за списками літератури відібраних статей.

Набори даних

Валідація проведена на двох взаємодоповнюючих наборах:

- Стандартизовані клінічні сценарії (віньєтки) (n=40) — синтетичні клініко-біомеханічні події, що рівномірно покривають діапазон механічної експозиції («суміжні» комбінації пози/поверхні/шляху уповільнення), сформовані для незалежної оцінки експертами з уніфікованого протоколу.

Стаття містить рисунки, які відображаються в друкованій версії у відтинках сірого, в електронній — у кольорі.

- Реальні клінічні випадки (n=52) – історії хвороби пацієнтів із достатньою деталізацією механізму травми, що, на думку авторів, давало змогу однозначно відновити вихідні параметри для розрахунків. У всіх випадках були доступні дані нейровізуалізації (комп'ютерної томографії (КТ)/магнітно-резонансної томографії (МРТ)), що дало змогу зіставити величини механічної експозиції з морфологічними ознаками ушкодження, визначити тип пошкодження за класифікацією АО Spine, виразність передньої клиноподібної деформації, ступінь компрометації хребтового каналу та цілісність заднього лігаментозного комплексу. Аналіз і вимірювання виконували в програмному комплексі RadiAnt DICOM Viewer (Medixant, Польща; версія 2023.1, ліцензія № 1860F047).

Для первинної валідації та зменшення міжіндивідуальної варіабельності у вибірку залучали пацієнтів із травмою грудо-поперекового переходу (Th11–L2).

Від усіх пацієнтів отримано інформовану згоду на збирання, обробку даних і публікацію узагальнених результатів за дотримання конфіденційності. Дані, надані експертам, були повністю анонімізовані.

Визначення обсягу вибірки

Для оцінки міжекспертної надійності (ICC) у дизайні з 5 експертами планувалося продемонструвати ICC $\approx 0,80$ порівняно з пороговим значенням $0,60$ при $\alpha=0,05$ і потужності $0,80$. Розрахунок потребував 35–40 об'єктів [28]. З огляду на це був сформований набір із 40 стандартизованих віньєток, що забезпечило 200 незалежних оцінок (5×40), дало змогу провести тест-ретест на підвибірці з 10 віньєток [29] та підвищило точність SEM (стандартна похибка вимірювання) і MDC_{95} (мінімальна виявлена зміна) [30, 31]. Для клінічної валідації залучено 52 послідовних пацієнтів із повним набором даних (деталізований механізм + дані КТ/МРТ), що забезпечує достатню потужність для ключових перевірок валідності ($r \approx 0,5–0,6$, known-groups з $d \approx 1,1$) [32–34] та прийнятну точність аналізу згоди (Bland–Altman) [35–37]. При цьому ROC-аналіз і регресійні моделі розглядали як вторинні з очікувано ширшими довірчими інтервалами (ДІ) [38, 39].

Статистичний аналіз

Статистичну обробку даних здійснювали методами описової та аналітичної статистики. Неперервні змінні подавали як $mean \pm SD$ або median [IQR] залежно від характеру розподілу (оцінка нормальності – візуально та за тестом Шапіро–Вілка) [40, 41]. Конструктну й критеріальну валідність перевіряли кореляційним аналізом із розрахунком коефіцієнтів Пірсона (r) або Спірмена (ρ) [42, 43].

Предиктивні моделі. Для оцінки зв'язку метрик із морфологічною тяжкістю ушкодження за АО Spine використовували бінарну логістичну регресію для порога $\geq A3$ із розрахунком відношення шансів (OR) та 95% довірчого інтервалу (95% CI) [44, 45]; як аналіз чутливості для порядкового результату A1–A4 застосовували ординальну логістичну регресію [46, 47]. Лінійність логіту перевіряли тестом Вох–Тідвелл [48] і за допомогою обмежених кубічних сплайнів [49, 50], мультиколінеарність – за індексом VIF [51]. Дискримінаційну здатність оцінювали за ROC-кривими (AUC із 95% CI) [52], визначали чутливість, специфічність, індекс Юдена, а також коефіцієнти правдоподібності (LR^+ , LR^-). Робочі порогови

обирали за максимумом індексу Юдена з урахуванням завдання (скринінг/підтвердження) [53].

Стійкість меж шкали перевіряли аналізом чутливості за варіювання граничних параметрів на $\pm 10–15\%$ та повторним розрахунком для альтернативних сценаріїв модифікаторів [54, 55].

Відоме розрізнення (known-groups validity). Порівняння здійснювали для заздалегідь визначених клінічно релевантних груп [56]. Для міжгрупових відмінностей застосовували U-тест Манна–Уїтні та обчислювали непараметричні розміри ефекту – Cliff's δ [57] та/або Vargha–Delaney A [58]; Cohen's d наводили додатково (як довідковий), із робастною інтерпретацією за неоднакових дисперсій [59].

Надійність вимірювань. Відносну надійність оцінювали за показниками міжекспертної узгодженості: ICC(2,1) (двофакторна модель із випадковими ефектами, absolute agreement, single-measure) та ICC(2,k) (average-measure) [60], і зваженим коефіцієнтом k із квадратичними вагами [61,62]. Стабільність у часі перевіряли за схемою тест–ретест на підвибірці випадків [63]. Згоду між експертними й алгоритмічними обчисленнями оцінювали методом Bland–Altman (середнє зміщення та 95% межі згоди) [64].

Абсолютна надійність. Обчислювали SEM і MDC_{95} ($MDC_{95} = 1,96 \cdot \sqrt{2} \cdot SEM$) [65]. Для коректної клінічної інтерпретації MDC додатково наводили в безперервних одиницях: у метрах для θ та у кратностях g для спінально-орієнтованої метрики (через еталонний шлях уповільнення $s_{ref} = 0,10$ м) із рівневою (інтервал-специфічною) приміткою про те, в яких діапазонах різниця є клінічно несуттєвою/суттєвою [66].

Усі тести – двосторонні. Критичний рівень статистичної значущості (p) $< 0,05$ [67, 68].

Аналіз виконано в R 4.5.1 (R Core Team) у середовищі RStudio IDE 2025.05.1+513 (Posit) [69].

Результати

Визначення критерію

Інтенсивність зовнішнього механічного впливу при травматичній події – це кількісна характеристика сили події, що передуює пошкодженню тканин [70, 71]. Вона не є тотожною тяжкості отриманої травми, яку визначають за клінічними шкалами результату (наприклад, Abbreviated Injury Scale (AIS)) або морфологічними класифікаціями (наприклад, AO Spine Thoracolumbar Classification) [72]. На відміну від AIS/АО-класифікацій, орієнтованих на анатомо-клінічні наслідки (тип розриву, нестабільність, неврологічний статус), запропонований критерій фіксує саме механічну експозицію – фізичну величину, що характеризує, скільки механічної енергії/імпульсу було залучено до події [25].

Як універсальну фізичну метрику обрано «еквівалентну висоту падіння» (h_{eq}) [73, 74]. Ідея полягає в тому, що різноманітні механізми (падіння, зіткнення, здавлення, вибуховий вплив) можна з певним припущенням привести до однієї шкали енергії, прирівнявши їх до гіпотетичного падіння з висоти в однорідному гравітаційному полі. Метрика ґрунтується на потенційній енергії тяжкості та дає змогу порівняти події в «енергетично еквівалентних метрах».

При виборі відповідної фізичної метрики (критерію) для оцінки ступеня зовнішнього механічного впливу на хребет ми керувалися такими аргументами:

- по-перше, падіння з висоти – найчастіша причина травматичних ушкоджень хребта. За даними Global Burden of Disease, падіння є основною причиною вертебральних травм: на їхню частку припадає 52,2% випадків травми хребта й 63,0% випадків травм спинного мозку [75, 76]. Таким чином, більше ніж половина травматичних подій зумовлені саме падінням, що робить масштаб на основі висоти падіння найрелевантнішим [77];

- по-друге, параметр «висота падіння» має важливі практичні переваги [13]. Критерій інтуїтивно зрозумілий не лише для фахівців, а й для пацієнтів та їхніх родичів. Згадка про висоту (наприклад, «падіння з другого поверху») відразу дає уявлення про силу впливу [15,78,79]. Цей параметр легко отримати з клінічної документації [80]. При збиранні анамнезу зі слів постраждалого або очевидців практично завжди є згадка «зробив крок і впав» або «з висоти...», тоді як кількісні дані для ДТП (швидкість), насильства (тип зброї), здавлення в низці випадків відсутні або важко піддаються інтерпретації [81];

- по-третє, падіння охоплює нижню та верхню межу спектру механічної дії (низькоенергетична й високоенергетична травма). Таким чином, падіння забезпечує широкий і клінічно релевантний діапазон механічної експозиції [77];

- по-четверте, фізична обґрунтованість. Визначення h_{eq} через висоту падіння безпосередньо впливає із законів механіки (оскільки потенційна енергія $\Delta E = mgh$), що дає змогу зберегти максимальну об'єктивність і виключити суб'єктивні коефіцієнти оцінки сили впливу, можливість кількісно порівнювати різні механізми травми, приводячи їх до однієї фізичної шкали [1, 15, 73].

Аналіз сучасної літератури показав, що при характеристиці тяжкості механічного впливу на хребет з урахуванням висоти падіння фактично використовують лише два базових порогових орієнтири.

Перший поріг – близько 1 м. Падіння з висоти власного зросту (~1 м) і нижче традиційно розглядають як низькоенергетичний механізм, при якому переломи вказують на патологічну крихкість кісткової тканини (остеопоротичні переломи) [82, 83]. Це визначення використано в рекомендаціях Всесвітньої організації охорони здоров'я та Міжнародного фонду остеопорозу й широко застосовується в клінічній практиці при стратифікації ризику та призначенні вторинної профілактики [84–86].

Другий поріг – 20 футів (~6 м). Падіння дорослого з висоти понад 20 футів історично визнається маркером тяжкої механічної дії в протоколах догоспітального медичного та травматологічного сортування (CDC, American College of Surgeons). Цей критерій пов'язаний із високою ймовірністю політравми та необхідністю доставки потерпілого до спеціалізованого травмцентру [87]. У деяких сучасних керівництвах обговорюється нижчий універсальний поріг (>10 футів), але 20 футів досі найчастіше використовують як «верхній» орієнтир високої енергії.

Таким чином, у реальній практиці при описі механізму травми застосовують лише два квантифіковані референсні значення: ~1 м як межу низькоенергетичного впливу та ~6 м як показник високоенергетичної травми (Рис.1). Проміжний діапазон залишається слабо формалізованим [15, 88, 89].

Інтенсивність загального зовнішнього механічного впливу – сценарій падіння

Для підвищення точності стратифікації механічного чинника при травматичних ушкодженнях хребта на підставі власного досвіду й аналізу літературних джерел нами розроблена 11-рівнева шкала градації інтенсивності зовнішнього впливу [3, 5, 70, 90]. На відміну від бінарних або спрощених класифікацій запропонована система ґрунтується на клінічно верифікованих порогових значеннях [13, 15, 80] та охоплює найхарактерніші сценарії падіння, що забезпечує їй високу клінічну релевантність і практичну відтворюваність [72, 88, 91]. Як граничні значення висоти обрано такі: 0, 0,1, 0,5, 0,75, 1, 2, 4, 6, 10, 15 м (Табл. 1).

Візуально запропонована шкала представлена на Рис.2 (без дотримання масштабу).

Інтенсивність загальної зовнішньої механічної дії – сценарій ДТП

Визначення h_{eq} при ДТП. Оскільки за вихідну метрику прийнято h_{eq} , для падіння $h_{eq} = h$. Для ДТП (друга за частотою причина вертебральної травми) потрібен перерахунок через Δv – зміну швидкості потерпілого в момент ДТП [5,92,93]. Базова ідея: h_{eq} – це висота вільного падіння, що дає таку саму кінетичну енергію, що й ДТП, яку описують [94]. Виходячи з принципу еквівалентності енергій,

$$\frac{1}{2}m(\Delta v)^2 = mgh_{eq} \Rightarrow h_{eq} = \frac{(\Delta v)^2}{2g},$$

де $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Для зручності, якщо Δv виражено в км/год, то

$$h_{eq} [\text{М}] = \frac{(\Delta v \frac{\text{км}}{\text{год}})^2}{254}.$$


Рис. 1. Загальноприйнята нині шкала градації висоти падіння в контексті пошкодження хребта

Таблиця 1. Висотна шкала інтенсивності механічної експозиції (для клінічної стратифікації)

Бал тяжкості	Висота, м	Клінічний сценарій
0	0	Відсутність зовнішньої механічної дії: спонтанна компресія тіл хребців при тяжкому остеопорозі; перелом на тлі мінімального навантаження при системній/локальній патології кістки (пухлина, інфекція тощо)
1	0–0,1	Неповне падіння/ступінчасте зниження рівня ≤30 см: спотикання на рівній поверхні з відновленням рівноваги; часткове «сповзання» зі сходина/порога; мікротравми при невдалому повороті в тісному просторі (побутова травма)
2	0,1–0,5	Падіння з низьких меблів або архітектурних елементів заввишки ~0,4–0,6 м (з невисокої табуретки, порога, підвіконня); падіння з низького ліжка; у дітей – падіння з дивана/ігрової поверхні порівнянної висоти
3	0,50–0,75	Падіння з рівня сидіння: зі стільця/ліжка (~0,6–0,7 м); падіння при виході/вході у ванну; зрив при спробі дістати предмет із верхньої полиці, стоячи на сидінні
4	0,75–1,00	Падіння з висоти власного зросту (~0,8–1 м): ковзання на льоду/мокрій плитці; спотикання об перешкоду (пори́г, кабель); синкопальне падіння у вертикальному положенні; падіння при переміщенні сходами «через одну» сходинку
5	1–2	Падіння з драбини (2-3 щаблі, ~1,5–2,0 м); з балкона/майданчика 1-го поверху (<3 м); виробнича травма: падіння під час роботи на низьких риштуваннях/навантажувальній платформі; спортивна: падіння з невисокої скельної полиці
6	2–4	Падіння з даху одноповерхової будівлі (3–4 м), дерева, складського стелажа; падіння зі сходів на значному прольоті (≥6–8 сходинок); виробнича: падіння з рампи/напівпричепа
7	4–6	Падіння з другого поверху (~6 м); з майданчика міжповерхового прольоту; падіння в шахту малої глибини; виробнича: з верхнього ярусу будівельних риштувань
8	6–10	Падіння з третього поверху (~9–10 м); з даху промислового ангара/цеху; рекреаційна/виробнича висота при відмові страховки (з ударом об горизонтальну площину)
9	10–15	Падіння з 4–5-го поверху (~13–15 м); зі щогли зв'язку, стріли крана, висотних риштувань; зрив на гірському маршруті з ударом об виступи/кромки по дорозі
10	>15	Катастрофічне падіння: висота >15 м (≥6–7-го поверху); з висотної будівлі/антенної щогли; зрив зі скельного карниза/моста в урбанізованій зоні або гірській місцевості

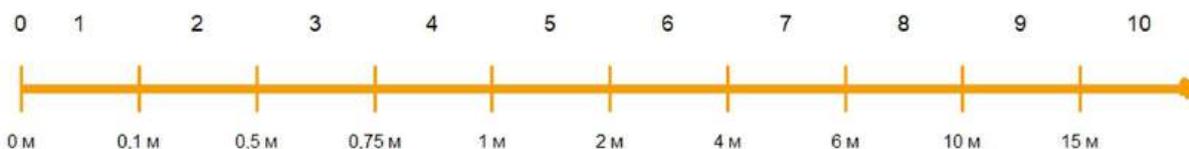


Рис. 2. Шкала рівнів (0–10) з межами за евівалентною висотою падіння (h_{eq} , м)

Об'єктивні проблеми, які виникають під час розрахунку цього критерію. По-перше, отримання параметра Δv із максимальною точністю нині можливе лише при використанні даних Event Data Recorder (EDR) автомобіля (блок подушок безпеки/телематичний модуль). Цей пристрій реєструє зміну швидкості по поздовжній і поперечній осях, а також їх результуюче значення впродовж 0,3 с із початку удару. У США застосування та стандартизація EDR регулюються National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), а в країнах ЄС – Регламентом (EU) 2019/2144, що передбачало обов'язкове оснащення нових моделей автомобілів EDR у 2022–2024 рр. [95, 96]. По-друге, навіть за формальної наявності такого обладнання в транспортному засобі під час госпіталізації та первинного огляду лікар зазвичай не має цих даних і змушений використовувати дані, отримані зі слів потерпілого або очевидців [97]. Саме тому наведено непрямі методики розрахунку Δv для різних типів ДТП.

Як приклад, наводимо докладну методику розрахунку Δv для випадку колінарного співудару в одновимірній постановці, тобто ситуації, коли обидва транспортні засоби (ТЗ) рухаються вздовж однієї прямої лінії (лоб у хвіст або лоб у лоб), і удар відбувається строго по цій осі [98]. Як вихідні умови приймаємо, що m_1, m_2 – маси автомобілів, v_1, v_2 – швидкості відповідних ТЗ до удару (зі знаками вздовж однієї осі), v'_1, v'_2 – швидкості після удару; e – коефіцієнт відновлення (зазвичай для автомобілів $e \approx 0,0–0,2$; детально розглянуто нижче). За основу беремо закон збереження імпульсу

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2$$

та умови реституції

$$v'_2 - v'_1 = -e(v_2 - v_1).$$

Розрахуємо миттєву швидкість після удару:

$$v'_1 = \frac{m_1 - em_2}{m_1 + m_2} v_1 + \frac{(1 + e)m_2}{m_1 + m_2} v_2,$$

$$v_2' = \frac{(1+e)m_1}{m_1+m_2} v_1 + \frac{m_2 - em_1}{m_1+m_2} v_2$$

Оскільки $\Delta v = v - v'$, для кожного з ТЗ отримуємо

$$\Delta v_1 = \frac{(1+e)m_2}{m_1+m_2} (v_1 - v_2)$$

$$\Delta v_2 = \frac{(1+e)m_1}{m_1+m_2} (v_2 - v_1)$$

Наведені формули дають підставу стверджувати, що кожен ТЗ отримує частку відносної швидкості $V_{rel} = |v_1 - v_2|$, пропорційну масі іншого ТЗ. У разі, якщо маси однакові, кожний ТЗ отримує $\Delta v \approx 0,5 V_{rel}$. Якщо один ТЗ значно важчий ($m_2 \gg m_1$), то легший автомобіль майже повністю «забирає» відносну швидкість ($\Delta v_1 \rightarrow (1+e)V_{rel}$), а важчий майже не змінює рух ($\Delta v_2 \approx 0$).

Оскільки в наведених розрахунках коефіцієнт відновлення є параметром, складним для емпіричного сприйняття, наводимо його коротку характеристику. Так, у механіці e — це відношення швидкості розльоту до швидкості зближення тіл у напрямку удару [99, 100], тобто

$$e = \frac{v_2' - v_1'}{v_1 - v_2}$$

Значення можна інтерпретувати таким чином:

$e=0$ — абсолютно непружний удар: тіла після удару рухаються разом як єдине ціле, а їхня загальна швидкість v' визначається законом збереження імпульсу [101];

$0 < e < 1$ — частково пружний удар: частина відносної швидкості зберігається як «відскік» [102];

$e=1$ — абсолютно пружний удар: енергія зберігається повністю (як в ідеально жорстких тіл (білярдна куля)) [103, 104].

Кузова та бампери автомобілів проєктують так, щоб вони максимально поглинали енергію удару за рахунок пластичної деформації [105, 106]. Це означає, що автомобільний удар у більшості випадків має пластичний характер. Саме тому коефіцієнт відновлення e в реальних ДТП зазвичай дуже малий. Його значення відображує лише ту частку енергії, яка збереглася в пружній деформації та повернулася після удару, формуючи невеликий «відскік».

У разі лобових зіткнень значення e становить близько 0,0–0,1, оскільки майже вся енергія йде в зминання кузова [106]. При бічних ударах показник дещо вищий — 0,1–0,2, що пояснюється меншою зоною проєктованої деформації та відносно великим пружним відгуком [107]. У разі задніх малошвидкісних ударів (бампер-бампер, паркування) коефіцієнт може становити 0,2–0,3, оскільки в роботу залучено більше пружних елементів, а пластичної деформації мало. При контакті з жорсткою перешкодою (стовп, дерево) $e \rightarrow 0$ [99, 107]. При зіткненнях з $\Delta v > 25$ км/год при практичних розрахунках прийнято, що $e=0$, оскільки вплив пружної складової мінімальний.

Для демонстрації практичного використання алгоритму розрахунків наводимо кілька клінічних прикладів.

Приклад 1. Легковий автомобіль А виходить на обгін зі швидкістю $v_1=90$ км/год, назустріч рухається легковий автомобіль Б зі швидкістю $v_2=70$ км/год. Удар фронтальний по осі руху. Приймаємо, що $m_1=1400$ кг, $m_2=1300$ кг. Коефіцієнт реституції з урахуванням швидкості $e=0$. Відповідно, $V_{rel} = V_1 + V_2 = 160$ км/год, $m_1 + m_2 = 2700$ кг.

$$\Delta v_1 = \frac{m_2}{m_1+m_2} V_{rel} \approx 77 \text{ км/год}$$

$$\Delta v_2 = \frac{m_1}{m_1+m_2} V_{rel} \approx 83 \text{ км/год}$$

Тоді еквівалентна висота h_{eq} (за модулем Δv) становитиме

$$h_{eq,1} \approx \frac{77^2}{254} \approx 23,4 \text{ м}$$

$$h_{eq,2} \approx \frac{83^2}{254} \approx 27,1 \text{ м}$$

що для обох постраждалих ТЗ є максимальним рівнем механічного впливу на організм — 10 балів за запропонованою шкалою.

Приклад 2. Легковий автомобіль А на швидкості $v_1=50$ км/год взаємодіє з легковим автомобілем Б, що стоїть на світлофорі. У цьому випадку вважаємо маси ТЗ однаковими: $m_1=m_2=1400$ кг.

Тоді при $e=0$

$$\Delta v_1 = \Delta v_2 = \frac{1}{2} 50 = 25 \text{ км/год}$$

$$h_{eq,1} = h_{eq,2} = \frac{25^2}{254} \approx 2,46 \text{ м}$$

що становить 6 балів.

Логічним запереченням для використання запропонованої методики є складність точного встановлення швидкості на момент ДТП. Однак на практиці водії здебільшого можуть дати орієнтовну оцінку, достатню для первинної стратифікації. Щоб показати сталість висновків щодо припустимої похибки швидкості, наводимо розрахунки кількох характерних значень на прикладі 2.

- 50 км/год $\rightarrow \Delta v=25,0$ км/год $\rightarrow h_{eq}=2,46$ м \rightarrow бал 6;

- 55 км/год $\rightarrow \Delta v=27,5$ км/год $\rightarrow h_{eq}=2,98$ м \rightarrow бал 6;

- 60 км/год $\rightarrow \Delta v=30,0$ км/год $\rightarrow h_{eq}=3,54$ м \rightarrow бал 6.

Отримані показники демонструють, що помірна невизначеність щодо вихідної швидкості не змінює клінічної оцінки. Крім того, аналіз показує, що при розрахунку еквівалентної висоти незначні відмінності в масі автомобілів (± 100 – 200 кг) практично не змінюють підсумкову величину Δv , а отже, не впливають на визначення рівня за запропонованою шкалою. У клінічній практиці така деталізація не потрібна. Набагато важливіше враховувати класову приналежність ТЗ (малий автомобіль, седан, SUV/кросовер, мікроавтобус, вантажівка, автобус, фура), оскільки відмінності між цими категоріями дуже значні та можуть істотно змінити розподіл між учасниками ДТП. Тому для стратифікації доцільно класифікувати ТЗ за типами, що забезпечує достатню точність за збереження практичної застосовності методу. У разі, коли маси ТЗ майже однакові, Δv становить $\frac{1}{2}$ сумарної швидкості зближення незалежно від фактичних мас, тобто при розрахунку використовують коефіцієнт 0,5.

Аналогічно наведеному розділу про колінеарне (1D) зіткнення, з використанням методів формальної механіки розраховано спрощені коефіцієнти для швидкого визначення Δv при інших типах ДТП. Ці коефіцієнти дають змогу, знаючи лише швидкість одного з учасників і характер зіткнення, оперативно оцінити зміну швидкості постраждалого ТЗ і розрахувати h_{eq} (**Табл. 2**).

При аналізі таблиці особливої уваги варта категорія ДТП із переворотом, яка принципово відрізняється від інших сценаріїв методами визначення Δv. У цьому випадку зміна швидкості не пов'язана безпосередньо з фронтальною або бічною проекцією відносної швидкості, а визначається характером обертального руху автомобіля та кількістю контактів кузова з поверхнею [113]. Базову оцінку виконують за формулою

$$\Delta V_{roll} \approx k_{roll} \cdot V_0,$$

де V_0 — швидкість до початку перевороту; k_{roll} — коефіцієнт, що залежить від кількості переворотів/контактів дахом, типу перевороту та умов.

При аналізі ДТП із переворотом ТЗ використовують кілька методів визначення Δv, два з яких вважають найпростішими та ефективними. Обидва підходи еквівалентні за змістом. Рекомендують використовувати той, який простіше інтерпретувати на підставі наявної документації:

1. Метод оцінки за чверть-обертами (Nq) [114]. Оцінку проводять за кількістю чверть-обертів кузова (90° обертання=1 чверть):

Nq=1-2 – автомобіль лягає на бік або дах: $k_{roll} \approx 0,25-0,35$;

Nq=3-4 – переворот через дах або повне обертання (360°): $k_{roll} \approx 0,35-0,50$;

Nq ≥ 5 – множинні перевороти: $k_{roll} \approx 0,50-0,65$.

2. Метод за кількістю контактів дахом (M, roof-impacts) [115-117]. Оцінюють кількість контактів даху чи стійок із поверхнею дороги. Цей метод зручніший у разі множинних переворотів:

$$k_{roll} \approx 0,2 + 0,08 \cdot M,$$

де M – кількість контактів. k_{roll} не перевищуватиме 0,65.

Крім того, для підвищення точності розрахунків рекомендовано використовувати контекстні зміни залежно від конкретних умов [113, 118]. Так, при аналізі ДТП виділяють:

- переворот із «зачіпленням», спричинений зовнішньою перешкодою (бордюр, канава, м'яка узбочина), яка «чіпляє» колесо та ініціює обертання. Такі ситуації частіше призводять до більш різкого

поглинання енергії та більшої Δv. При розрахунку – $k_{roll} +0,03-0,05$;

- переворот без «зачіплення» відбувається в результаті динаміки самого автомобіля (різкий маневр, занесення, усунення центру тяжіння) без удару об перешкоду. Зазвичай Δv тут менше, ніж за сценарію із «зачіпленням», тому коефіцієнт коригують у менший бік: $k_{roll} -0,03...-0,05$.

Крім цього, ураховують крутий ухил/насип ($k_{roll} =+0,03$) та покриття дороги: тверде покриття (асфальт) – $k_{roll} -0,02...-0,03$, м'яке (ґрунт) – $k_{roll} +0,02-0,03$ [119].

Приклад. Автомобіль рухався замиською дорогою зі швидкістю близько 70 км/год. Під час маневру з'їзду на обгін одне з коліс зачепило м'яку ґрунтову узбочину. Втрата опори спричинила «зачіплення» (типовий переворот із «зачіпленням»), після чого машина перекинулася через бік, здійснивши два контакти дахом із поверхнею.

За методом roof-impacts $M=2$ $k_{roll} \approx 0,36$. Додатково, оскільки переворот ініційований «зачіпленням» на ґрунтовій кромці, вносимо поправку +0,04 («зачіплення») та +0,02 (ґрунт), підсумковий $k_{roll} \approx 0,42$.

Таким чином,

$$\Delta v \approx (0,36 + 0,04 + 0,02) \cdot V_0 \approx 0,42 \cdot 70 \approx 29,4 \text{ км/год},$$

$$h_{eq} \approx \frac{29,4^2}{254} \approx 3,4 \text{ м}.$$

Отримане значення відповідає рівню 6 за шкалою (інтервал 2-4 м).

Наведені дані демонструють можливість застосування відносно простих методик для орієнтовної оцінки ступеня травмувального впливу на організм потерпілого в межах двох базових сценаріїв – падіння з висоти й різні варіанти ДТП. Для прискорення та спрощення обробки інформації, виключення необхідності самостійного виконання математичних розрахунків, а також для врахування низки модифікаційних чинників нами був розроблений спеціалізований онлайн-калькулятор. Його структура, функціональні можливості й алгоритми роботи описані у відповідному розділі цієї статті.

Таблиця 2. Коефіцієнти для швидкого визначення Δv за різних типів ДТП (при порівнянних масах транспортних засобів) [107-112]

Тип ДТП	Коефіцієнт (k) для Δv	Коментар
Колінеарна (лобове/ззаду)	0,5	Кожний ТЗ отримує половину відносної швидкості
Бічний удар	0,5	Для ТЗ, який ударяють, зміна швидкості ~ половина нормальної компоненти швидкості
Косий удар	0,25 – для 30° 0,35 – для 45° 0,43 – для 60° 0,48 – для 75°	Δv залежить від кута контакту
Ковзання (sideswipe)	0,05-0,20	При дотичному контакті Δv мала, енергія йде в тертя/ковзання
Удар об жорсткий бар'єр	≈1	При e≈0 Δv близька до швидкості удару
Переворот	0,25-0,65	Δv оцінюють як частку швидкості до початку перевороту; залежить від кількості переворотів
Багатоподійне	Максимум із Δv	При кількох контактах беруть найбільшу Δv за даними EDR чи реконструкції

Оцінка механічної дії на хребет

Закономірно, що h_{eq} , що відображує лише інтегральну величину механічної експозиції, сама по собі не дає змоги адекватно оцінити рівень впливу на хребет [70]. Реальна травматичність визначається тим, як енергія перетворюється на сили за кінцевий час і на кінцевому шляху гальмування, в якій геометрії прикладена до тіла та яка її частка механічно впливає саме на хребтовий стовп [1, 120]. Тому однакове h_{eq} може визначати принципово різні клінічні наслідки [77, 121, 122]. Так, падіння з 1 м на жорсткий бетон і товстий мат, ідентичні за h_{eq} , значно відрізняються за навантаженням та ризиком пошкодження [123].

До ключових додаткових чинників, що впливають на реальну травматичність, належать маса тіла пацієнта, коефіцієнт передачі імпульсу й ефективна дистанція уповільнення [120, 124–126].

Маса тіла пацієнта

Маса тіла пацієнта (m) – це фундаментальний параметр, що визначає інерційні властивості системи [127, 128]. Для будь-якої травматичної події із заданою Δv і, відповідно, еквівалентною висотою h_{eq} маса лінійно масштабує як енергію, що підлягає розсіюванню, так і імпульс, який має бути сприйнятий опорними структурами [129, 130].

З огляду на інтегральну форму другого закону Ньютона, робота зовнішніх сил, необхідна для повної зупинки тіла, дорівнює його кінетичній енергії (E):

$$E = \frac{1}{2} m(\Delta v)^2 = mgh_{eq}$$

При заданих V або h_{eq} величина E пропорційна масі. Отже, тяжчому тілу потрібно погасити більший енергетичний запас при однаковій h_{eq} .

Імпульс (J), який мають надати гальмівні сили, розраховують за формулою

$$J = \int F(t)dt = m\Delta v$$

Він зростає лінійно в міру збільшення маси при фіксованій Δv [131].

Відповідно, якщо зупинка відбувається за фіксований час (t), то середня сила впливу становитиме:

$$\bar{F} = \frac{J}{t} = \frac{m\Delta v}{t}$$

що також лінійно масштабується за масою.

Ближче до клінічної практики ситуація, коли гальмування відбувається на характерному шляху s , наприклад, товщина покриття, що амортизує, або глибина деформації конструкції. У цьому випадку середня сила впливу може бути розрахована за формулою

$$\bar{F} = \frac{E}{s} = \frac{mgh_{eq}}{s}$$

яка відображує лінійну залежність від маси за інших однакових параметрів [132, 133].

Таким чином, маса тіла пацієнта є самостійним модифікаційним чинником травматичності. При фіксованих Δv або h_{eq} саме вона систематично збільшує необхідні для зупинки імпульс і роботу, а отже, і середні/пікові навантаження, що припадають на опорні структури хребта [125]. Тому для коректної

інтерпретації «сили події» масу тіла пацієнта слід урахувати як мінімум в описовій частині аналізу, навіть якщо сама метрика оцінки, що використовується, є масо-нейтральною [134].

Коефіцієнт передачі імпульсу

Коефіцієнт передачі імпульсу (T_{land}) – це безрозмірна величина, що характеризує, яка частина механічної енергії травматичної події доходить до хребта [1, 135]. Він показує ефективність «біомеханічних фільтрів» (суглобів, м'язів, м'яких тканин) і технічних систем захисту (ремені, подушки, сидіння), які розсіюють чи перерозподіляють удар [120, 136]. Таким чином, T_{land} визначає, яка частина загальної механічної експозиції події трансформується в навантаження на хребтовий стовп. Найчастіше це осьова компресія, але залежно від вектора докладання сили можуть домінувати й інші компоненти (зсувні або ротаційні), величина яких безпосередньо визначається напрямком і результирующим вектором зовнішнього впливу [137].

Основними чинниками, що визначають величину T_{land} , є точка докладання зусилля та геометрія контакту [126, 137, 138]. Так, при падінні на ноги з глибоким згинанням колін й активною роботою м'язів значна частина імпульсу розсіюється, T_{land} зазвичай становить 0,4–0,6 [139, 140]. Навпаки, при падінні на сідниці або спину амортизація мінімальна, значення T_{land} наближається до 0,9–1,0, тобто майже вся енергія передається на грудо-поперековий відділ [141]. При фронтальних ДТП ремінь безпеки та подушка розподіляють кінетичне навантаження по грудній клітці й плечовому поясу, збільшуючи площу та тривалість поглинання енергії, що знижує пряму передачу імпульсу на хребет [142, 143]. За відсутності ременя удар об кермо або панель здійснюється локально й практично без ланок, що амортизують, унаслідок цього навантаження передається на хребтовий стовп майже повністю. У деяких випадках (наприклад, осьовий удар через голову) локальна концентрація імпульсу може формально оцінюватися >1 , що відображує не «створення енергії», а підсилення її впливу на обмежений сегмент хребта [144].

У клінічній практиці T_{land} оцінюють за сценарієм травми: через які структури пройшло основне навантаження, скільки з нього було поглинено «по дорозі», яка частина досягла хребтового стовпа [126, 141]. Для розрахунків використовують типове (середнє) значення коефіцієнта, а мінімальні та максимальні межі розглядають як діапазон варіабельності.

На підставі аналізу даних літератури визначено усереднені значення T_{land} з орієнтовними діапазонами для основних клінічних сценаріїв (**Табл. 3**).

Ефективна дистанція уповільнення

Ефективна дистанція уповільнення (S_{land}) – це реальний шлях, на якому швидкість тіла (або його релевантної для хребта частини) гаситься після контакту [139, 150]. На відміну від «геометричної» висоти падіння вона охоплює всі джерела «м'якості» системи: деформацію опори (мат, ґрунт, сидіння, подушка безпеки), зминання м'яких тканин, згинання суглобів, а також проковзування та повороти тіла [129, 133]. Що більша S_{land} , то плавніше розподіляється поглинання енергії в часі та нижчі середні й пікові навантаження на хребет при тій самій події [154].

Таблиця 3. Усереднені значення коефіцієнта передачі імпульсу на грудо-поперековий відділ хребта для деяких типових клінічних сценаріїв [1,70,120,126,135–154]

Короткий опис	T_{land} (мін-типове-макс)	Обґрунтування (коротко)
Падіння:		
на ноги, глибока амортизація (глибокий присід)	0,40–0,55–0,65	Значна частина імпульсу гаситься за рахунок роботи колінних і кульшових суглобів, а також м'язово-зв'язкового комплексу; на хребет транслюється не більше ніж половини енергії
на ноги, напівзігнуто	0,60–0,70–0,80	Помірна фільтрація енергії крізь суглоби та м'язи; частка осьового навантаження, що передається, вище, ніж при глибокій амортизації, але частина імпульсу поглинається
на ноги, жорстко (майже заблоковано)	0,80–0,90–0,95	Суглобова амортизація мінімальна; імпульс майже повністю спрямовується у вісь хребта, формуючи виразну компресію
на сідниці/крижі	0,80–0,95–1,05	Амортизаційна здатність м'яких тканин таза обмежена; навантаження практично повністю передається на поперековий відділ. У деяких випадках можлива локальна концентрація (>1)
на спину	0,90–1,05–1,15	Удар по широкій площі з передачею крізь реберно-хребтовий каркас формує майже повне осьове навантаження; додатково виникає момент вигину
на бік/таз	0,60–0,75–0,85	Значна частина енергії розсіюється крізь бічні м'які тканини та структуру таза; осьова компонента знижена
на руки/лікть/коліни	0,40–0,60–0,70	Кінцівки виконують функцію амортизаторів, розсіюючи частину енергії; до хребта доходить лише 40–70% імпульсу
на коліна (з наступним осьовим ударом)	0,50–0,70–0,85	Первинна фільтрація крізь згин колінного суглоба, потім різка передача залишкової енергії до осі; кінцева частка варіативна
ДТП:		
фронтальний: ремінь + подушка	0,50–0,65–0,75	Ремінь і подушка розподіляють навантаження по грудній клітці та плечовому поясу, збільшують тривалість контакту, зменшуючи частку енергії, що досягає хребта
фронтальний: лише ремінь	0,60–0,75–0,85	За відсутності подушки розподіл менш ефективний; імпульс крізь ремінь і грудну клітку переважно транслюється в хребет
фронтальний: без ременя (панель/кермо)	0,85–0,95–1,00	При прямому контакті грудної клітки з кермом або панеллю відсутні амортизаційні структури; майже весь імпульс передається хребту
бічний удар із ременем	0,55–0,70–0,80	Ремінь утримує торс і перерозподіляє частину енергії; деформація дверей та сидіння додатково розсіює навантаження
бічний удар без ременя	0,70–0,85–0,95	Жорсткий удар крізь бічну поверхню тіла; відсутній контрольований розподіл, частка передачі вище
переворот із ременем	0,90–1,00–1,10	При контакті даху з головою/плечами формується аксіальне навантаження з мінімальною фільтрацією; локальна концентрація може підвищувати передачу
переворот без ременя	0,90–1,05–1,15	Контакт тіла з жорсткими елементами салону чи землею; геометрія удару варіативна, але частіше виникає прямий і точковий вплив на хребет

Примітка: при практичних розрахунках рекомендовано використовувати типове (середнє) значення T_{land} , оскільки воно відображає найімовірніший сценарій контакту. Значення «мін» та «макс» наведено як орієнтири для оцінки ступеня варіабельності та можливої похибки розрахунків.

На величину S_{land} впливають точка докладання зусилля і поза (ноги зі згинанням колін дають довгий шлях, падіння на сідниці або на спину — короткий), властивості поверхні (твердий асфальт майже не «працює», м'які покриття, сніг, мат «подовжують» шлях), а також елементи пасивної безпеки в транспорті (ремінь, натягувач, подушка, деформація сидіння та кузова додають хід уповільнення) [152] (**Табл. 4, Табл. 5**). У динаміці важливі й вторинні рухи: проковзування, перекочування, обертання зменшують частку суворо осьової компресії на хребет, фактично збільшуючи ефективну дистанцію [113, 118].

Оцінку в клініці здійснюють залежно від сценарію та контексту: аналізують позу при контакті, тип поверхні/обладнання, характер пошкоджень, потім обирають реалістичний діапазон значень для розрахунків.

Запропоновані для характеристики травми метрики

На підставі аналізу описаних параметрів з урахуванням принципів прикладної механіки для досягнення основної мети дослідження нами запропоновано набір метрик, що дають змогу формалізувати та кількісно описати механічну дію на хребет.

1. Середнє «спінальне» перевантаження

Середнє «спінальне» перевантаження (\bar{I}_{spine}) відображає «жорсткість» впливу події, що травмує, на хребет і виражається в кратностях прискорення вільного падіння (g). На відміну від абсолютних силових або енергетичних параметрів \bar{I}_{spine} безпосередньо не залежить від маси тіла пацієнта й тому є універсальним, порівняним критерієм у різних клінічних випадках [169].

Таблиця 4. Значення ефективної дистанції уповільнення для деяких найтипівіших клінічних ситуацій [131, 136, 139–150, 152–154]

Короткий опис	S_{land} м (мін–типове–макс)	Чим забезпечено
Падіння:		
на ноги, глибока амортизація (глибокий присід)	0,40–0,50–0,60	Згинання колін і кульшових суглобів, еластичність стопи, «зсув» таза назад
на ноги, напівзігнуто	0,25–0,30–0,40	Часткове згинання колін, пружна робота суглобів, помірні амортизація
на ноги, жорстко (майже заблоковано)	0,15–0,20–0,25	Мінімальна робота суглобів, різка передача удару; короткий шлях
на сидниці/крижі	0,02–0,04–0,06	Стиснення м'яких тканин таза, мінімальне ковзання; дуже короткий шлях
на спину	0,03–0,04–0,05	Деформація м'яких тканин спини та грудної клітки при ударі
на бік/таз	0,06–0,08–0,10	Деформація бічних м'яких тканин і компресія таза
на руки/ліктя/коліни (з передавальним навантаженням)	0,10–0,15–0,20	Згинання кінцівок, часткова амортизація суглобами
на коліна (з наступним осьовим ударом)	0,08–0,10–0,12	Деформація м'яких тканин коліна + згинання суглобів до удару хребта
ДТП:		
фронтальний: ремінь + подушка	0,20–0,30–0,40	«Хід» ременя, стиснення подушки, деформація сидіння
фронтальний: лише ремінь	0,15–0,25–0,30	Розтягування ременя та деформація сидіння
фронтальний: без ременя (панель/кермо)	0,02–0,05–0,08	Майже миттєва зупинка; вкрай жорсткий контакт
бічний удар із ременем	0,10–0,15–0,25	Деформація дверей/сидіння, ковзання торса
бічний удар без ременя	0,05–0,10–0,15	Жорсткий контакт; менше керованої деформації
переворот із ременем	0,02–0,04–0,08	Контакт даху з плечами/головою; обмежений хід
переворот без ременя (удар о салон/землю)	0,02–0,06–0,10	Жорсткий, варіативний за геометрією; мала дистанція гальмування

Примітка: при практичних розрахунках рекомендовано використовувати типове (середнє) значення S_{land} оскільки воно відображує найімовірніший сценарій контакту. Значення «мін» та «макс» наведено як орієнтири для оцінки ступеня варіабельності та можливої похибки розрахунків.

Таблиця 5. Модифікаційні показники ефективної дистанції уповільнення залежно від середовища, поверхні, екіпірування [123,155–168]

Параметр	Вклад у S_{land} м (мін–типове–макс)
Асфальт/бетон/плитка	0,001–0,003–0,005
Дерев'яна підлога/лінолеум	0,002–0,005–0,010
Спортивний килим завтовшки 10–20 мм	0,01–0,02–0,03
Татамі завтовшки 40–60 мм	0,03–0,05–0,07
Гімнастичний мат завтовшки 80–120 мм	0,08–0,12–0,18
Земля/ґрунт ущільнений	0,005–0,015–0,030
Пісок сухий (пляж)	0,10–0,20–0,30
Пісок вологий/щільний	0,05–0,10–0,20
Сніг утрамбований	0,02–0,05–0,10
Сніг пухкий (20–40 см)	0,15–0,30–0,50
Вода, вхід «ногами вниз»	0,50–1,00–1,50
Вода, вхід «плиском»	0,05–0,10–0,20
Одяг тонкий	0,002–0,005–0,010
Одяг зимовий/багат шаровий	0,01–0,02–0,03

Примітка: у випадку, коли враховуються модифікаційні показники, для розрахунків використовують суму компонентів на шляху навантаження.

Формально величина визначається як

$$\bar{G}_{spine} = \frac{h_{eq}}{S_{land}} * T_{land}$$

У разі падіння значення \bar{G}_{spine} визначається насамперед типом поверхні та положенням тіла: мінімальний шлях гальмування при падінні на асфальт або бетон супроводжується високими перевантаженнями, тоді як м'який ґрунт, вода або мат збільшують шлях уповільнення та знижують їхню величину [133, 152, 170]. При падінні на ноги перевантаження залежить від здатності до амортизації: що глибше згинання в суглобах, то більше S_{land} і менше \bar{G}_{spine} .

У разі ДТП показник залежить від ефективності пасивних систем безпеки. Ремінь і подушки збільшують шлях і час гальмування, розподіляють навантаження на велику площу, знижуючи підсумкове перевантаження [143, 170, 171]. За відсутності утримувальних систем або при контакті з жорсткими елементами салону шлях уповільнення мінімальний, величина T_{land} наближається до 1, \bar{G}_{spine} досягає максимальних значень.

Головна перевага параметра \bar{G}_{spine} полягає в його порівнянності: однакове значення означає однакову «жорсткість» впливу на хребет незалежно від маси тіла потерпілого [169]. Припускаємо, що цей показник добре корелює з ймовірністю структурних ушкоджень і може розглядатися як ключовий інтегральний критерій біомеханічної травматичності.

2. Енергія, що діє на хребет

Енергія, що діє на хребет (E_{spine}) характеризує абсолютну кількість механічної енергії, сприйнятої хребетним стовпом. На відміну від масо-нейтральних показників, що відображають відносну «жорсткість» впливу, E_{spine} показує повний енергетичний бюджет, який має бути поглинений хребтом:

$$E_{spine} = m g h_{eq} T_{land}$$

При падіннях значення E_{spine} залежить насамперед від маси тіла та біомеханічної схеми передачі навантаження: при падінні «на ноги» частина енергії гаситься в суглобах і м'язах, а при падінні на сідниці або голову практично весь імпульс транслюється вздовж осі хребта [158, 172, 173]. У ДТП енергія, що доходить до хребта, визначається масою тіла пасажирів та напрямком зусилля (крізь грудну клітку чи таз)[174]. Системи пасивної безпеки (ремені, подушки) не змінюють E_{spine} , але збільшують S_{land} , розтягуючи імпульс у часі та зменшуючи пікові навантаження [175, 176].

Перевагою цієї метрики є фізична прозорість: вона виражається в абсолютних енергетичних одиницях (Дж) і може використовуватись для інженерних та біомеханічних розрахунків, а також для моделювання травм. Обмеженням є залежність від маси: за однакової h_{eq} важчий пацієнт неминуче отримує більше енергетичне навантаження на хребет [177].

Таким чином, E_{spine} слід розглядати як вторинний параметр, важливий для аналізу сумарної енергетичної складової події та біомеханічного моделювання, тоді як для клінічного зіставлення кращими можуть бути масо-нейтральні показники.

3. Середня сила дії на хребет

Середня сила дії на хребет (F_{spine}) відображує усереднену величину осьової сили, яка сприймається хребтом під час гальмування. На відміну від масо-

нейтральних характеристик F_{spine} безпосередньо залежить від маси тіла пацієнта й тому описує абсолютний силовий масштаб травматичної дії.

$$\bar{F}_{spine} = \frac{m g h_{eq} T_{land}}{S_{land}}$$

При падіннях величина \bar{F}_{spine} визначається масою тіла й типом контакту: падіння на тверду поверхню з мінімальним шляхом гальмування призводить до екстремально високих середніх сил [161, 162], тоді як м'яке покриття або амортизаційні властивості суглобів значно знижують їх [155, 167]. При ДТП показник залежить від маси тіла пасажирів та ефективності роботи утримувальних систем [176]. Ремінь і подушка безпеки збільшують S_{land} , тому середня та пікова сили зменшуються [178].

Перевагою цієї метрики є її наочність: сила, виражена в ньютоні, інтуїтивно зрозуміла для клініцистів та інженерів і порівнянна з відомими межами міцності кістково-зв'язкових структур [173]. Обмеженням є залежність від маси та складність точної оцінки S_{land} . Крім того, у реальності найкритичнішою може бути не середня, а пікова сила, яка може істотно відрізнятись від усередненого значення [177].

Таким чином, \bar{F}_{spine} можна розглядати як додатковий силовий дескриптор, корисний в інженерних і біомеханічних додатках, але не як основний клінічний показник.

4. Спінально-еквівалентна висота

Спінально-еквівалентна висота (h_{spine}^{eff}) – це перерахована (нормована) еквівалентна висота падіння, яка дає таке саме середнє осьове навантаження на хребтовий стовп в еталонних умовах гальмування, як і реальна травматична подія за фактичної пози та характеру контакту. Ця метрика масо-нейтральна: вона не залежить від маси, що забезпечує коректне зіставлення випадків. Ідея полягає в тому, щоб звести різномірні механізми до одного фізично інтерпретованого масштабу висоти, орієнтованого саме на хребет з урахуванням передачі та «жорсткості» контакту.

Формально величину визначають як

$$h_{spine}^{eff} = h_{eq} \frac{s_{ref}}{s_{land}} T_{land}$$

де s_{ref} – еталонний шлях гальмування (у нашому дослідженні запропоновано 0,10 м).

У клінічних сценаріях падіння величина h_{spine}^{eff} природним чином диференціює режими контакту: при приземленні на ноги S_{land} велика за рахунок багатосуглобової амортизації (колінні та кульшові суглоби, еластичність взуття), а частина імпульсу й роботи розсіюється дистальніше за хребтовий стовп. Це враховується через знижений коефіцієнт T_{land} (<1). Навпаки, при падінні на спину або сідниці шлях гальмування значно коротший (жорсткий контакт, мала деформація опори), осьова компонента імпульсу максимальна, T_{land} зростає, і за однакової h_{eq} отримуємо більшу h_{spine}^{eff} , тобто локально «жорсткіший» вплив на грудо-поперековий відділ хребта [172, 173]. У ДТП метрика відображує роботу систем пасивної безпеки: ремінь, переднатягувачі та подушка не змінюють енергетичний бюджет події (mgh_{eq}), але збільшують S_{land} (подовжують шлях уповільнення торса й розтягують імпульс у часі), тим самим знижуючи h_{spine}^{eff} [175, 176]. Геометрія шляху навантаження

залишається тією самою (торс), тому в першому наближенні T_{land} змінюється мало.

Фіксація еталонного шляху $s_{ref}=0,1$ м унормовує метрику й робить її міжсценарно порівнянною: h_{spine}^{eff} слід трактувати як «висоту в стандартних умовах», енергетично еквівалентну даній події саме для хребта. Як зазначено вище, середнє осьове перевантаження хребта в одиницях g дорівнює

$$\bar{g}_{spine} = \frac{h_{eq}}{S_{land}} * T_{land} \Rightarrow \bar{g}_{spine} = \frac{h_{spine}^{eff}}{s_{ref}}$$

Інакше кажучи, h_{spine}^{eff} — це \bar{g}_{spine} , переведена в «метри» щодо вибраного s_{ref} , що зберігає фізичний зв'язок із динамікою гальмування та одночасно забезпечує наочну клінічну інтерпретацію [179]. Метрика масо-нейтральна й тому зручна для популяційних порівнянь і кореляції з показниками якості кісткової тканини.

Основною перевагою показника є уніфікація опису сили події в зручному «висотному» форматі при збереженні клінічної специфіки хребта. Це спрощує стратифікацію ризику та зіставлення когорт, дає змогу безпосередньо переводити h_{spine}^{eff} у категоріальні бали запропонованої шкали (спінально орієнтованої) для оперативної комунікації та статистичного аналізу, а також застосовувати для побудови кількісних зв'язків із показниками якості кісткової тканини — двофотонною рентгенівською абсорбціометрією (DXA), показником трабекулярної кісткової структури (TBS) і комп'ютерною томографією з оцінкою щільності у Hounsfield Units (СКТ-HU) [180, 181].

Обмеження метрики пов'язані з необхідністю експертної реконструкції умов контакту: похибки в оцінці S_{land} і T_{land} лінійно переносяться в результат, тому

докладна документація обставин отримання травм значно підвищує ефективність оцінки.

У сумі h_{spine}^{eff} є базовим масо-нейтральним дескриптором механічної експозиції на хребет, який інтегрує геометрію події, позу, шлях гальмування та точку докладання зусилля, що забезпечує фізично коректну й клінічно змістовну оцінку жорсткості впливу.

Розробка онлайн-калькулятора

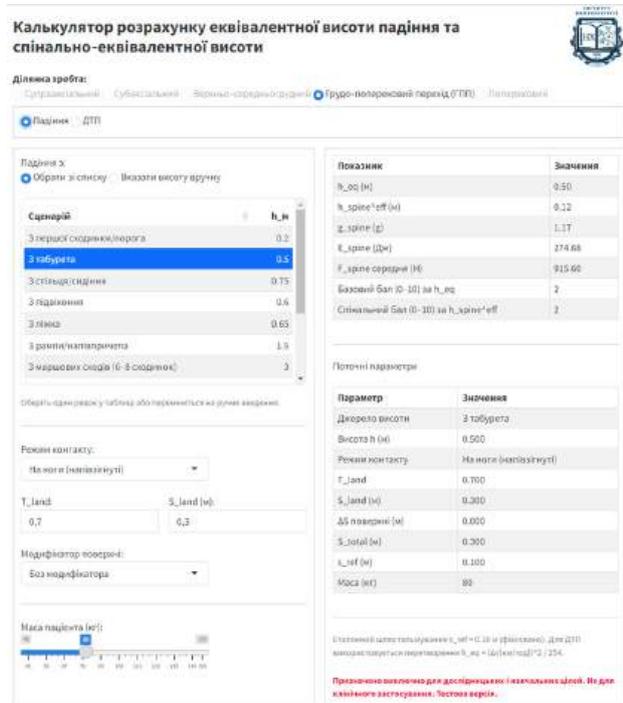
Для прискорення обробки даних, виключення необхідності постійного звернення до довідкових таблиць, розширення переліку сценаріїв та спрощення коригування коефіцієнтів для валідизації нами розроблено веб-калькулятор (Рис.3).

Інструмент реалізує модульне введення за типовими сценаріями («Падіння», «ДТП»), автоматично підтягує типові значення та діапазони для параметрів T_{land} і S_{land} залежно від обраної пози й поверхні, а також при ДТП надає швидкі оціночні коефіцієнти для Δv за типом ТЗ і зіткнення. Користувач може залишати значення «за замовчуванням» (відповідно до вбудованих довідників) або перевизначати їх вручну; усі зміни миттєво враховуються в розрахунках.

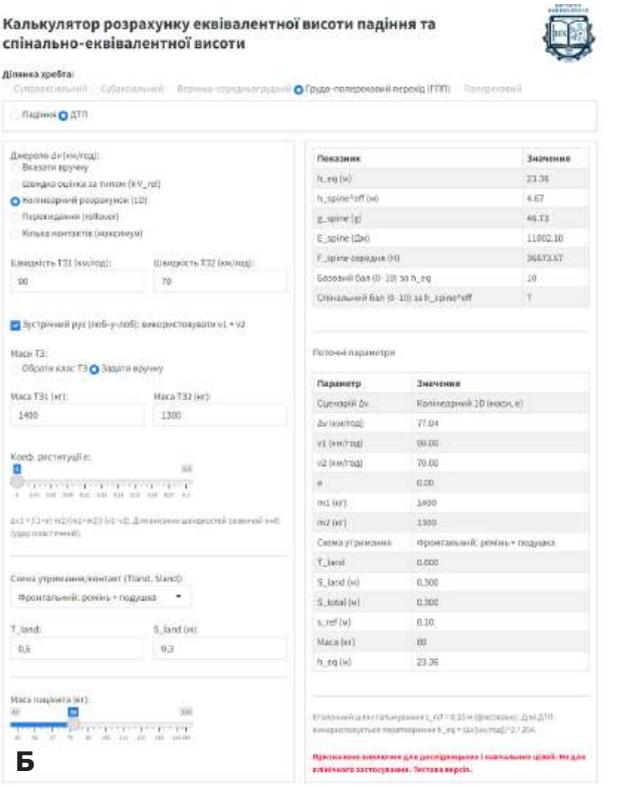
Калькулятор доступний за www.spine.org.ua/scale.

Валідація шкали та похідних метрик

Метою наступного етапу було кількісно оцінити метричні властивості спінально орієнтованої метрики h_{spine}^{eff} та похідних показників (базової h_{eq} , \bar{g}_{spine} , E_{spine} та F_{spine}), а також підсумкових балів (0–10) на їхній основі. Аналіз передбачав визначення конструктивної та критеріальної валідності, відносної та абсолютної надійності, згоди за безперервними метриками, сталості порогів і відомої відмінності (known groups).



А



Б

Рис. 3. Інтерфейс розробленого веб-калькулятора: А — падіння; Б — ДТП

Конструктна валідність. У межах масиву клінікоанамнестичних даних, використаних для верифікації, метрика h_{spine}^{eff} демонструвала очікувану конвергенцію з інтегральною величиною механічної експозиції: кореляція з базовою h_{eq} становила 0,82 ($p < 0,001$), тобто $\approx 67\%$ дисперсії h_{spine}^{eff} пояснюється варіабельністю енергії події, приведеної до висоти. Зв'язки з морфологією ушкодження хребта за даними СКТ/МРТ також були передбачуваними: зі зростанням h_{spine}^{eff} підвищувалися виразність передньої клиноподібної деформації ($r = 0,58$, $p < 0,001$, пояснена дисперсія $\approx 34\%$) і ступінь компретації хребтового каналу ($r = 0,49$, $p < 0,001$, пояснена дисперсія $\approx 24\%$). За порядковою тяжкістю ушкоджень АО Spine виявлено монотонну залежність ($\rho = 0,62$, $p < 0,001$): перехід від низькоенергетичних патернів (A1) до вибухових і комплексних типів (A3/A4, B/C) супроводжувався зростанням значень метрики.

У бінарній логістичній регресії для порога $\geq A3$ кожен додатковий 1 м асоціювався зі збільшенням OR отримання вибухових/нестабільних ушкоджень у 1,85 разу (95% CI 1,45–2,38, $p < 0,001$) після поправок на вік і стать. Це узгоджується з біомеханічним змістом показника: підвищення h_{spine}^{eff} на 1 м майже подвоює шанси виникнення ушкоджень типу $\geq A3$.

У практичній інтерпретації: якщо при значенні метрики h_{spine}^{eff} 0,8 м умовна ймовірність ушкодження $\geq A3$ становить $\approx 20\%$ (OR $\approx 0,25$), то при 1,8 м (+1 м) OR $\cdot 1,85$ ($\approx 0,46$), ймовірність підвищується приблизно до 32%, а при прирості на 2 м — до $\approx 46\%$. Перевірка лінійності логіту (тест Vox–Tidwell, обмежені кубічні сплайни) не виявила суттєвої нелінійності в досліджуваному діапазоні й ознак мультиколінеарності.

Критично важлива для метрики масонейтральність підтверджена частковою кореляцією з масою тіла: за контролю механізму та пози $r = 0,06$ ($p = 0,41$), тобто статистично значущої асоціації немає. Енергозалежна метрика E_{spine} очікувано тісно корелювала з масою ($r = 0,74$, $p < 0,001$). Ці результати підтверджують теоретичне трактування метрики h_{spine}^{eff} як показника зовнішньої механічної експозиції на хребет, а не індикатора міцності кісткової тканини.

Критеріальна валідність. За відсутності зовнішніх верифікованих показників (EDR, об'єктивний вимір висоти) критерієм слугували клінічні наслідки за даними нейровізуалізації. Здатність h_{spine}^{eff} прогнозувати наявність перелому хребця за критеріями Hosmer–Lemeshow оцінено як «добру»: площа під ROC-кривою (AUC = 0,82, 95% CI 0,73–0,90). Для виявлення компресійно-вибухових ушкоджень (A3/A4) AUC = 0,78. Оптимальний поріг $\approx 1,3$ м забезпечував чутливість $\approx 0,76$ і специфічність $\approx 0,72$ (за максимумом індексу Юдена). Це відповідає $LR^+ \approx 2,7$ та $LR^- \approx 0,33$, що клінічно означає слабке — гранично помірне підсилення апостеріорної ймовірності при позитивному тесті та слабке зниження при негативному. Отже, метрика корисна як додатковий інструмент стратифікації ризику. Для ознак ушкодження заднього зв'язкового комплексу дискримінація очікувано нижча через складнішу механіку: AUC = 0,74, поріг $\approx 2,4$ м. У сценаріях скринінгу (мінімізація пропуску) доцільно зміщувати поріг нижче за оптимум (на користь чутливості), у підтверджувальних — вище за оптимум (на користь специфічності). Поодиноким механічним дескриптором за визначенням не пояснює всю міжіндивідуальну

варіабельність, але наведені значення AUC свідчать про практично корисну діагностичну цінність для стратифікації ризику та ранжування тяжкості. Додаткові перевірки стійкості (рестрикція аналізів випадками з низькою невизначеністю щодо T_{land} і S_{land} , аналіз лише детально задокументованих поз і поверхонь контакту, бутстреп-оцінки AUC) не змінювали висновків по суті. Калібрування моделей (інтерсепт/нахил) залишалися задовільним, без ознак систематичного зміщення в зоні клінічно значущих порогів. Сукупно конструктна та критеріальна валідність узгоджено підтверджують, що h_{spine}^{eff} є інформативним показником «жорсткості події» для хребта, корисним для клінічної комунікації, стратифікації та досліджень зв'язку з якістю кісткової тканини й результатами терапії.

Відносна надійність вимірів. Міжекспертну узгодженість оцінок за представленими анамнестичними випадками ($n = 40$, 5 експертів) оцінювали за допомогою внутрішньокласового коефіцієнта кореляції ICC(2,1) (двохфакторна модель, випадкові ефекти, absolute agreement, single-measure). Для базового бала, розрахованого безпосередньо з h_{eq} , ICC становив 0,84 (95% CI — 0,77–0,89), що відповідає «добрий» узгодженості. Для спінально-орієнтованого бала за h_{spine}^{eff} ICC виявився дещо нижчим — 0,79 (95% CI — 0,71–0,86), що також відповідає діапазону «доброї» надійності.

При усередненні оцінок п'яти експертів (ICC(2,k)) узгодженість зростала до 0,95 і 0,92 відповідно для h_{eq} та h_{spine}^{eff} і відповідала «відмінному» рівню. Зважений коефіцієнт k із квадратичними вагами становив 0,78 (h_{eq}) та 0,72 (h_{spine}^{eff}), що відповідає «суттєвому» узгодженню за шкалою Landis & Koch. Повторна оцінка підвибірки випадків (тест-ретест, 10 випадків, повтор через ≥ 2 тижні) продемонструвала високу стійкість: ICC(2,1) становив 0,90 (95% CI — 0,83–0,95) для базового бала і 0,85 (95% CI — 0,76–0,92) для спінального. Середня абсолютна різниця між першою та повторною оцінкою становила 0,42 і 0,58 бала відповідно, що підтверджує високу відтворюваність інструменту в часі.

Абсолютна надійність. Для оцінки точності індивідуального вимірювання використані показники SEM і MDC_{95} .

SEM розраховували за формулою

$$SEM = SD \sqrt{1 - ICC},$$

де SD — стандартне відхилення балів по всій вибірці.

Для базового бала SEM становив 0,80 бала, для спінального — 0,95 бала.

MDC_{95} розрахована за формулою

$$MDC_{95} = 1,96 \sqrt{2} SEM,$$

становила $\approx 2,2$ і 2,6 бала відповідно для h_{eq} та h_{spine}^{eff} .

Отримані результати свідчать, що коливання значень менш ніж на 2–3 бали можуть бути зумовлені випадковою варіабельністю. Водночас клінічна значущість такої різниці залежить від діапазону шкали: на нижніх рівнях (де інтервали відповідають порядку десятків сантиметрів) зміна на 1–2 бали зазвичай несуттєва, тоді як на верхніх рівнях навіть 1 бал (що відповідає збільшенню висоти на порядок метрів/десятків метрів) може відображувати істотну зміну механічної експозиції. Загалом перевищення

MDC₉₅ ≈2–3 бали з високою ймовірністю свідчить про статистично значущу різницю, але клінічно інтерпретувати її слід з урахуванням рівня шкали.

Таким чином, шкала демонструє одночасно високу відносну надійність (узгодженість між експертами та стабільність у часі) та прийнятну абсолютну точність (невисокі SEM і MDC) (Табл. 6). Це дає змогу використовувати її як для стратифікації пацієнтів на підставі єдиного вимірювання, так і для динамічного спостереження, при якому значущими слід вважати зміни ≥MDC.

Згода за безперервними метриками. Для оцінки згоди між розрахунковими значеннями метрик (за оцінкою експертів) та еталонними алгоритмічними обчисленнями (онлайн-калькулятор на основі значень, отриманих авторами) побудовано графіки Bland–Altman (Рис. 4).

Таким чином, для базової метрики h_{eq} виявлено практично повний збіг експертних та еталонних оцінок, тоді як для h_{spine}^{eff} діапазон згоди ширший. Отримані результати відображують не методичну помилку, а біомеханічну невизначеність, пов'язану з варіабельністю вибору шляху гальмування та коефіцієнта передачі навантаження. Аналіз

гетероскедастичності показав, що розкид не зростає при високих або низьких рівнях метрики, що гарантує збереження порівнянної точності в усьому діапазоні аналізованих значень.

Стабільсть порогів. Для перевірки стійкості класифікації за бальною шкалою проведено аналіз чутливості з варіюванням граничних значень ±10–15%, а також перерахунок під час використання «мінімальних» та «максимальних» сценаріїв S_{land} та T_{land} при оцінці h_{spine}^{eff} .

Для базової шкали (за h_{eq}) збіг присвоєного рівня зберігався в 77% випадків, розбіжність на ±1 рівень — у 20%, на більш ніж ±1 рівень — лише в 3%.

Для спінальної шкали (за h_{spine}^{eff}) ідентичність рівня спостерігалася в 62% випадків, зміщення на ±1 рівень — у 31%, на більш ніж ±1 рівень — у 7%.

Найбільша чутливість спостерігалася в перехідних сценаріях (наприклад, падіння на коліна з подальшою осьовою передачею навантаження) та при приземленні на м'які поверхні, де діапазони можливих S_{land} і T_{land} ширші. Незважаючи на це, навіть за зміни параметрів на 15% розбіжності в більшості випадків не перевищували одного рівня шкали, що підтверджує її практичну стійкість.

Таблиця 6. Показники відносної та абсолютної надійності шкали (40 випадків, 5 експертів)

Показник	Базовий бал (h_{eq})	Спінальний бал (h_{spine}^{eff})	Інтерпретація
ICC(2,1) (міжекспертна)	0,84 (95% CI 0,77–0,89)	0,79 (95% CI 0,71–0,86)	«Добра» узгодженість (Koo & Li, 2016)
ICC(2,k) (середнє 5 експертів)	0,95	0,92	«Відмінна» узгодженість
Зважена k	0,78	0,72	«Суттєва» (Landis & Koch, 1977)
ICC(2,1) ,тест–ретест	0,90 (95% CI 0,83–0,95)	0,85 (95% CI 0,76–0,92)	Висока стійкість
SEM, бал	0,80	0,95	Стандартна похибка вимірювання
MDC ₉₅ , бал	2,2	2,6	Мінімально вірогідна зміна

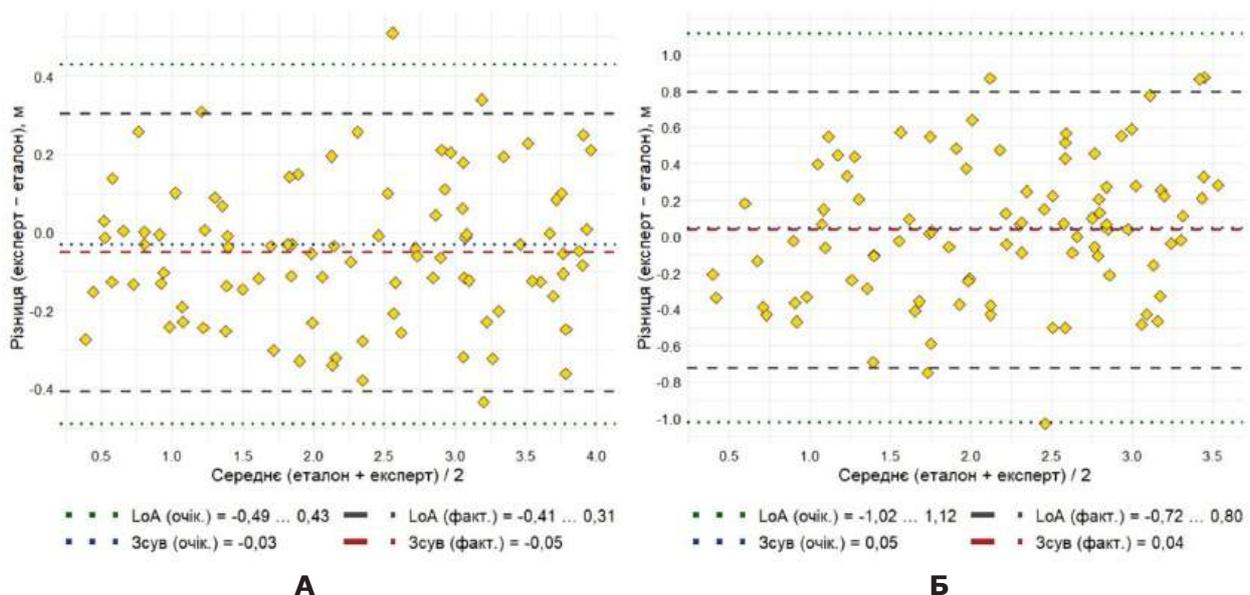


Рис. 4. Графік Bland–Altman для аналізованих метрик: А – для h_{eq} ; Б – для h_{spine}^{eff} . Для h_{eq} середнє зміщення становило $-0,03$ м, 95% межі згоди $(-0,49;0,43)$ м, для h_{spine}^{eff} — $+0,05$ м, 95% межі згоди $(-1,02;1,12)$ м

Відоме розрізнення. Для перевірки дискримінантної здатності метрики проведено порівняння двох клінічно релевантних груп:

- fragility-сценарії: пацієнти ≥ 65 років із падінням з висоти ≤ 1 м, типово асоційовані з остеопоротичними переломами.

- non-fragility-сценарії: пацієнти молодші або травмовані при падінні з висоти >1 м та/або в ДТП.

Медіанне значення h_{spine}^{eff} у групі fragility становило 0,48 м (міжквартильний розмах — 0,32–0,72), тоді як у групі non-fragility — 2,15 м (міжквартильний розмах — 1,40–3,10). Відмінності статистично значущі ($p < 0,001$). Ефект за Коеном становив $d = 1,10$, що відповідає великому розміру ефекту.

Ці результати підтверджують клінічну змістовність метрики: низькі значення h_{spine}^{eff} характерні для низькоенергетичних остеопоротичних переломів, тоді як високі – для високоенергетичних травм, що потребують іншої тактики лікування та мають інший прогноз щодо результату терапії.

Обговорення

Інтерпретація результатів та клінічна значущість

Валідація багаторівневої шкали кількісної оцінки зовнішнього механічного впливу на хребет продемонструвала її інформативність і узгодженість із фактичною тяжкістю пошкоджень. Високі значення розрахункових індексів (насамперед h_{eq} , h_{spine}^{eff} та \bar{I}_{spine}) статистично асоціювалися з виразнішими патоморфологічними змінами хребта.

Ці результати підтверджують клінічну змістовність метрики: низькі значення h_{spine}^{eff} характерні для низькоенергетичних остеопоротичних переломів, тоді як високі – для високоенергетичних травм, що потребують іншої тактики лікування та мають інший прогноз щодо результату терапії. Так, при підвищених h_{eq} і h_{spine}^{eff} частіше реєстрували грубі структурні ушкодження, а зростання \bar{I}_{spine} , що відбиває перевищення фізіологічно переносних переважань, супроводжувалося збільшенням імовірності тяжких травм (аж до категорій, що відповідають AIS ≥ 3). Ця узгодженість свідчить про те, що шкала «вловлює» фізичну «енергію події», що лежить в основі тяжкості пошкодження.

Ключова перевага запропонованого підходу – кількісний безперервний характер. Замість описових яриків шкала надає чисельні величини із фізичною інтерпретацією: кожен приріст h_{eq} , h_{spine}^{eff} і \bar{I}_{spine} відповідає реальному збільшенню травматичного впливу, а не лише переходу через умовний поріг. Це робить інтерпретацію клінічно наочною. Наприклад, висновок «вплив еквівалентний падінню з висоти ≈ 3 м» легко співвіднести з очікуваним ризиком, а значення навантаження в одиницях g інтуїтивно зрозумілі спеціалістам-практикам.

Отримані результати узгоджуються з клінічним досвідом та епідеміологічними спостереженнями: інтенсивніші механічні впливи (зокрема падіння з висоти й високошвидкісні зіткнення) закономірно супроводжуються тяжкими ушкодженнями [3, 182], тоді як низькоенергетичні сценарії (зокрема «standing height or less») частіше дають менш грубу морфологію [80, 183]. При цьому шкала коректно описує континуум механічної експозиції: вона може бути застосована як для високоенергетичних, так і для низькоенергетичних подій, що дає змогу

ранжувати ризик без апіорного припущення про «домінуючий» механізм [1,88]. Практично це означає, що високі значення h_{eq} і h_{spine}^{eff} є раннім індикатором імовірних складних пошкоджень хребта (навіть за незначної первинної симптоматики) [153, 184], тоді як низькі обґрунтовують щаднішу тактику обстеження [185, 186]. Загалом шкала підсилює причинно-наслідковий зв'язок між біомеханікою події та клінічним результатом і таким чином підвищує точність стратифікації ризику та обґрунтованість діагностико-лікувальних рішень [187, 188].

Порівняння з існуючими класифікаціями та шкалами

Abbreviated Injury Scale (AIS). Запропонований кількісний підхід помітно відрізняється від традиційних шкал тяжкості травми. Класична шкала AIS (Abbreviated Injury Scale) – це загальноприйнятий інструмент для ранжування тяжкості травм за анатомічними ушкодженнями [17, 18]. AIS оцінює травму в балах від 1 (легка) до 6 (максимальна, несумісна з життям) на підставі характеру та локалізації ушкоджень. Однак AIS є ретроспективною оцінкою (після обстеження пацієнта), коли виявлено певні ушкодження (переломи, розриви зв'язок, забиття спинного мозку тощо) [153]. AIS не вимірює та не описує механізм травми [189]. Ця шкала охоплює травми всього тіла, а не сфокусована лише на хребті, тому вона погано відображує відмінності в зовнішній дії – два пацієнти можуть мати однаковий бал за AIS, наприклад, 3, але один отримав травму при падінні з висоти, а інший у ДТП на високій швидкості [190].

Запропонована нами шкала орієнтована на механіку травми, тобто на характеристики зовнішнього удару, що спричинив пошкодження. Вона доповнює AIS, даючи змогу оцінити травму ще до встановлення точного діагнозу. Наприклад, знаючи, що $h_{spine}^{eff} \approx 5$ м, можна припустити високу ймовірність серйозних пошкоджень хребта, навіть якщо при первинному огляді немає явних ознак. Отже, шкала працює як прогностичний інструмент [88]. Аналогічно значна h_{eq} дасть змогу запідозрити ушкодження як опорно-рухового апарату, так і внутрішніх органів. Тяжкість за AIS (наприклад, AIS ≥ 3 , що зазвичай свідчить про серйозну травму) буде визначена лише після виявлення самої травми [191], тоді як запропонований нами підхід дає цінну інформацію на етапі оцінки механізму. Таким чином, шкала не замінює AIS, а доповнює систему оцінки травми: AIS ранжує тяжкість за наслідком, а наша шкала – за причинним чинником (енергією удару). Поєднання обох підходів дає змогу повніше характеризувати й прогнозувати травму.

Класифікації пошкоджень хребта. Існуючі класифікаційні системи (AO Spine, TLICS тощо) орієнтовані переважно на морфологію ушкодження та клінічні наслідки [19, 192, 193], але не дають кількісної оцінки механічної експозиції [3, 194]. Сучасна міжнародна класифікація AO Spine (AO Foundation), що певною мірою походить від системи Magerl, описує травми за типом (A – компресія, B – дистракція, C – ротаційно-трансляційні ушкодження), доповнюючи морфологію неврологічним статусом і клінічними модифікаторами, зокрема станом заднього зв'язкового комплексу [195–197]. Перевага AO Spine – комплексність і висока відтворюваність для вибору тактики [198]. Однак дві травми з однаковим AO-кодом можуть бути спричинені принципово різним за силою та напрямком зовнішнім навантаженням.

Запропонована шкала кількісно описує «силу події» до появи анатомічного результату і цим доповнює морфологічні системи. У клініці це дає змогу до звичної формули діагнозу (наприклад, «AO Spine A3») додати рівень механічної експозиції (наприклад, «еквівалент падіння ≈ 4 м» або числові показники h_{eq} , h_{spine}^{eff} і \bar{G}_{spine}). Такий підхід підвищує прогностичну й комунікативну цінність опису випадку: морфологічна система фіксує що пошкоджено, а кількісна шкала – яка енергія/жорсткість впливу призвела до цього [199, 200]. Додаткова перевага – масо-нейтральність і фізична інтерпретованість показників, що зменшує суб'єктивність та робить порівняння між пацієнтами й когортами коректними.

Методичні вказівки CDC щодо сортування постраждалих у польових умовах (*Field Triage Guidelines*). В екстреній медицині рішення про транспортування до травматологічного центру традиційно ґрунтується на критеріях механізму травми [88]. Так, Національні рекомендації США з польового тріажу (CDC спільно з American College of Surgeons) вказують на низку «небезпечних механізмів»: наприклад, падіння дорослого з висоти >6 м (20 футів) розглядають як високий ризик тяжкої травми, що є підставою для направлення до спеціалізованого травматологічного центру [201, 202]. До «небезпечних механізмів» також віднесено значну деформацію автомобіля (інтрузія >30 см), повне/часткове викидання із салону, загибель пасажера в тому самому автомобілі, високошвидкісну мотоаварію тощо [5, 199]. Перевага такого підходу – простота й оперативність: фельдшер може швидко ухвалити рішення навіть за збережених вітальних показників [185, 203].

Обмеження порогової схеми очевидні. Тяжкість механізму – континуальна величина: відмінність між 5,9 і 6,1 м мінімальна, а сам поріг умовний [80]. На результат впливають модифікатори, які зазвичай в явному вигляді не враховують: тип і жорсткість поверхні, поза/геометрія контакту, тривалість гальмування та робота систем пасивної безпеки [133, 137, 152]. Звідси клінічні парадокси: формально «низькоенергетична» подія може супроводжуватися тяжкою травмою, тоді як «порогова» – ні [204, 205]. Це особливо характерно для вразливих груп. У літніх осіб навіть падіння з рівня власного зросту може призвести до тяжкої шийної травми [82, 183]. В оглядових роботах, присвячених медичному сортуванню, також відзначають суттєві частки under-triage (недовідбір) та over-triage (надмірна настороженість), що свідчить про неминучі втрати інформації під час дихотомізації континууму [88].

Запропонована кількісна шкала доповнює польові правила, не намагаючись їх замінити. Замість бінарного «перевищений/неперевищений поріг» вона дає градуйовану оцінку механічної експозиції (наприклад, h_{eq} 4, 6 або 8 м), а також ураховує ключові модифікатори (поверхня/поза/ S_{land}), тому два падіння «з однакової висоти» отримують різні значення при принципово різній «жорсткості» контакту. Така інтеграція дає змогу диференціювати ризик усередині категорії, потенційно знижуючи як недостатню діагностику, так і надмірну маршрутизацію. Розвиток медичного сортування відбувається в бік об'єктивних даних і телеметрії (параметри автомобіля/EDR) [171]. На цьому тлі чисельні показники (h_{eq}) органічно вбудовуються в алгоритми EMS як додатковий

стандартизований критерій доказової інформації для прийняття індивідуалізованих рішень [149, 206].

Практичне застосування шкали – це доповнення, а не заміна морфологічних класифікацій (AO Spine, AIS). Кількісна оцінка механічної експозиції є корисною на етапі догоспітального тріажу та маршрутизації (прогнозування ризику складних ушкоджень; об'єднування направлення до травмцентру), під час планування обсягу візуалізації та в багатоцентричних дослідженнях для стандартизації опису «жорсткості події». У стаціонарі рішення щодо тактики лікування ґрунтуються на морфології ушкоджень і стані пацієнта, а шкала слугує кількісним контекстом механізму, що поліпшує комунікацію та стратифікацію ризику.

Обмеження

Робота є первинним (пілотним) етапом розробки й валідації шкали. Для її активного впровадження в практику охорони здоров'я слід провести уточнювальне калібрування використовуваних індексів та розширити спектр клінічних сценаріїв. Зокрема, потрібна зовнішня мультицентрова валідація порогів і коефіцієнтів, що лежать в основі розрахунків (уточнення T_{land} та S_{land} обраного еталонного s_{ref} і меж категорій 0–10); накопичення та аналіз випадків із «нетиповою» механікою (ковзання/косі контакти, багатоімпульсні події, здавлення, вибухова травма, багатоетапні падіння); перевірка впливу інтеграції шкали в клініко-організаційні рішення (обсяг візуалізації, маршрутизація, вибір тактики фіксації) на клінічні результати й ресурсомісткість.

Запропоновані показники оптимізували для зони грудо-поперекового переходу (Th11-L2) як найуразливішої до непрямої аксіальної дії. Для інших відділів хребта необхідна регіон-специфічна адаптація. Наприклад, для шийного відділу – облік сценаріїв «головою вниз» і пірнання, компонентів хлистої травми. У сукупності це передбачає формування відділ-специфічних бібліотек сценаріїв та рекалібрування коефіцієнтів з урахуванням анатомо-біомеханічних відмінностей.

Висновки

Запропонована шкала є механістично обґрунтованим, масо-нейтральним і кількісно інтерпретованим дескриптором механічної експозиції, що доповнює морфологічні класифікації та придатний для стандартизації опису травми. Для клінічного застосування необхідні мультицентрова зовнішня валідація, уточнення параметрів (зокрема калібрування T_{land} , S_{land} і порогів) та розширення спектру сценаріїв з урахуванням відділ-специфічної біомеханіки. Технологічний вектор передбачає інтеграцію з EMR/EMS, використанням телеметрії (EDR, несений IMU) і автоматизованих калькуляторів, а науковий – поєднання з багатьма моделями та показниками якості кістки для гібридних моделей ризику.

З огляду на поточні клініко-організаційні тенденції (механізм-орієнтований тріаж, уніфікація класифікацій та індивідуалізація), шкала має потенціал для використання в протоколах діагностики та маршрутизації, освітніх модулях й аналітичних контурах охорони здоров'я. Її впровадження сприятиме створенню єдиної «мови» для кількісної оцінки «жорсткості події», поліпшить порівняльність даних та, імовірно, якість стратифікації ризику й клінічних наслідків при травмах хребта.

Подяка

Автори дякують експертам за участь в оцінці клінічних матеріалів, обговоренні ключових методологічних рішень та внесок у вдосконалення запропонованої шкали.

Розкриття інформації*Конфлікт інтересів*

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Інформована згода

Від кожного з пацієнтів отримана інформована згода.

Фінансування

Дослідження не мало спонсорської підтримки.

Список літератури

1. Roberts SB, Tzirikos AI. Biomechanics of the spine and the implications for spinal injuries. *Orthopaedics and Trauma*. 2024;38(5):258-263. doi: 10.1016/j.mporth.2024.07.001
2. Zileli M, Sharif S, Fornari M. Incidence and Epidemiology of Thoracolumbar Spine Fractures: WFNS Spine Committee Recommendations. *Neurospine*. 2021;18(4):704-712. doi: 10.14245/ns.2142418.209
3. Iencean SM. Classification of spinal injuries based on the essential traumatic spinal mechanisms. *Spinal Cord*. 2003;41(7):385-396. doi: 10.1038/sj.sc.3101468
4. Zhaoli M, Hengrui Z, Feiyue L, Hui L, Fei D, Tong L, et al. A Retrospective Epidemiological Study of Patients Hospitalized with Spinal Cord Injury in Dalian Port Hospital from 2017 to 2019. *International Journal of Chinese Medicine*. 2020;4(4). doi: 10.11648/j.ijcm.20200404.14
5. Kent R, Cormier J, McMurry TL, Johan Ivarsson B, Funk J, Hartka T, Sochor M. Spinal injury rates and specific causation in motor vehicle collisions. *Accid Anal Prev*. 2023;186:107047. doi: 10.1016/j.aap.2023.107047
6. Neyaz O, Kanaujia V, Yadav RK, Sarkar B, Azam MQ, Kandwal P. Epidemiology of Traumatic Spinal Cord Injury in the Himalayan Range and Sub-Himalayan region: A Retrospective Hospital Data-Based Study. *Ann Rehabil Med*. 2024;48(1):86-93. doi: 10.5535/arm.23107
7. Wang ZM, Zou P, Yang JS, Liu TT, Song LL, Lu Y, et al. Epidemiological characteristics of spinal cord injury in Northwest China: a single hospital-based study. *J Orthop Surg Res*. 2020;15(1):214. doi: 10.1186/s13018-020-01729-z
8. Beausejour MH, Wagnac E, Arnoux PJ, Thiong JM, Petit Y. Numerical Investigation of Spinal Cord Injury After Flexion-Distraction Injuries at the Cervical Spine. *J Biomech Eng*. 2022;144(1). doi: 10.1115/1.4052003
9. Whittier DE, Bevers M, Geusens P, van den Bergh JP, Gabel L. Characterizing Bone Phenotypes Related to Skeletal Fragility Using Advanced Medical Imaging. *Curr Osteoporos Rep*. 2023;21(6):685-697. doi: 10.1007/s11914-023-00830-6
10. An N, Lin JS, Fei Q. Beijing Friendship Hospital Osteoporosis Self-Assessment Tool for Elderly Male (BFH-OSTM) vs Fracture Risk Assessment Tool (FRAX) for identifying painful new osteoporotic vertebral fractures in older Chinese men: a cross-sectional study. *BMC Musculoskelet Disord*. 2021;22(1):596. doi: 10.1186/s12891-021-04476-2
11. Ihama F, Pandyan A, Roffe C. Assessment of fracture risk tools in care home residents: a multi-centre observational pilot study. *Eur Geriatr Med*. 2021;12(1):79-89. doi: 10.1007/s41999-020-00383-2
12. Gibbs JC, MacIntyre NJ, Ponzano M, Templeton JA, Thabane L, Papaioannou A, Giangregorio LM. Exercise for improving outcomes after osteoporotic vertebral fracture. *Cochrane Database Syst Rev*. 2019;7(7):CD008618. doi: 10.1002/14651858.CD008618.pub3
13. Nau C, Leiblein M, Verboket RD, Horauf JA, Sturm R, Marzi I, Stormann P. Falls from Great Heights: Risk to Sustain Severe Thoracic and Pelvic Injuries Increases with Height of the Fall. *J Clin Med*. 2021;10(11). doi: 10.3390/jcm10112307
14. Gross C, Menard J, Mull J, Diaz-Zuniga Y, Skarupa D, Crandall M. Assessing Fall Mortality by Field-Relevant Categories at an Urban Level I Trauma Center. *J Surg Res*. 2024;300:279-286. doi: 10.1016/j.jss.2024.04.008
15. Fujii M, Shirakawa T, Nakamura M, Baba M, Hitosugi M. Factors influencing the injury severity score and the probability of survival in patients who fell from height. *Sci Rep*. 2021;11(1):15561. doi: 10.1038/s41598-021-95226-w
16. Costachescu B, Popescu CE, Iliescu BF. Analysis of the Classification Systems for Thoracolumbar Fractures in Adults and Their Evolution and Impact on Clinical Management. *J Clin Med*. 2022;11(9). doi: 10.3390/jcm11092498
17. Gennarelli TA, Wodzin E. AIS 2005: a contemporary injury scale. *Injury*. 2006;37(12):1083-1091. doi: 10.1016/j.injury.2006.07.009
18. Sahin T, Batin S. A descriptive study of orthopaedic injuries due to parachute jumping in soldiers. *BMC Emerg Med*. 2020;20(1):58. doi: 10.1186/s12873-020-00354-7
19. Bajamal AH, Permana KR, Faris M, Zileli M, Peev NA. Classification and Radiological Diagnosis of Thoracolumbar Spine Fractures: WFNS Spine Committee Recommendations. *Neurospine*. 2021;18(4):656-666. doi: 10.14245/ns.2142650.325
20. Hwang Z, Abdalla M, Ajayi B, Bernard J, Bishop T, Lui DF. Thoracolumbar spine trauma: a guide for the FRCS examination. *Eur J Orthop Surg Traumatol*. 2023;33(6):2655-2661. doi: 10.1007/s00590-022-03430-9
21. Vu C, Gendelberg D. Classifications in Brief: AO Thoracolumbar Classification System. *Clin Orthop Relat Res*. 2020;478(2):434-440. doi: 10.1097/CORR.0000000000001086
22. Jeanmougin T, Cole E, Duceau B, Raux M, James A. Heterogeneity in defining multiple trauma: a systematic review of randomized controlled trials. *Crit Care*. 2023;27(1):363. doi: 10.1186/s13054-023-04637-w
23. Donnelly NA, Brent L, Hickey P, Masterson S, Deasy C, Moloney J, et al. Substantial heterogeneity in trauma triage tool characteristic operationalization for identification of major trauma: a hybrid systematic review. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2025;51(1):74. doi: 10.1007/s00068-024-02694-6
24. Wohlgemut JM, Marsden MER, Stoner RS, Pisirir E, Kyrimi E, Grier G, et al. Diagnostic accuracy of clinical examination to identify life- and limb-threatening injuries in trauma patients. *Scand J Trauma Resusc Emerg Med*. 2023;31(1):18. doi: 10.1186/s13049-023-01083-z
25. Xiong T, Luo Q, Chen Q, Shi L, Duan A, Liu S, Li K. Development of a repetitive traumatic brain injury risk function based on real-world accident reconstruction and wavelet packet energy analysis. *Front Bioeng Biotechnol*. 2025;13:1548265. doi: 10.3389/fbioe.2025.1548265
26. Mokka LB, Prinsen CA, Bouter LM, Vet HC, Terwee CB. The Consensus-based Standards for the selection of health Measurement Instruments (COSMIN) and how to select an outcome measurement instrument. *Braz J Phys Ther*. 2016;20(2):105-113. doi: 10.1590/bjpt-rbf.2014.0143
27. Swan K, Speyer R, Scharitzer M, Farneti D, Brown T, Woisard V, Cordier R. Measuring what matters in healthcare: a practical guide to psychometric principles and instrument development. *Front Psychol*. 2023;14:1225850. doi: 10.3389/fpsyg.2023.1225850
28. Mokka LB, de Vet H, Diemeer S, Eekhout I. Sample

- size recommendations for studies on reliability and measurement error: an online application based on simulation studies. *Health Services and Outcomes Research Methodology*. 2022;23(3):241-265. doi: 10.1007/s10742-022-00293-9
29. Lewis CC, Klasnja P, Lyon AR, Powell BJ, Lengnick-Hall R, Buchanan G, et al. The mechanics of implementation strategies and measures: advancing the study of implementation mechanisms. *Implement Sci Commun*. 2022;3(1):114. doi: 10.1186/s43058-022-00358-3
 30. Galhardas L, Raimundo A, Marmeleira J. Test-retest reliability of upper-limb proprioception and balance tests in older nursing home residents. *Arch Gerontol Geriatr*. 2020;89:104079. doi: 10.1016/j.archger.2020.104079
 31. Hage R, Detrembleur C, Dierick F, Brismee JM, Roussel N, Pitance L. Sensorimotor performance in acute-subacute non-specific neck pain: a non-randomized prospective clinical trial with intervention. *BMC Musculoskelet Disord*. 2021;22(1):1017. doi: 10.1186/s12891-021-04876-4
 32. Gatsonis C, Sampson AR. Multiple correlation: exact power and sample size calculations. *Psychol Bull*. 1989;106(3):516-524. doi: 10.1037/0033-2909.106.3.516
 33. Hattie J, Cooksey RW. Procedures for Assessing the Validities of Tests Using the "Known-Groups" Method. *Applied Psychological Measurement*. 1984;8(3):295-305. doi: 10.1177/014662168400800306
 34. Kalcev G, Barbov I, Kotevska PI, Preti A, Carta MG. Biological Rhythms in People from North Macedonia with Bipolar Disorder: Application of the Macedonian Biological Rhythms Interview of Assessment in Neuropsychiatry (BRIAN). *The Open Psychology Journal*. 2022;15(1). doi: 10.2174/18743501-v15-e2208301
 35. Hiraishi M, Tanioka K, Shimokawa T. Concordance rate of a four-quadrant plot for repeated measurements. *BMC Med Res Methodol*. 2021;21(1):270. doi: 10.1186/s12874-021-01461-0
 36. Jan SL, Shieh G. The Bland-Altman range of agreement: Exact interval procedure and sample size determination. *Comput Biol Med*. 2018;100:247-252. doi: 10.1016/j.compbiomed.2018.06.020
 37. Taffe P, Zuppinger C, Burger GM, Nussle SG. The Bland-Altman method should not be used when one of the two measurement methods has negligible measurement errors. *PLoS One*. 2022;17(12):e0278915. doi: 10.1371/journal.pone.0278915
 38. Bansal A, Heagerty PJ. A comparison of landmark methods and time-dependent ROC methods to evaluate the time-varying performance of prognostic markers for survival outcomes. *Diagn Progn Res*. 2019;3:14. doi: 10.1186/s41512-019-0057-6
 39. Seshan VE, Gonen M, Begg CB. Comparing ROC curves derived from regression models. *Stat Med*. 2013;32(9):1483-1493. doi: 10.1002/sim.5648
 40. Ruxton GD, Wilkinson DM, Neuhäuser M. Advice on testing the null hypothesis that a sample is drawn from a normal distribution. *Animal Behaviour*. 2015;107:249-252. doi: 10.1016/j.anbehav.2015.07.006
 41. Shapiro SS, Wilk MB. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*. 1965;52(3-4):591-611. doi: 10.1093/biomet/52.3-4.591
 42. Bahariniya S, Ezatiasar M, Madadzadeh F. A Brief Review of the Types of Validity and Reliability of scales in Medical Research. *Journal of Community Health Research*. 2021. doi: 10.18502/jchr.v10i2.6582
 43. de Winter JC, Gosling SD, Potter J. Comparing the Pearson and Spearman correlation coefficients across distributions and sample sizes: A tutorial using simulations and empirical data. *Psychol Methods*. 2016;21(3):273-290. doi: 10.1037/met0000079
 44. Schober P, Vetter TR. Logistic Regression in Medical Research. *Anesth Analg*. 2021;132(2):365-366. doi: 10.1213/ANE.0000000000005247
 45. Zabor EC, Reddy CA, Tendulkar RD, Patil S. Logistic Regression in Clinical Studies. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*. 2022;112(2):271-277. doi: 10.1016/j.ijrobp.2021.08.007
 46. Abreu MN, Siqueira AL, Cardoso CS, Caiaffa WT. Ordinal logistic regression models: application in quality of life studies. *Cad Saude Publica*. 2008;24 Suppl 4:s581-591. doi: 10.1590/s0102-311x2008001600010
 47. Guzman-Castillo M, Brailsford S, Luke M, Smith H. A tutorial on selecting and interpreting predictive models for ordinal health-related outcomes. *Health Services and Outcomes Research Methodology*. 2015;15(3-4):223-240. doi: 10.1007/s10742-015-0140-6
 48. Zeng G. A graphic and tabular variable deduction method in logistic regression. *Communications in Statistics - Theory and Methods*. 2020;51(16):5412-5427. doi: 10.1080/03610926.2020.1839499
 49. Discacciati A, Palazzolo MG, Park JG, Melloni GEM, Murphy SA, Bellavia A. Estimating and presenting non-linear associations with restricted cubic splines. *Int J Epidemiol*. 2025;54(4). doi: 10.1093/ije/dyaf088
 50. Schuster NA, Rijnhart JJM, Twisk JWR, Heymans MW. Modeling non-linear relationships in epidemiological data: The application and interpretation of spline models. *Front Epidemiol*. 2022;2:975380. doi: 10.3389/fevid.2022.975380
 51. Shrestha N. Detecting Multicollinearity in Regression Analysis. *American Journal of Applied Mathematics and Statistics*. 2020;8(2):39-42. doi: 10.12691/ajams-8-2-1
 52. Corbacioglu SK, Aksel G. Receiver operating characteristic curve analysis in diagnostic accuracy studies: A guide to interpreting the area under the curve value. *Turk J Emerg Med*. 2023;23(4):195-198. doi: 10.4103/tjem.tjem_182_23
 53. Ruopp MD, Perkins NJ, Whitcomb BW, Schisterman EF. Youden Index and optimal cut-point estimated from observations affected by a lower limit of detection. *Biom J*. 2008;50(3):419-430. doi: 10.1002/bimj.200710415
 54. Paiva JRB, Pacheco VMG, Barbosa PS, Almeida FR, Wainer GA, Gomes FA, et al. Complexity measure based on sensitivity analysis applied to an intensive care unit system. *Scientific Reports*. 2023;13(1):14602. doi: 10.1038/s41598-023-40149-x
 55. den Boon S, Jit M, Brisson M, Medley G, Beutels P, White R, et al. Guidelines for multi-model comparisons of the impact of infectious disease interventions. *BMC Medicine*. 2019;17(1):163. doi: 10.1186/s12916-019-1403-9
 56. Kien C, Schultes MT, Szelag M, Schoberberger R, Gartlehner G. German language questionnaires for assessing implementation constructs and outcomes of psychosocial and health-related interventions: a systematic review. *Implement Sci*. 2018;13(1):150. doi: 10.1186/s13012-018-0837-3
 57. Williams ZJ, Failla MD, Davis SL, Heflin BH, Okitondo CD, Moore DJ, Cascio CJ. Thermal Perceptual Thresholds are typical in Autism Spectrum Disorder but Strongly Related to Intra-individual Response Variability. *Sci Rep*. 2019;9(1):12595. doi: 10.1038/s41598-019-49103-2
 58. Vargha A, Delaney HD. A Critique and Improvement of the CL Common Language Effect Size Statistics of McGraw and Wong. *Journal of Educational and Behavioral Statistics*. 2000;25(2):101-132. doi: 10.3102/10769986025002101
 59. Panjeh S, Nordahl-Hansen A, Cogo-Moreira H. Establishing new cutoffs for Cohen's d: An application using known effect sizes from trials for improving sleep quality on composite mental health. *Int J Methods Psychiatr Res*. 2023;32(3):e1969. doi: 10.1002/mpr.1969. PMID: 37186318
 60. Bobak CA, Barr PJ, O'Malley AJ. Estimation of an inter-rater intra-class correlation coefficient that overcomes common assumption violations in the assessment of health measurement scales. *BMC Med Res Methodol*. 2018;18(1):93. doi: 10.1186/s12874-018-0550-6

61. Kvalseth TO. An Alternative Interpretation of the Linearly Weighted Kappa Coefficients for Ordinal Data. *Psychometrika*. 2018. doi: 10.1007/s11336-018-9621-1
62. Mitani AA, Freer PE, Nelson KP. Summary measures of agreement and association between many raters' ordinal classifications. *Ann Epidemiol*. 2017;27(10):677-685 e674. doi: 10.1016/j.annepidem.2017.09.001
63. Polit DF. Getting serious about test-retest reliability: a critique of retest research and some recommendations. *Qual Life Res*. 2014;23(6):1713-1720. doi: 10.1007/s11336-014-0632-9
64. Bland JM, Altman DG. Measuring agreement in method comparison studies. *Stat Methods Med Res*. 1999;8(2):135-160. doi: 10.1177/096228029900800204
65. Chan PY, Mohd Ripin Z, Abdul Halim S, Kamarudin MI, Ng KS, Eow GB, et al. Biomechanical System Versus Observational Rating Scale for Parkinson's Disease Tremor Assessment. *Sci Rep*. 2019;9(1):8117. doi: 10.1038/s41598-019-44142-1
66. Stratford PW, Riddle DL. When minimal detectable change exceeds a diagnostic test-based threshold change value for an outcome measure: resolving the conflict. *Phys Ther*. 2012;92(10):1338-1347. doi: 10.2522/ptj.20120002
67. Bonovas S, Piovani D. On p-Values and Statistical Significance. *J Clin Med*. 2023;12(3). doi: 10.3390/jcm12030900
68. Sharma H. Statistical significance or clinical significance? A researcher's dilemma for appropriate interpretation of research results. *Saudi J Anaesth*. 2021;15(4):431-434. doi: 10.4103/sja.sja_158_21
69. Gonzalez M, Munoz-Hernandez C. R programming environment in wildlife: Are Veterinary Sciences at the same level than other research areas? *Res Vet Sci*. 2024;166:105079. doi: 10.1016/j.rvsc.2023.105079
70. Ivancevic VG. New Mechanics of Spinal Injury. *International Journal of Applied Mechanics*. 2012;01(02):387-401. doi: 10.1142/s1758825109000174
71. LaPlaca MC, Simon CM, Prado GR, Cullen DK. CNS injury biomechanics and experimental models. *Prog Brain Res*. 2007;161:13-26. doi: 10.1016/S0079-6123(06)61002-9
72. Teresinski G, Milaszkiwicz A, Cywka T. An analysis of the relationship between bodily injury severity and fall height in victims of fatal falls from height. *Arch Med Sadowej Kryminol*. 2016;66(3):133-140. doi: 10.5114/amsik.2016.66397
73. Casali MB, Blandino A, Grignaschi S, Florio EM, Travaini G, Genovese UR. The pathological diagnosis of the height of fatal falls: A mathematical approach. *Forensic Sci Int*. 2019;302:109883. doi: 10.1016/j.forsciint.2019.109883
74. Petrone N, Cognolato M, McNeil JA, Hubbard M. Designing, building, measuring, and testing a constant equivalent fall height terrain park jump. *Sports Engineering*. 2017;20(4):283-292. doi: 10.1007/s12283-017-0253-y
75. Liu C, Xu T, Xia W, Xu S, Zhu Z, Zhou M, Liu H. Incidence, prevalence, and causes of spinal injuries in China, 1990-2019: Findings from the Global Burden of Disease Study 2019. *Chin Med J (Engl)*. 2024;137(6):704-710. doi: 10.1097/CM9.0000000000003045
76. Lu Y, Shang Z, Zhang W, Pang M, Hu X, Dai Y, et al. Global incidence and characteristics of spinal cord injury since 2000-2021: a systematic review and meta-analysis. *BMC Med*. 2024;22(1):285. doi: 10.1186/s12916-024-03514-9
77. Gnanaprakash G, Peddireddy S, Kanna RM, Shetty AP, Rajasekaran S. Spinal Injuries Due to Falls from Height. *Indian Spine Journal*. 2024;7(2):168-174. doi: 10.4103/isj.isj_75_23
78. Goodacre S, Than M, Goyder EC, Joseph AP. Can the distance fallen predict serious injury after a fall from a height? *J Trauma*. 1999;46(6):1055-1058. doi: 10.1097/00005373-199906000-00014
79. Palacio C, Darwish M, Acosta M, Bautista R, Hovorka M, Chen C, Hovorka J. Incidence of fall-from-height injuries and predictive factors for severity. *J Osteopath Med*. 2025;125(5):229-236. doi: 10.1515/jom-2024-0158
80. Zhang ZR, Wu Y, Wang FY, Wang WJ. Traumatic spinal cord injury caused by low falls and high falls: a comparative study. *J Orthop Surg Res*. 2021;16(1):222. doi: 10.1186/s13018-021-02379-5
81. Koch M, Lunde LK, Gjulem T, Knardahl S, Veierstedt KB. Validity of Questionnaire and Representativeness of Objective Methods for Measurements of Mechanical Exposures in Construction and Health Care Work. *PLoS One*. 2016;11(9):e0162881. doi: 10.1371/journal.pone.0162881
82. Bruggink C, van de Ree CLP, van Ditshuizen J, Polinder-Bos HA, Oner FC, Reijman M, Rutges J. Increased incidence of traumatic spinal injury in patients aged 65 years and older in the Netherlands. *Eur Spine J*. 2024;33(10):3677-3684. doi: 10.1007/s00586-024-08310-w
83. Wang F, Sun R, Zhang SD, Wu XT. Comparison of thoracolumbar versus non-thoracolumbar osteoporotic vertebral compression fractures in risk factors, vertebral compression degree and pre-hospital back pain. *J Orthop Surg Res*. 2023;18(1):643. doi: 10.1186/s13018-023-04140-6
84. Bodmer NS, Hauselmann HJ, Frey D, Aeberli D, Bachmann LM. Expert consensus on relevant risk predictors for the occurrence of osteoporotic fractures in specific clinical subgroups - Delphi survey. *BMC Rheumatol*. 2019;3:50. doi: 10.1186/s41927-019-0099-y
85. Kanis JA, McCloskey EV, Harvey NC, Cooper C, Rizzoli R, Dawson-Hughes B, et al. Intervention thresholds and diagnostic thresholds in the management of osteoporosis. *Aging Clin Exp Res*. 2022;34(12):3155-3157. doi: 10.1007/s40520-022-02216-7
86. Wool NK, Wilson S, Chong ACM, Dart BR. Bone Health Improvement Protocol. *Kansas Journal of Medicine*. 2017;10(3):62-66. doi: 10.17161/kjm.v10i3.8659
87. McCoy CE, Chakravathy B, Lotfipour S. Guidelines for Field Triage of Injured Patients: In conjunction with the Morbidity and Mortality Weekly Report published by the Center for Disease Control and Prevention. *West J Emerg Med*. 2013;14(1):69-76. doi: 10.5811/westjem.2013.1.15981
88. Haske D, Lefering R, Stock JP, Kreinest M, TraumaRegister DGU. Epidemiology and predictors of traumatic spine injury in severely injured patients: implications for emergency procedures. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2022;48(3):1975-1983. doi: 10.1007/s00068-020-01515-w
89. Braken P, Amsler F, Gross T. Simple modification of trauma mechanism alarm criteria published for the TraumaNetwork DGU((R)) may significantly improve overtriage - a cross sectional study. *Scand J Trauma Resusc Emerg Med*. 2018;26(1):32. doi: 10.1186/s13049-018-0498-x
90. Basirat-zadeh S, Hakimjavadi R, Baddour N, Michalowski W, Viktor H, Wai E, et al. A data-driven approach to categorize patients with traumatic spinal cord injury: cluster analysis of a multicentre database. *Front Neurol*. 2023;14:1263291. doi: 10.3389/fneur.2023.1263291
91. Yokogawa N, Kato S, Sasagawa T, Hayashi H, Tsuchiya H, Ando K, et al. Differences in clinical characteristics of cervical spine injuries in older adults by external causes: a multicenter study of 1512 cases. *Sci Rep*. 2022;12(1):15867. doi: 10.1038/s41598-022-19789-y
92. Wu Y, Zhang Z, Wang F, Wang W. Current status of traumatic spinal cord injury caused by traffic accident in Northern China. *Sci Rep*. 2022;12(1):13892. doi: 10.1038/s41598-022-16930-9
93. Yuan H, Guo Q, Zhang Z, Ou L, Wang H, Yu H, Xiang L. Sex, age, role and geographic differences in traumatic spinal fractures caused by motor vehicle collisions: a multicentre retrospective study. *Sci Rep*. 2023;13(1):3712. doi: 10.1038/s41598-023-30982-5
94. Breitauch P, Erbsmehl CT, van Ratingen M,

- Mallada JL, Sandner V, Ferson N, Urban M. A novel method for the automated simulation of various vehicle collisions to estimate crash severity. *Traffic Inj Prev.* 2023;24(sup1):S116-S123. doi: 10.1080/15389588.2022.2159761
95. Pinter K, Szalay Z, Vida G. Road Accident Reconstruction Using On-board Data, Especially Focusing on the Applicability in Case of Autonomous Vehicles. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering.* 2020;49(2):139-145. doi: 10.3311/PPtr.13469
96. Vida G, Török Á. Effects of developing data recording technologies on the reliability of accident reconstruction and liability determination. *European Transport Research Review.* 2025;17(1). doi: 10.1186/s12544-025-00727-8
97. Bastien C, Wellings R, Burnett B. An evidence based method to calculate pedestrian crossing speeds in vehicle collisions (PCSC). *Accid Anal Prev.* 2018;118:66-76. doi: 10.1016/j.aap.2018.05.020
98. Ogura A. Analyzing collisions in classical mechanics using mass-momentum diagrams. *European Journal of Physics.* 2017;38(5):055001. doi: 10.1088/1361-6404/aa750b
99. Chatterjee A, James G, Brogliato B. Approximate coefficient of restitution for nonlinear viscoelastic contact with external load. *Granular Matter.* 2022;24(4). doi: 10.1007/s10035-022-01284-w
100. Meyer N, Wagemann EL, Jackstadt A, Seifried R. Material and particle size sensitivity analysis on coefficient of restitution in low-velocity normal impacts. *Computational Particle Mechanics.* 2022;9(6):1293-1308. doi: 10.1007/s40571-022-00471-z
101. Seifried R, Schiehlen W, Eberhard P. Numerical and experimental evaluation of the coefficient of restitution for repeated impacts. *International Journal of Impact Engineering.* 2005;32(1-4):508-524. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2005.01.001
102. Green I. The prediction of the coefficient of restitution between impacting spheres and finite thickness plates undergoing elastoplastic deformations and wave propagation. *Nonlinear Dynamics.* 2022;109(4):2443-2458. doi: 10.1007/s11071-022-07522-3
103. Higham JE, Shepley P, Shahnam M. Measuring the coefficient of restitution for all six degrees of freedom. *Granular Matter.* 2019;21(2). doi: 10.1007/s10035-019-0871-0
104. Hunt KH, Crossley FRE. Coefficient of Restitution Interpreted as Damping in Vibroimpact. *Journal of Applied Mechanics.* 1975;42(2):440-445. doi: 10.1115/1.3423596
105. Reyes A, Børvik T. Quasi-static behaviour of crash components with steel skins and polymer foam cores. *Materials Today Communications.* 2018;17:541-553. doi: 10.1016/j.mtcomm.2018.09.015
106. Wang D, Zhang J, Wang S, Hu L. Frontal Vehicular Crash Energy Management Using Analytical Model in Multiple Conditions. *Sustainability.* 2022;14(24). doi: 10.3390/su142416913
107. Gidlewski M, Prochowski L, Jemioł L, Żardecki D. The process of front-to-side collision of motor vehicles in terms of energy balance. *Nonlinear Dynamics.* 2018;97(3):1877-1893. doi: 10.1007/s11071-018-4688-x
108. Brach RM, Brach RM, Pongetti K. Analysis of High-Speed Sideswipe Collisions Using Data from Small Overlap Tests. *SAE International Journal of Transportation Safety.* 2014;02(1):86-99. doi: 10.4271/2014-01-0469
109. Davison TM, Collins GS. Complex Crater Formation by Oblique Impacts on the Earth and Moon. *Geophysical Research Letters.* 2022;49(21). doi: 10.1029/2022gl101117
110. Li S, Anis M, Lord D, Zhang H, Zhou Y, Ye X. Beyond 1D and oversimplified kinematics: A generic analytical framework for surrogate safety measures. *Accid Anal Prev.* 2024;204:107649. doi: 10.1016/j.aap.2024.107649
111. Statler TS, Raducan SD, Barnouin OS, DeCoster ME, Chesley SR, Barbee B, et al. After DART: Using the First Full-scale Test of a Kinetic Impactor to Inform a Future Planetary Defense Mission. *The Planetary Science Journal.* 2022;3(10). doi: 10.3847/PSJ/ac94c1
112. Stickle AM, DeCoster ME, Burger C, Caldwell WK, Graninger D, Kumamoto KM, et al. Effects of Impact and Target Parameters on the Results of a Kinetic Impactor: Predictions for the Double Asteroid Redirection Test (DART) Mission. *The Planetary Science Journal.* 2022;3(11). doi: 10.3847/PSJ/ac91cc
113. Ataei M, Khajepour A, Jeon S. A general rollover index for tripped and un-tripped rollovers on flat and sloped roads. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering.* 2017;233(2):304-316. doi: 10.1177/0954407017743345
114. Viano DC, Parenteau CS, Edwards ML. Rollover injury: effects of near- and far-seating position, belt use, and number of quarter rolls. *Traffic Inj Prev.* 2007;8(4):382-392. doi: 10.1080/15389580701583379
115. Dobbertin KM, Freeman MD, Lambert WE, Lasarev MR, Kohles SS. The relationship between vehicle roof crush and head, neck and spine injury in rollover crashes. *Accid Anal Prev.* 2013;58:46-52. doi: 10.1016/j.aap.2013.04.020
116. Freeman MD, Dobbertin K, Kohles SS, Uhrenholt L, Eriksson A. Serious head and neck injury as a predictor of occupant position in fatal rollover crashes. *Forensic Sci Int.* 2012;222(1-3):228-233. doi: 10.1016/j.forsciint.2012.06.003
117. Heller MF, Newberry WN, Smedley JE, Eswaran SK, Croteau JJ, Carhart MR. Occupant Kinematics and Injury Mechanisms During Rollover in a High Strength-to-Weight Ratio Vehicle. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems.* 2010;03(1):450-466. doi: 10.4271/2010-01-0516
118. Kazemian AH, Fooladi M, Darijani H. Rollover Index for the Diagnosis of Tripped and Untripped Rollovers. *Latin American Journal of Solids and Structures.* 2017;14(11):1979-1999. doi: 10.1590/1679-78253576
119. Ikhsan N, Saifizul A, Ramli R. The Effect of Vehicle and Road Conditions on Rollover of Commercial Heavy Vehicles during Cornering: A Simulation Approach. *Sustainability.* 2021;13(11). doi: 10.3390/su13116337
120. El-Rich M, Arnoux PJ, Wagnac E, Brunet C, Aubin CE. Finite element investigation of the loading rate effect on the spinal load-sharing changes under impact conditions. *J Biomech.* 2009;42(9):1252-1262. doi: 10.1016/j.jbiomech.2009.03.036
121. Davidson PL, Wilson SJ, Wilson BD, Chalmers DJ. An approach to modeling impact energy absorption by surfaces. *J Appl Biomech.* 2009;25(4):351-359. doi: 10.1123/jab.25.4.351
122. Shimizu T, Yoshitani K. Impact-reduction effect of tatami floor mat made of nonwoven fabric for head injuries in fall accidents. *Journal of Building Engineering.* 2019;24. doi: 10.1016/j.jobe.2019.02.020
123. Wei W, Evin M, Bailly N, Arnoux PJ. Biomechanical evaluation of Back injuries during typical snowboarding backward falls. *Scand J Med Sci Sports.* 2023;33(3):224-234. doi: 10.1111/sms.14254
124. Mattucci S, Speidel J, Liu J, Kwon BK, Tetzlaff W, Oxland TR. Basic biomechanics of spinal cord injury - How injuries happen in people and how animal models have informed our understanding. *Clin Biomech (Bristol).* 2019;64:58-68. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2018.03.020
125. Rao RD, Delbar K, Yoganandan N. Body Morphology and Its Associations With Thoracolumbar Trauma Sustained in Motor Vehicle Collisions. *J Am Acad Orthop Surg.* 2015;23(12):769-777. doi: 10.5435/JAAOS-D-15-00277
126. Yoganandan N, Moore J, DeVogel N, Pintar F, Banerjee A, Baisden J, et al. Human lumbar spinal column injury criteria from vertical loading at the base: Applications to military environments. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2020;105:103690. doi: 10.1016/j.jmbbm.2020.103690
127. Bose D, Crandall JR, Untaroiu CD, Maslen EH. Influence of pre-collision occupant parameters on injury outcome

- in a frontal collision. *Accid Anal Prev.* 2010;42(4):1398-1407. doi: 10.1016/j.aap.2010.03.004
128. Kimpara H, Lee JB, Yang KH, King AI. Effects of body weight, height, and rib cage area moment of inertia on blunt chest impact response. *Traffic Inj Prev.* 2010;11(2):207-214. doi: 10.1080/15389580903554863
 129. Khorasani-Zavareh D, Bigdeli M, Saadat S, Mohammadi R. Kinetic energy management in road traffic injury prevention: a call for action. *J Inj Violence Res.* 2015;7(1):36-37. doi: 10.5249/jivr.v7i1.458
 130. Palanca M, Perilli E, Martelli S. Body Anthropometry and Bone Strength Conjointly Determine the Risk of Hip Fracture in a Sideways Fall. *Ann Biomed Eng.* 2021;49(5):1380-1390. doi: 10.1007/s10439-020-02682-y
 131. Rostro-González H, Puigoriol-Forcada JM, Pérez-Peña A, Menacho J, García-Granada A-A. Optimizing crash box design to meet injury criteria: a protocol for accurate simulation and material selection. *Structural and Multidisciplinary Optimization.* 2024;67(8). doi: 10.1007/s00158-024-03855-2
 132. Bahlsen A, Nigg BM. Influence of Attached Masses on Impact Forces and Running Style in Heel-Toe Running. *International Journal of Sport Biomechanics.* 1987;3(3):264-275. doi: 10.1123/ijsb.3.3.264
 133. Bhan S, Levine JC, Laing AC. Energy absorption during impact on the proximal femur is affected by body mass index and flooring surface. *J Biomech.* 2014;47(10):2391-2397. doi: 10.1016/j.jbiomech.2014.04.026
 134. Somasundaram K, Humm JR, Yoganandan N, Hauschild H, Driesslein K, Pintar FA. Obese Occupant Response in Reclined and Upright Seated Postures in Frontal Impacts. *Stapp Car Crash J.* 2022;66:31-68. doi: 10.4271/2022-22-0002
 135. Raj N, Krishnapillai S. An improved spinal injury parameter model for underbody impulsive loading scenarios. *Int J Numer Method Biomed Eng.* 2020;36(3):e3307. doi: 10.1002/cnm.3307
 136. Ferenczi MA, Bershtitsky SY, Koubassova NA, Kopylova GV, Fernandez M, Narayanan T, Tsaturyan AK. Why muscle is an efficient shock absorber. *PLoS One.* 2014;9(1):e85739. doi: 10.1371/journal.pone.0085739
 137. Cutlan R, Khokhar M, Shammout N, Shah AS, Frazer L, Yoganandan N, et al. Lumbar Spine Orientation Affects Compressive Fracture Outcome. *Ann Biomed Eng.* 2024. doi: 10.1007/s10439-024-03604-y
 138. Yoganandan N, Moore J, Pintar FA, Banerjee A, DeVogel N, Zhang J. Role of disc area and trabecular bone density on lumbar spinal column fracture risk curves under vertical impact. *J Biomech.* 2018;72:90-98. doi: 10.1016/j.jbiomech.2018.02.030
 139. Schwarze M, Hurschler C, Welke B. Force, impulse and energy during falling with and without knee protection: an in-vitro study. *Sci Rep.* 2019;9(1):10336. doi: 10.1038/s41598-019-46880-8
 140. Tamura A, Akasaka K, Otsudo T. Energy Absorption Strategies in the Lower Extremities during Double-Leg Landings in Knee Valgus Alignment. *Applied Sciences.* 2020;10(23). doi: 10.3390/app10238742
 141. Ivancic PC. Biomechanics of Thoracolumbar Burst and Chance-Type Fractures during Fall from Height. *Global Spine J.* 2014;4(3):161-168. doi: 10.1055/s-0034-1381729
 142. Amiri S, Naserkhaki S, Parnianpour M. Assessment of lumbar spinal disc injury in frontal crashes. *Comput Biol Med.* 2020;123:103846. doi: 10.1016/j.compbiomed.2020.103846
 143. Pachocki L, Daszkiewicz K, Luczkiewicz P, Witkowski W. Biomechanics of Lumbar Spine Injury in Road Barrier Collision-Finite Element Study. *Front Bioeng Biotechnol.* 2021;9:760498. doi: 10.3389/fbioe.2021.760498
 144. Ivancic PC. Cervical spine instability following axial compression injury: a biomechanical study. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2014;100(1):127-133. doi: 10.1016/j.otsr.2013.10.015
 145. Hajiaghameh M, Seidi M, Ferguson JR, Caccese V. Measurement of Head Impact Due to Standing Fall in Adults Using Anthropomorphic Test Dummies. *Ann Biomed Eng.* 2015;43(9):2143-2152. doi: 10.1007/s10439-015-1255-1
 146. Ivancic PC. Instabilité du rachis cervical par traumatisme en compression axiale : une étude biomécanique. *Revue de Chirurgie Orthopédique et Traumatologique.* 2014;100(1). doi: 10.1016/j.rcot.2013.10.091
 147. Li L, Baur M, Baldwin K, Kuehn T, Zhu Q, Herman D, Dai B. Falling as a strategy to decrease knee loading during landings: Implications for ACL injury prevention. *J Biomech.* 2020;109:109906. doi: 10.1016/j.jbiomech.2020.109906
 148. Li M, Zhang D, Liu Q, Zhang T. Driver Injury from Vehicle Side Impacts When Automatic Emergency Braking and Active Seat Belts Are Used. *Sensors (Basel).* 2023;23(13). doi: 10.3390/s23135821. PMID: 37447672
 149. Mishra E, Mroz K, Pipkorn B, Lubbe N. Effects of Automated Emergency Braking and Seatbelt Pre-Tensioning on Occupant Injury Risks in High-Severity Frontal Crashes. *Frontiers in Future Transportation.* 2022;3. doi: 10.3389/ffutr.2022.883951
 150. Tamura A, Akasaka K, Otsudo T. Contribution of Lower Extremity Joints on Energy Absorption during Soft Landing. *Int J Environ Res Public Health.* 2021;18(10). doi: 10.3390/ijerph18105130
 151. Van Toen C, Melnyk AD, Street J, Oxland TR, Cripton PA. The effect of lateral eccentricity on failure loads, kinematics, and canal occlusions of the cervical spine in axial loading. *J Biomech.* 2014;47(5):1164-1172. doi: 10.1016/j.jbiomech.2013.12.001
 152. Van Toen C, Sran MM, Robinovitch SN, Cripton PA. Transmission of force in the lumbosacral spine during backward falls. *Spine (Phila Pa 1976).* 2012;37(9):E519-527. doi: 10.1097/BRS.0b013e31823ecae0
 153. Whyte T, Melnyk AD, Van Toen C, Yamamoto S, Street J, Oxland TR, Cripton PA. A neck compression injury criterion incorporating lateral eccentricity. *Sci Rep.* 2020;10(1):7114. doi: 10.1038/s41598-020-63974-w
 154. Yeow CH, Lee PV, Goh JC. Effect of landing height on frontal plane kinematics, kinetics and energy dissipation at lower extremity joints. *J Biomech.* 2009;42(12):1967-1973. doi: 10.1016/j.jbiomech.2009.05.017
 155. Giatsis G, Panoutsakopoulos V, Kollias IA. Drop Jumping on Sand Is Characterized by Lower Power, Higher Rate of Force Development and Larger Knee Joint Range of Motion. *J Funct Morphol Kinesiol.* 2022;7(1). doi: 10.3390/jfkm7010017
 156. Harris DA, Spears IR. The effect of rugby shoulder padding on peak impact force attenuation. *Br J Sports Med.* 2010;44(3):200-203. doi: 10.1136/bjsm.2008.047449
 157. Jung S. Water entry and exit in nature: review. *Interface Focus.* 2025;15(2):20240055. doi: 10.1098/rsfs.2024.0055
 158. Kerdok AE, Biewener AA, McMahon TA, Weyand PG, Herr HM. Energetics and mechanics of human running on surfaces of different stiffnesses. *J Appl Physiol (1985).* 2002;92(2):469-478. doi: 10.1152/jappphysiol.01164.2000
 159. Lachance CC, Jurkowski MP, Dymarz AC, Robinovitch SN, Feldman F, Laing AC, Mackey DC. Compliant flooring to prevent fall-related injuries in older adults: A scoping review of biomechanical efficacy, clinical effectiveness, cost-effectiveness, and workplace safety. *PLoS One.* 2017;12(2):e0171652. doi: 10.1371/journal.pone.0171652
 160. Laforest S, Robitaille Y, Dorval D, Lesage D, Pless B. Severity of fall injuries on sand or grass in playgrounds. *J Epidemiol Community Health.* 2000;54(6):475-477. doi: 10.1136/jech.54.6.475
 161. Laing AC, Robinovitch SN. Low stiffness floors can attenuate fall-related femoral impact forces by up to 50% without substantially impairing balance in older women. *Accid Anal Prev.* 2009;41(3):642-650. doi: 10.1016/j.aap.2009.03.001

162. Laing AC, Tootoonchi I, Hulme PA, Robinovitch SN. Effect of compliant flooring on impact force during falls on the hip. *J Orthop Res.* 2006;24(7):1405-1411. doi: 10.1002/jor.20172
163. Mackey DC, Lachance CC, Wang PT, Feldman F, Laing AC, Leung PM, et al. The Flooring for Injury Prevention (FLIP) Study of compliant flooring for the prevention of fall-related injuries in long-term care: A randomized trial. *PLoS Med.* 2019;16(6):e1002843. doi: 10.1371/journal.pmed.1002843
164. Nakanishi T, Hitosugi M, Murayama H, Takeda A, Motozawa Y, Ogino M, Koyama K. Biomechanical Analysis of Serious Neck Injuries Resulting from Judo. *Healthcare (Basel).* 2021;9(2). doi: 10.3390/healthcare9020214
165. Qu H, Zhang S, Sorochan JC, Weinhandl JT, Thoms AW, Dickson KH. Effects of synthetic turf and shock pad on impact attenuation related biomechanics during drop landing. *Sports Biomech.* 2022;21(6):748-760. doi: 10.1080/14763141.2019.1690570
166. Tessutti V, Ribeiro AP, Trombini-Souza F, Sacco IC. Attenuation of foot pressure during running on four different surfaces: asphalt, concrete, rubber, and natural grass. *J Sports Sci.* 2012;30(14):1545-1550. doi: 10.1080/02640414.2012.713975
167. Tomin M, Kossa A, Berezvai S, Kmetty Á. Investigating the impact behavior of wrestling mats via finite element simulation and falling weight impact tests. *Polymer Testing.* 2022;108. doi: 10.1016/j.polymeresting.2022.107521
168. Wardiningsih W, Troynikov O. An evaluation of force attenuation, comfort properties and density of materials for hip protective pads. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics.* 2019;14. doi: 10.1177/1558925019853955
169. Schafer R, Trompeter K, Fett D, Heinrich K, Funken J, Willwacher S, et al. The mechanical loading of the spine in physical activities. *Eur Spine J.* 2023;32(9):2991-3001. doi: 10.1007/s00586-023-07733-1
170. Huang Q, Kleiven S. Finite Element Analysis of Energy-Absorbing Floors for Reducing Head Injury Risk during Fall Accidents. *Applied Sciences.* 2023;13(24). doi: 10.3390/app132413260
171. Mishra E, Lubbe N. Assessing injury risks of reclined occupants in a frontal crash preceded by braking with varied seatbelt designs using the SAFER Human Body Model. *Traffic Inj Prev.* 2024;25(3):445-453. doi: 10.1080/15389588.2024.2318414
172. Harper DJ, McBurnie AJ, Santos TD, Eriksrud O, Evans M, Cohen DD, et al. Biomechanical and Neuromuscular Performance Requirements of Horizontal Deceleration: A Review with Implications for Random Intermittent Multi-Directional Sports. *Sports Med.* 2022;52(10):2321-2354. doi: 10.1007/s40279-022-01693-0
173. Stemper BD, Chirvi S, Doan N, Baisden JL, Maiman DJ, Curry WH, et al. Biomechanical tolerance of whole lumbar spines in straightened posture subjected to axial acceleration. *J Orthop Res.* 2018;36(6):1747-1756. doi: 10.1002/jor.23826
174. Chastain K, Gepner B, Moreau D, Koerber B, Forman J, Hallman J, Kerrigan J. Effect of axial compression on stiffness and deformation of human lumbar spine in flexion-extension. *Traffic Inj Prev.* 2023;24(sup1):S55-S61. doi: 10.1080/15389588.2023.2198627
175. Gabauer DJ, Gabler HC. The effects of airbags and seatbelts on occupant injury in longitudinal barrier crashes. *J Safety Res.* 2010;41(1):9-15. doi: 10.1016/j.jsr.2009.10.006
176. Soica A, Gheorghe C. A Review of Seatbelt Technologies and Their Role in Vehicle Safety. *Applied Sciences.* 2025;15(10). doi: 10.3390/app15105303
177. Pintar FA, Yoganandan N, Myers T, Elhagediab A, Sances A, Jr. Biomechanical properties of human lumbar spine ligaments. *J Biomech.* 1992;25(11):1351-1356. doi: 10.1016/0021-9290(92)90290-h
178. Sequeira GJ, Brandmeier T. Evaluation and characterization of crash-pulses for head-on collisions with varying overlap crash scenarios. *Transportation Research Procedia.* 2020;48:1306-1315. doi: 10.1016/j.trpro.2020.08.156
179. King AI, Yang KH. Research in biomechanics of occupant protection. *J Trauma.* 1995;38(4):570-576. doi: 10.1097/00005373-199504000-00017
180. Hans D, Goertzen AL, Krieg MA, Leslie WD. Bone microarchitecture assessed by TBS predicts osteoporotic fractures independent of bone density: the Manitoba study. *J Bone Miner Res.* 2011;26(11):2762-2769. doi: 10.1002/jbmr.499
181. Schreiber JJ, Anderson PA, Rosas HG, Buchholz AL, Au AG. Hounsfield units for assessing bone mineral density and strength: a tool for osteoporosis management. *J Bone Joint Surg Am.* 2011;93(11):1057-1063. doi: 10.2106/jbjs.J.00160
182. Wang TY, Park C, Zhang H, Rahimpour S, Murphy KR, Goodwin CR, et al. Management of Acute Traumatic Spinal Cord Injury: A Review of the Literature. *Front Surg.* 2021;8:698736. doi: 10.3389/fsurg.2021.698736
183. Grabel ZJ, Lunati MP, Segal DN, Kukowski NR, Yoon ST, Jain A. Thoracolumbar spinal fractures associated with ground level falls in the elderly: An analysis of 254,486 emergency department visits. *J Clin Orthop Trauma.* 2020;11(5):916-920. doi: 10.1016/j.jcot.2020.04.009
184. Chen S, Li G, Li F, Wang G, Wang Q. A dynamic nomogram for predicting the probability of irreversible neurological dysfunction after cervical spinal cord injury: research based on clinical features and MRI data. *BMC Musculoskelet Disord.* 2023;24(1):459. doi: 10.1186/s12891-023-06570-z
185. Kreinest M, Gliwitzky B, Schuler S, Grutzner PA, Munzberg M. Development of a new Emergency Medicine Spinal Immobilization Protocol for trauma patients and a test of applicability by German emergency care providers. *Scand J Trauma Resusc Emerg Med.* 2016;24:71. doi: 10.1186/s13049-016-0267-7
186. Maschmann C, Jeppesen E, Rubin MA, Barfod C. New clinical guidelines on the spinal stabilisation of adult trauma patients - consensus and evidence based. *Scand J Trauma Resusc Emerg Med.* 2019;27(1):77. doi: 10.1186/s13049-019-0655-x
187. Mohammad Ismail A, Forssten MP, Hildebrand F, Sarani B, Ioannidis I, Cao Y, et al. Cardiac risk stratification and adverse outcomes in surgically managed patients with isolated traumatic spine injuries. *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2024;50(2):523-530. doi: 10.1007/s00068-023-02413-7
188. Dao QA, Nguyen VS, Dang VQ, Tran PC, Le DTS. Diagnostic accuracy and clinical utility of mTLICS versus TLICS and TL AOSIS in stratifying three-tier treatment for thoracolumbar injuries: focus on intermediate score range. *BMC Musculoskelet Disord.* 2025;26(1):824. doi: 10.1186/s12891-025-09124-7/
189. Loftis KL, Price J, Gillich PJ. Evolution of the Abbreviated Injury Scale: 1990-2015. *Traffic Inj Prev.* 2018;19(sup2):S109-S113. doi: 10.1080/15389588.2018.1512747
190. van Wessem KJP, Niemeyer MJS, Leenen LPH. Polytrauma patients with severe cervical spine injuries are different than with severe TBI despite similar AIS scores. *Sci Rep.* 2022;12(1):21538. doi: 10.1038/s41598-022-25809-8
191. Germanetti F, Fiumarella D, Belingardi G, Scattina A. Injury Criteria for Vehicle Safety Assessment: A Review with a Focus Using Human Body Models. *Vehicles.* 2022;4(4):1080-1095. doi: 10.3390/vehicles4040057
192. Lee JY, Vaccaro AR, Lim MR, Oner FC, Hulbert RJ, Hedlund R, et al. Thoracolumbar injury classification and severity score: a new paradigm for the treatment of thoracolumbar spine trauma. *J Orthop Sci.* 2005;10(6):671-675. doi: 10.1007/s00776-005-0956-y
193. Patel AA, Vaccaro AR. Thoracolumbar spine trauma classification. *J Am Acad Orthop Surg.* 2010;18(2):63-71. doi: 10.5435/00124635-201002000-00001

194. Fradet L, Petit Y, Wagnac E, Aubin CE, Arnoux PJ. Biomechanics of thoracolumbar junction vertebral fractures from various kinematic conditions. *Med Biol Eng Comput.* 2014;52(1):87-94. doi: 10.1007/s11517-013-1124-8
195. Karamian BA, Schroeder GD, Lambrechts MJ, Canseco JA, Oner C, Vialle E, et al. An international validation of the AO spine subaxial injury classification system. *Eur Spine J.* 2023;32(1):46-54. doi: 10.1007/s00586-022-07467-6
196. Schnake KJ, Schroeder GD, Vaccaro AR, Oner C. AOSpine Classification Systems (Subaxial, Thoracolumbar). *J Orthop Trauma.* 2017;31 Suppl 4:S14-S23. doi: 10.1097/BOT.0000000000000947
197. Vaccaro AR, Oner C, Kepler CK, Dvorak M, Schnake K, Bellabarba C, et al. AOSpine thoracolumbar spine injury classification system: fracture description, neurological status, and key modifiers. *Spine (Phila Pa 1976).* 2013;38(23):2028-2037. doi: 10.1097/BRS.0b013e3182a8a381
198. Schroeder GD, Karamian BA, Canseco JA, Vialle LR, Kandziora F, Benneker LM, et al. Validation of the AO Spine Sacral Classification System: Reliability Among Surgeons Worldwide. *J Orthop Trauma.* 2021;35(12):e496-e501. doi: 10.1097/BOT.0000000000002110
199. Bak AB, Moghaddamjou A, Malvea A, Fehlings MG. Impact of Mechanism of Injury on Long-term Neurological Outcomes of Cervical Sensorimotor Complete Acute Traumatic Spinal Cord Injury. *Neurospine.* 2022;19(4):1049-1056. doi: 10.14245/ns.2244518.259
200. Goulet J, Richard-Denis A, Petit Y, Diotalevi L, Mac-Thiong JM. Morphological features of thoracolumbar burst fractures associated with neurological outcome in thoracolumbar traumatic spinal cord injury. *Eur Spine J.* 2020;29(10):2505-2512. doi: 10.1007/s00586-020-06420-9
201. Newgard CD, Fischer PE, Gestring M, Michaels HN, Jurkovich GJ, Lerner EB, Fallat ME, Delbridge TR, Brown JB, Bulger EM; Writing Group for the 2021 National Expert Panel on Field Triage. National guideline for the field triage of injured patients: Recommendations of the National Expert Panel on Field Triage, 2021. *J Trauma Acute Care Surg.* 2022 Aug 1;93(2):e49-e60. doi: 10.1097/TA.0000000000003627
202. Lokerman RD, van Rein EAJ, Waalwijk JF, van der Sluijs R, Houwert RM, Lansink KWW, et al. Accuracy of Prehospital Triage of Adult Patients With Traumatic Injuries Following Implementation of a Trauma Triage Intervention. *JAMA Network Open.* 2023;6(4):e236805-e236805. doi: 10.1001/jamanetworkopen.2023.6805
203. Geduld C, Muller H, Saunders CJ. Factors which affect the application and implementation of a spinal motion restriction protocol by prehospital providers in a low resource setting: A scoping review. *Afr J Emerg Med.* 2022;12(4):393-405. doi: 10.1016/j.afjem.2022.08.005
204. caravantes R, Quezada A, Jimenez L. Low-energy trauma causing multiple cervical fracture: a case report. *MOJ Surgery.* 2024;12(3):117-119. doi: 10.15406/mojs.2024.12.00276
205. Freeman MD, Croft AC, Nicodemus CN, Centeno CJ, Elkins WL. Significant spinal injury resulting from low-level accelerations: a case series of roller coaster injuries. *Arch Phys Med Rehabil.* 2005;86(11):2126-2130. doi: 10.1016/j.apmr.2005.05.017
206. Yoganandan N, Stemper BD, Baisden JL, Pintar FA, Paskoff GR, Shender BS. Effects of acceleration level on lumbar spine injuries in military populations. *Spine J.* 2015;15(6):1318-1324. doi: 10.1016/j.spinee.2013.07.486

Ukrainian Neurosurgical Journal. 2026;32(1):92-98
doi: 10.25305/unj.337777

Comparative efficacy of progesterone and vitamin D in improving functional outcomes after traumatic brain injury

Kenzie Ongko Wijaya ¹, Nunki Puspita Utomo ², Muhammad Andika Wibisono ¹, Endro Basuki Sadjiman ²

¹ Neurosurgery Department, Rumah Sakit Umum Daerah Wates, Yogyakarta, Indonesia

² Neurosurgery Department, Bethesda Hospital Yogyakarta, Indonesia

Received: 20 August 2025

Accepted: 17 November 2025

Address for correspondence:

Kenzie Ongko Wijaya, Neurosurgery Department, Rumah Sakit Umum Daerah Wates, Jl. Tentara Pelajar No. Km. 1 No. 5, Area Sawah, Beji, Kec. Wates, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta 55651, Indonesia, email: kenzieow7@gmail.com

Background: Traumatic brain injury (TBI) remains a major clinical challenge in neurosurgery due to its heterogeneous pathophysiology and the limited availability of effective pharmacological interventions. Progesterone and vitamin D have demonstrated neuroprotective and anti-inflammatory properties in preclinical models; however, their translational efficacy in clinical trials remains inconclusive. Clarifying their therapeutic roles may help inform adjunctive strategies in the acute management of neurotrauma.

Objectives: To assess the neuroprotective effects of progesterone and vitamin D in enhancing functional recovery following moderate to severe TBI, and to compare the clinical efficacy of these agents based on standardized neurological outcome measures derived from randomized controlled trials (RCTs).

Methods: A systematic review and meta-analysis were conducted in accordance with the PRISMA guidelines. Randomized controlled trials (RCTs) were identified through searches of PubMed, EMBASE, Web of Science, and the Cochrane Library, comparing progesterone and/or vitamin D with placebo in patients with traumatic brain injury (TBI). Studies reporting Glasgow Outcome Scale-Extended (GOS-E) outcomes were included. Standardized mean differences (SMDs) with 95% confidence intervals (CIs) were calculated using Review Manager version 5.4. Study quality and heterogeneity were assessed.

Results: Six RCTs were included: three progesterone trials (n = 1,426) and three vitamin D trials (n = 192). Progesterone showed no significant improvement in functional outcomes compared with placebo (SMD = -0.07; 95% CI: -0.32 to 0.19; p = 0.60; I² = 58%). Vitamin D demonstrated a non-significant trend toward improved outcomes (SMD = 0.37; 95% CI: -0.27 to 1.02; p = 0.26; I² = 78%). Variability in trial design, timing of intervention, and baseline vitamin D deficiency status may have influenced the observed effects.

Conclusions: Although neither agent showed standalone efficacy, their safety and complementary mechanisms suggest promise for combinatorial or biomarker-guided approaches. This meta-analysis highlights the need for early, precision-targeted, and stratified neuroprotective trials in TBI care.

Keywords: traumatic brain injury (TBI); progesterone; vitamin D; functional outcome

Introduction

Traumatic brain injury (TBI) remains a significant global health concern, contributing to substantial morbidity, long-term disability, and mortality, particularly among young adults [1]. The pathophysiology of TBI is complex, involving both immediate primary injury and subsequent secondary cascades including neuroinflammation, oxidative stress, excitotoxicity, mitochondrial dysfunction, and apoptosis [2]. Current therapeutic strategies are predominantly supportive, and despite decades of research, effective pharmacologic interventions that significantly improve neurological outcomes remain elusive.

Progesterone, a neurosteroid with pleiotropic neuroprotective properties, has garnered attention for its potential to modulate secondary brain injury.

Experimental studies have demonstrated its anti-inflammatory, anti-apoptotic, and neurodegenerative effects [3]. Several randomized controlled trials (RCTs) have evaluated progesterone administration following TBI; however, results regarding its efficacy in improving functional recovery have been inconsistent. [4]. Vitamin D, traditionally known for its role in calcium homeostasis, has emerged as a neuroimmunomodulator with potential therapeutic implications in central nervous system injuries. It exerts neuroprotective effects through regulation of neurotrophic factors, attenuation of oxidative damage, and modulation of immune responses [5]. Preclinical studies and early-phase clinical trials have suggested a beneficial role of vitamin D in TBI, though robust evidence from randomized trials remains limited [6]. The Glasgow Outcome Scale-Extended

Copyright © 2026 Kenzie Ongko Wijaya, Nunki Puspita Utomo, Muhammad Andika Wibisono, Endro Basuki Sadjiman



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

(GOS-E) is a validated and widely used measure of functional recovery following TBI. As a standardized outcome scale, it facilitates comparison across studies and enables evaluation of treatment efficacy based on meaningful improvements in neurological function and disability status [7].

Given the increasing interest in hormone-based and vitamin-based neuroprotective therapies, this meta-analysis aims to systematically compare the efficacy of progesterone and vitamin D in improving functional outcomes in patients with TBI, as assessed by GOS-E scores, using data from randomized controlled trials. By synthesizing available evidence, this study seeks to provide clarity on their comparative therapeutic value and guide future clinical decision-making.

Materials and methods

Search strategy

A comprehensive literature search was conducted in PubMed, EMBASE, Web of Science, and the Cochrane Library to identify studies published from 2005 to March 2025. The search strategy combined Medical Subject Headings (MeSH) and free-text terms, including "Traumatic Brain Injury" OR "TBI," "Progesterone," "Vitamin D," and "Randomized Controlled Trial," using Boolean operators and synonyms to maximize sensitivity. Reference lists of relevant studies and prior systematic reviews were manually screened to identify additional eligible trials.

Study selection

Eligible studies were randomized controlled trials published in English with a placebo-controlled design, enrolling patients with clinically confirmed moderate to severe traumatic brain injury. TBI diagnosis was established based on clinical assessment and/or neuroimaging, such as CT or MRI. Trials were required to report at least one functional outcome, with the GOS-E prioritized as the primary endpoint, and to include sufficient follow-up to evaluate functional recovery. Studies were included only if key intervention details—including dosage, route of administration, and timing relative to injury—were clearly reported. Studies with significant methodological limitations, non-randomized designs, non-clinical populations, or incomplete outcome reporting were excluded.

Data extraction

Data extraction was independently performed by two reviewers using a standardized form, with discrepancies resolved through discussion or consultation with a third reviewer. Extracted data included study characteristics, intervention details, patient demographics, and baseline functional status where available. Timing of therapy initiation relative to the injury phase was recorded, categorized as acute (≤ 24 hours), subacute (1–7 days), or chronic (> 7 days), as this factor can influence treatment response. The primary outcome of interest was functional recovery assessed by GOS-E, while secondary outcomes included neurological improvement and safety endpoints, such as treatment-related adverse events, discontinuations, and total dropouts. When standard deviations were not directly reported, they were derived from standard errors, confidence intervals, t-values, or p-values using established conversion methods.

Statistical analysis

Meta-analysis was performed using Review Manager (RevMan) version 5.4. Continuous outcomes, particularly GOS-E scores, were synthesized using mean differences or standardized mean differences with 95% confidence intervals. Statistical heterogeneity was assessed using Cochran's Q test and quantified with the I^2 statistic, with I^2 values greater than 50% or $p < 0.10$ considered indicative of substantial heterogeneity. Planned subgroup analyses explored the influence of intervention timing, TBI severity, and type of neuroprotective agent on functional outcomes.

Results

Literature search findings

The search strategy yielded 36 citations in PubMed, EMBASE, Web of Science, and the Cochrane Library of Systematic Reviews. **Fig. 1** shows the results of the literature search and study selection. A total of 32 potentially relevant articles were identified in the initial search; however, only six studies met the inclusion criteria and were included in the meta-analysis. Of these, three progesterone trials (Wright *et al.*, 2007; Wright *et al.*, 2014; Skolnick *et al.*, 2014), and three vitamin D trials (Sharma *et al.*, 2020; Shafiei *et al.*, 2022; Intiso *et al.*, 2024) were included in the review. The design and population characteristics of the progesterone and vitamin D tests are shown in **Table 1 and 2**.

Effects and adverse events of progesterone intervention

A total of three RCTs comprising 1,426 patients (742 in the progesterone group and 684 in the placebo group) were included in the meta-analysis. All studies assessed the efficacy of intravenous progesterone in patients with moderate to severe TBI, with follow-up periods ranging from 30 days to 6 months.

The pooled analysis of SMD revealed no statistically significant improvement in neurological outcomes with progesterone therapy compared to placebo (SMD = -0.07; 95% CI: -0.32 to 0.19; $p = 0.60$). Subgroup analysis showed mixed results across studies. Wright *et al.* (2014) reported a slight benefit in the placebo group (SMD = -0.35; 95% CI: -0.68 to -0.02), whereas Skolnick *et al.* (2014) found no significant difference (SMD = 0.00; 95% CI: -0.11 to 0.12), and Wright *et al.* (2007) favored progesterone, albeit not significantly (SMD = 0.17; 95% CI: -0.29 to 0.64). The heterogeneity was moderate ($I^2 = 58\%$, $p = 0.09$), suggesting variability in study designs or populations.

Baseline characteristics were generally similar across studies, with the mean age of participants around 35 years and a predominance of male patients (71% to 78.5%). Progesterone dosing protocols were consistent, utilizing a loading dose of 0.71 mg/kg followed by maintenance infusions ranging from 11 to 119 hours. Notably, only Wright *et al.* (2007) reported a statistically significant reduction in 30-day mortality (13% vs. 30.4% in placebo), while the other two trials did not demonstrate significant clinical benefit in long-term functional outcomes (**Fig. 2**).

Adverse events were reported across all trials, with the largest number observed in Skolnick *et al.* (2014) study ($n = 4,025$). Dropout rates ranged from 3.9% to

15.5%, and very few adverse events directly led to participant withdrawal (0–3 cases per study).

Effects and adverse events of vitamin D intervention

Three RCTs comprising 192 patients (98 in the vitamin D group and 94 in the placebo group) were included in this meta-analysis to evaluate the effects of vitamin D supplementation on neurological recovery in moderate to severe TBI patients.

The pooled SMD favored vitamin D over placebo, but the effect was not statistically significant (SMD=0.37; 95% CI: -0.27 to 1.02; $p=0.26$). Individual studies showed variable outcomes. Sharma *et al.* (2020) reported a significant improvement in the GOS-E scores at 14 days in the vitamin D group (mean 4.80 vs. 2.21, $p<0.0001$), while Shafiei *et al.* (2022) also demonstrated a statistically significant higher proportion of favorable outcomes at 3 months ($p=0.03$). In contrast, Intiso *et al.* (2024) found no significant difference in GOS-E scores between groups.

There was a high degree of heterogeneity among the included studies ($I^2=78%$, $p=0.01$), which may be attributed to differences in dosing regimens, patient ages, and follow-up durations. Intiso *et al.* (2024)

used a bolus plus maintenance approach, while the other two studies administered single high-dose oral regimens (Fig. 3).

Baseline characteristics showed comparable TBI severity across studies. However, patient age varied, with the Intiso *et al.* cohort having a markedly higher mean age (57.5 years) compared to others (~36 years). The male proportion was similar (58.3%–71.4%).

No adverse events or dropouts due to treatment were reported in any of the included trials.

Participant demographics

Across the included studies, male participants constituted the majority, with proportions ranging from 58.3% to 78.5%. Female representation was consistently low, highlighting a clear gender imbalance in both progesterone and vitamin D trials for traumatic brain injury. This limited inclusion of women may affect the generalizability of study findings, as sex-based differences in injury response, hormonal influences, and recovery trajectories are well-documented in TBI research. Future clinical trials should aim for more balanced recruitment or sex-stratified analyses to ensure outcomes are applicable to a broader patient population.

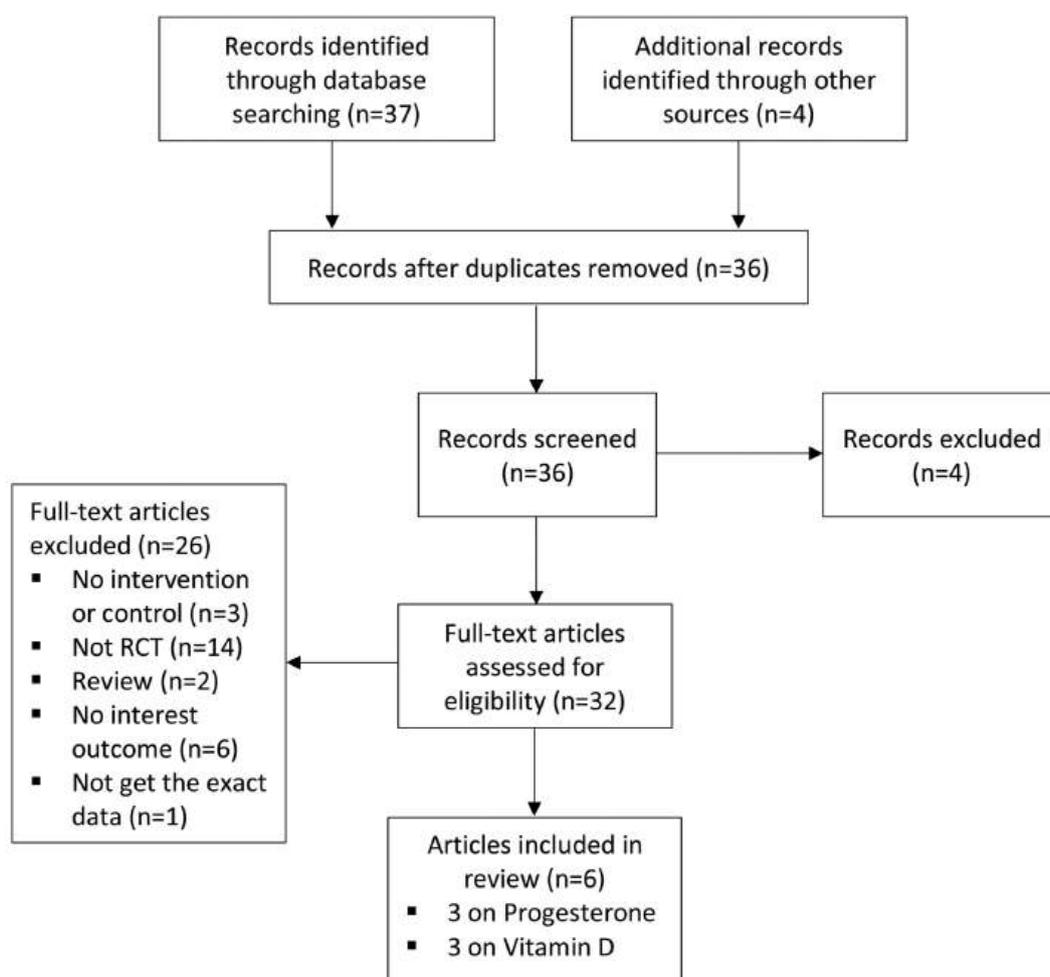


Fig. 1. Flowchart describing the approach used to identify all eligible studies of meta-analysis

Table 1. Baseline characteristics of studies included in the meta-analysis, by Progesterone intervention.

Study	Country	Dose (number of patients)	Male (%)	Mean age (SD)	TBI severity	Drug dosing regimen	Duration (weeks)	Results	Dropout rate (%)	Adverse events leading to dropout (n)	Total adverse events (n)
Wright et al., 2007	USA	0.71 mg/kg loading, then 0.5 mg/kg/h (77)	71	35.3 (14.3)	Moderate to severe	IV infusion: 0.71 mg/kg over 1 h, 0.5 mg/kg/h for 11 h, followed by five 12-h infusions	1	Lower 30-day mortality in progesterone group (13% vs 30.4%)	3.9	0	21 types reported (exact number not provided)
Wright et al., 2014	USA	0.71 mg/kg loading, then 0.5 mg/kg/h (442)	74.5	35.2 (15.7)	Moderate to severe	IV infusion: 0.71 mg/kg over 1 h, 0.5 mg/kg/h for 71 h, tapered over 24 h	2	No significant improvement vs placebo	15.5	3	278
Skolnick et al., 2014	21 countries	0.71 mg/kg loading, then 0.5 mg/kg/h for 119 h (591)	78.5	35 (20.7)	Severe	IV infusion: 0.71 mg/kg/h x 1 h, then 0.5 mg/kg/h x 119 h (total 120 h)	1	No significant benefit vs placebo in GOS at 6 months (OR 0.96, p>0.05)	4.9	1	4025

Notes. TBI (Traumatic Brain Injury), GOS-E (Glasgow Outcome Scale Extended) (range 1–8, higher scores indicate better outcome), IU (International Units), SD (Standard Deviation).

Table 2. Baseline characteristics of studies included in the meta-analysis, by Vitamin D intervention.

Study	Country	Dose (number of patients)	Male (%)	Age (SD)	TBI severity	Drug dosing regimen	Duration (weeks)	Results	Dropout rate (%)	Adverse events leading to dropout (n)	Total adverse events (n)
Sharma et al., 2020	India	Oral 120,000 IU (n=20)	71.4	36.4 (16.4)	Moderate to severe	Single oral dose	2	Higher GOS-E at 14 days (4.80 vs 2.21 in control, p<0.0001)	0	0	0
Shafiei et al., 2022	Iran	Oral 150,000 IU (n=42)	71.4	36.76 (16.12)	Moderate to severe	Single oral dose	12	Higher GOS-E at 3 months: 62.8% favorable vs 49.7% (placebo), p=0.03	0	0	0
Intiso et al., 2024	Italy	Oral 50,000 IU once + 1,000 IU/day (36)	58.3	57.5 (14.9)	Severe	Oral (bolus + maintenance)	8	GOS-E: no significant difference	0	0	0

Notes. TBI (Traumatic Brain Injury), GOS-E (Glasgow Outcome Scale Extended) (range 1–8, higher scores indicate better outcome), IU (International Units), SD (Standard Deviation)

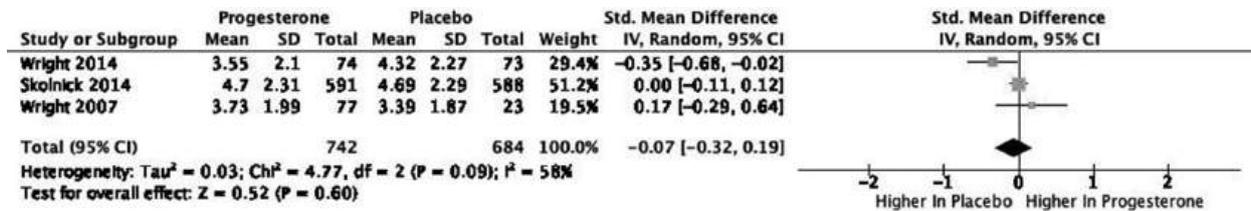


Fig. 2. Functional outcomes based on Glasgow Outcome Scale–Extended (GOS-E) scores in traumatic brain injury patients receiving progesterone treatment

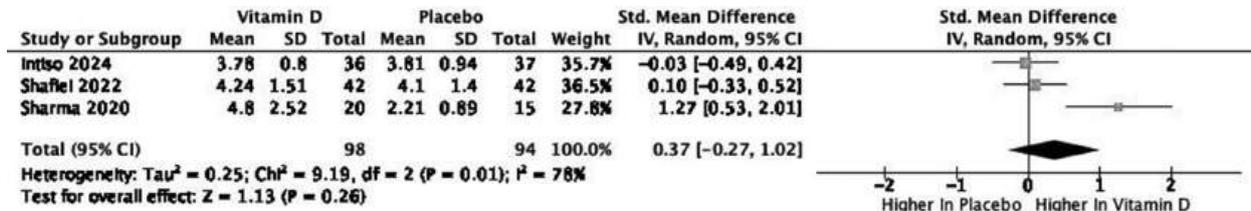


Fig. 3. Functional outcomes based on Glasgow Outcome Scale–Extended (GOS-E) scores in traumatic brain injury patients receiving vitamin D treatment

Discussion

The meta-analysis highlights the challenges of translating the preclinical neuroprotective mechanisms of progesterone and vitamin D into clinically meaningful functional improvements after moderate to severe TBI. While both agents demonstrate biological plausibility, their efficacy remains inconsistent in human trials, underscoring the complexity of TBI pathophysiology and the limitations of monotherapy approaches.

Despite robust preclinical evidence of progesterone’s anti-inflammatory and anti-apoptotic effects, pooled data from three RCTs ($n=1,426$) revealed no significant improvement in GOS-E scores ($SMD=-0.07$; $p=0.60$). This finding aligns with the failures of Phase III trials, where delays in treatment initiation (often >6 hours post-injury) and heterogeneous injury patterns may have blunted therapeutic effects [8]. Notably, one trial reported a mortality reduction (13.6% vs. 30.4% in controls), but this did not correlate with long-term functional recovery. The moderate heterogeneity ($I^2=58\%$) across studies suggests variability in dosing regimens or patient stratification, emphasizing the need for precision in trial design [9].

Vitamin D supplementation showed a non-significant trend toward improved outcomes ($SMD=0.37$; $p=0.26$), with high heterogeneity ($I^2=78\%$) likely reflecting divergent protocols (e.g., single high-dose vs. maintenance regimens). Preclinical models suggest a role in modulating oxidative stress and neurotrophic factors, but clinical translation is hampered by small sample sizes ($n=192$ total) and inconsistent reporting of baseline deficiency status—a critical confounder given vitamin D’s pleiotropic mechanisms. Age-related metabolic differences may further explain null findings in older cohorts [10].

Notably, a network meta-analysis identified the combination of progesterone and vitamin D as superior to either agent alone, with higher rates of favorable outcomes and reduced mortality [11]. Preclinical data

support this synergy; in rodent models, progesterone combined with low-dose vitamin D enhanced spatial memory preservation and astrocyte activation compared to monotherapy ($p<0.05$) [12]. Vitamin D deficiency has been shown to blunt progesterone’s efficacy, suggesting metabolic interdependence. These findings align with the hypothesis that TBI’s multifactorial pathology demands multitarget therapies. For instance, progesterone mitigates edema, while vitamin D addresses chronic inflammation and oxidative stress—a dual approach that may counteract secondary injury cascades more effectively [13].

The neutral efficacy findings for progesterone and vitamin D as standalone therapies do not negate their potential utility in optimized regimens. First, progesterone’s neuroprotective effects appear critically time-dependent, with preclinical models demonstrating maximal benefit when administered within ≤ 2 hours post-injury. This contrasts with clinical trials where treatment initiation often exceeded 6 hours—a delay that may explain the diminished therapeutic effects [14]. Incorporating real-time biomarkers such as S100B or glial fibrillary acidic protein (GFAP) could help identify patients within this narrow therapeutic window. [15]. Second, patient stratification based on injury phenotype (e.g., diffuse axonal injury) or baseline vitamin D status might enhance responsiveness, though current trials lack such precision in enrollment [16]. Finally, both agents exhibit excellent safety profiles, positioning them as viable adjuncts to rehabilitation or emerging neuroprotectants in multimodal strategies.

This analysis has several constraints: the small number of vitamin D trials ($n=3$) limits statistical power; heterogeneity in GOS-E assessment timelines, ranging from 30 days to 6 months complicates outcome comparisons; and incomplete reporting of baseline vitamin D status obscures deficiency-driven treatment effects. Future research should prioritize Phase III trials evaluating progesterone and vitamin D in combination,

leveraging their complementary mechanisms (e.g., progesterone's acute anti-inflammatory effects paired with vitamin D's chronic anti-inflammatory properties). Integrating biomarkers to guide treatment timing and patient selection could enhance precision, while expanding cohorts to include pediatric and geriatric populations—groups with high vitamin D deficiency rates and distinct neuroplasticity profiles—may clarify context-specific efficacy.

A critical limitation of the included trials is the disproportionate male representation, with male participants comprising 58–79% of enrolled cohorts. This underrepresentation of women limits the generalizability of findings, as sex-based differences in neuroinflammation, hormonal responses, and recovery trajectories are increasingly recognized in TBI research. Future trials should adopt sex-stratified enrollment and analyses to determine whether therapeutic responses differ by gender, particularly given progesterone's hormonal interactions and the variable prevalence of vitamin D deficiency across sexes.

Another consideration is potential publication bias. The small number of vitamin D studies and the predominance of neutral-to-negative progesterone trials increase the risk that positive preclinical findings are preferentially published, while underreporting of null or adverse results in early-phase studies could skew the perceived therapeutic promise. Formal assessment using funnel plots or Egger's regression was not feasible given the limited number of included trials, but this bias may inflate the apparent consistency between animal models and selected human studies. Addressing publication bias will require prospective trial registration, rigorous reporting of all outcomes, and the inclusion of unpublished data in future meta-analyses.

Conclusion

Based on the meta-analysis of randomized controlled trials, current evidence does not demonstrate a statistically significant improvement in functional outcomes, as measured by the GOS-E, with either progesterone or vitamin D supplementation in patients with moderate to severe TBI. While progesterone showed no overall benefit, vitamin D exhibited a trend toward improved neurological recovery, though this finding was not statistically significant. The limitations of the existing studies, including small sample sizes and high heterogeneity, highlight the need for larger, well-designed clinical trials to further investigate the therapeutic potential of vitamin D, particularly in combination with other neuroprotective strategies.

Author contributions

Conceptualization, K.O.W. and N.P.U.; Methodology, K.O.W.; Formal Analysis, M.A.W.; Writing—Original Draft Preparation, K.O.W.; Writing—Review & Editing, E.B.S. and N.P.U.; Visualization, M.A.W.; Supervision, E.B.S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Disclosure

Funding

This research received no external funding.

Institutional review board statement

Not applicable.

Informed consent statement

Not applicable.

Data availability statement

All the data supporting the findings of this study are available in the included publications referenced in this meta-analysis.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest and accept the terms and conditions.

References

1. Lele AV. Traumatic Brain Injury in Different Age Groups. *J Clin Med*. 2022 Nov 14;11(22):6739. doi: 10.3390/jcm11226739
2. Freire MAM, Rocha GS, Bittencourt LO, Falcao D, Lima RR, Cavalcanti JRLP. Cellular and Molecular Pathophysiology of Traumatic Brain Injury: What Have We Learned So Far? *Biology (Basel)*. 2023 Aug 17;12(8):1139. doi: 10.3390/biology12081139
3. Zhou Z, Li Y, Peng R, Shi M, Gao W, Lei P, Zhang J. Progesterone induces neuroprotection associated with immune/inflammatory modulation in experimental traumatic brain injury. *Neuroreport*. 2024 Apr 3;35(6):352-360. doi: 10.1097/WNR.0000000000002013
4. Xiao G, Wei J, Yan W, Wang W, Lu Z. Improved outcomes from the administration of progesterone for patients with acute severe traumatic brain injury: a randomized controlled trial. *Crit Care*. 2008;12(2):R61. doi: 10.1186/cc6887
5. Jiang H, Yang X, Wang Y, Zhou C. Vitamin D Protects against Traumatic Brain Injury via Modulating TLR4/MyD88/NF- κ B Pathway-Mediated Microglial Polarization and Neuroinflammation. *Biomed Res Int*. 2022 Jul 15;2022:3363036. doi: 10.1155/2022/3363036
6. Sharma S, Kumar A, Choudhary A, Sharma S, Khurana L, Sharma N, Kumar V, Bisht A. Neuroprotective Role of Oral Vitamin D Supplementation on Consciousness and Inflammatory Biomarkers in Determining Severity Outcome in Acute Traumatic Brain Injury Patients: A Double-Blind Randomized Clinical Trial. *Clin Drug Investig*. 2020 Apr;40(4):327-334. doi: 10.1007/s40261-020-00896-5
7. Hudak AM, Caesar RR, Frol AB, Krueger K, Harper CR, Temkin NR, Dikmen SS, Carlile M, Madden C, Diaz-Arrastia R. Functional outcome scales in traumatic brain injury: a comparison of the Glasgow Outcome Scale (Extended) and the Functional Status Examination. *J Neurotrauma*. 2005 Nov;22(11):1319-26. doi: 10.1089/neu.2005.22.1319
8. Stein DG. Embracing failure: What the Phase III progesterone studies can teach about TBI clinical trials. *Brain Inj*. 2015;29(11):1259-72. doi: 10.3109/02699052.2015.1065344
9. Stein DG. Is progesterone a worthy candidate as a novel therapy for traumatic brain injury? *Dialogues Clin Neurosci*. 2011;13(3):352-9. doi: 10.31887/DCNS.2011.13.2/dstein
10. Rebelos E, Tentolouris N, Jude E. The Role of Vitamin D in Health and Disease: A Narrative Review on the Mechanisms Linking Vitamin D with Disease and the Effects of Supplementation. *Drugs*. 2023 Jun;83(8):665-685. doi: 10.1007/s40265-023-01875-8
11. Aminmansour B, Nikbakht H, Ghorbani A, Rezvani M, Rahmani P, Torkashvand M, Nourian M, Moradi M. Comparison of the administration of progesterone versus progesterone and vitamin D in improvement of outcomes in patients with traumatic brain injury: A randomized clinical trial with placebo group. *Adv Biomed Res*. 2012;1:58. doi: 10.4103/2277-9175.100176
12. Hua F, Reiss JI, Tang H, Wang J, Fowler X, Sayeed I, Stein DG. Progesterone and low-dose vitamin D hormone treatment enhances sparing of memory following traumatic

- brain injury. *Horm Behav.* 2012 Apr;61(4):642-51. doi: 10.1016/j.yhbeh.2012.02.017
13. Cekic M, Cutler SM, VanLandingham JW, Stein DG. Vitamin D deficiency reduces the benefits of progesterone treatment after brain injury in aged rats. *Neurobiol Aging.* 2011 May;32(5):864-74. doi: 10.1016/j.neurobiolaging.2009.04.017
 14. Gibson CL, Gray LJ, Bath PM, Murphy SP. Progesterone for the treatment of experimental brain injury; a systematic review. *Brain.* 2008 Feb;131(Pt 2):318-28. doi: 10.1093/brain/awm183
 15. Abdelhak A, Foschi M, Abu-Rumeileh S, Yue JK, D'Anna L, Huss A, Oeckl P, Ludolph AC, Kuhle J, Petzold A, Manley GT, Green AJ, Otto M, Tuman H. Blood GFAP as an emerging biomarker in brain and spinal cord disorders. *Nat Rev Neurol.* 2022 Mar;18(3):158-172. doi: 10.1038/s41582-021-00616-3
 16. Soltani Z, Shahrokhi N, Karamouzian S, Khaksari M, Mofid B, Nakhaee N, Reihani H. Does progesterone improve outcome in diffuse axonal injury? *Brain Inj.* 2017;31(1):16-23. doi: 10.1080/02699052.2016.1213421

Порівняльна ефективність прогестерону та вітаміну D для поліпшення функціональних результатів після черепно-мозкової травми

Кензі Онгко Віджая ¹, Нункі Пуспіта Утомо ², Мухаммад Андіка Вібісоно ¹,
Ендро Басукі Саджиман ²

¹ Відділення нейрохірургії, Регіональна загальна лікарня Вотс, Джакарта, Індонезія

² Відділення нейрохірургії, Лікарня Бетесда, Джакарта, Індонезія

Надійшла до редакції 20.08.2025
Прийнята до публікації 17.11.2025

Адреса для листування:

Kenzie Ongko Wijaya, Neurosurgery Department, Rumah Sakit Umum Daerah Wates, Jl. Tentara Pelajar No. Km. 1 No. 5, Area Sawah, Beji, Kec. Wates, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta 55651, Indonesia, email: kenzieow7@gmail.com

Черепно-мозкова травма (ЧМТ) є серйозним клінічним викликом у нейрохірургії через гетерогенну патологію та обмежені фармакологічні втручання. Прогестерон і вітамін D продемонстрували нейропротекторні й протизапальні ефекти в доклінічних моделях, але їхню трансляційну успішність у клінічних випробуваннях не визначено. Уточнення ролі прогестерону й вітаміну D сприятиме розробці допоміжних стратегій у лікуванні гострої нейротравми.

Мета: Оцінити нейропротекторні ефекти прогестерону й вітаміну D для поліпшення функціонального відновлення після помірної та тяжкої ЧМТ, а також порівняти клінічну ефективність цих засобів на основі стандартизованих неврологічних показників, отриманих із рандомізованих контрольованих досліджень (РКД).

Матеріали і методи. Систематичний метааналіз відповідно до настанов PRISMA передбачав пошук у базах даних PubMed, EMBASE, Web of Science та Cochrane Library РКД, в яких прогестерон та/або вітамін D порівнювали з плацебо в пацієнтів із ЧМТ. В аналіз залучали дослідження, що використовували показники GOS-E. Стандартизовані середні різниці (SMD) із 95% довірчим інтервалом (ДІ) розраховували за допомогою Review Manager 5.4. Оцінювали якість досліджень і гетерогенність.

Результати. Проаналізовано шість РКД: три дослідження прогестерону (n=1426) і три дослідження вітаміну D (n=192). Прогестерон не продемонстрував значної користі щодо поліпшення функціональних результатів (SMD= -0,07, 95% ДІ -0,32... +0,19, p=0,60, I²=58%), попри сильне біологічне обґрунтування. Вітамін D показав статистично незначущу тенденцію до поліпшення (SMD=0,37, 95% ДІ -0,27...+1,02, p=0,26, I²=78%). Різниця в дизайні дослідження, часі втручання та базовому рівні дефіциту могла вплинути на результати.

Висновки. Хоча жоден із засобів як монотерапія не продемонстрував ефективності, їхня безпечність і комплементарні механізми свідчать про потенціал для комбінованих або біомаркер-орієнтованих підходів. Результати метааналізу вказують на необхідність проведення точних, ранніх і стратифікованих нейропротекторних досліджень при лікуванні ЧМТ.

Ключові слова: черепно-мозкова травма (ЧМТ); прогестерон; вітамін D; функціональне відновлення

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 модифіковану 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 «спицевій» 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 інформованості 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, Vaniyapong 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 Neurosomal 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

Ukrainian Neurosurgical Journal. 2026;32(1):106-112
doi: 10.25305/unj.341960

Порівняння мікродискектомії та мікродискектомії з корпородезом кейджами при грижах попереково-крижового відділу хребта

Є.І. Слинко, Р.В. Чамата

Відділення патології спинного мозку, Інститут нейрохірургії імені акад. А.П. Ромоданова НАМН України, Київ, Україна

Надійшла до редакції 23.10.2025
Прийнята до публікації 17.01.2026

Адреса для листування:

Чамата Роман Валерійович,
Відділення патології спинного мозку, Інститут нейрохірургії імені акад. А.П. Ромоданова,
вул. Платона Майбороди, 32,
Київ, Україна, 04050, e-mail:
chamataroman@gmail.com

Мета: оптимізувати вибір хірургічної тактики лікування пацієнтів із грижами попереково-крижового відділу хребта шляхом порівняльного аналізу результатів мікродискектомії та мікродискектомії з міжтіловим корпородезом кейджем для поліпшення результатів лікування.

Матеріали і методи. У дослідження було залучено 200 хворих із грижами попереково-крижового відділу хребта, які перебували на лікуванні в Інституті нейрохірургії імені акад. А.П. Ромоданова НАМН України в 2015–2022 рр. Проводили оцінку неврологічного стану хворих за виявами больового синдрому, визначали наявність сегментарної нестабільності за даними магнітно-резонансної та комп'ютерної томографії, а також рентгенографії. Використовували хірургічні методи, мікродискектомію гриж попереково-крижового відділу хребта ізольовано (n=100) або з корпородезом кейджами (n=100).

Результати. Виконання мікродискектомії з корпородезом кейджами усувало явища нестабільності та стабілізувало попереково-крижовий відділ хребта ефективніше за мікродискектомію. Частота рецидивів грижі після мікродискектомії з корпородезом кейджем значно нижча (3%), ніж після мікродискектомії (9%). У групі мікродискектомії з корпородезом кейджем відзначено виразніше зниження болю (–82%) та зменшення Oswestry Disability Index (–81%), що свідчить про більшу ефективність стабілізаційної методики. За шкалами Macnab і Prolo відмінні та добрі результати реєстрували частіше в групі мікродискектомії з корпородезом кейджем (91 і 78% та 91 і 77% відповідно). Критерій Вілкоксона підтвердив високий рівень внутрішньогрупового поліпшення (p<0,001), а t-тест — вірогідну міжгрупову різницю.

Висновки. Попереково-крижовий сегмент з установленим кейджем стабільніший і витримує більші навантаження при рухах, зменшує частоту рецидиву формування грижі та больовий синдром. Мікродискектомію з корпородезом кейджем можна розглядати для ретельно відібраних пацієнтів з ознаками сегментарної нестабільності як підхід, що поєднує декомпресію та стабілізацію та у віддалений період характеризується кращими клінічними результатами.

Ключові слова: грижі попереково-крижового відділу хребта; мікродискектомія; мікродискектомія з корпородезом кейджами

Вступ

За статистичними даними, локалізація грижі в попереково-крижовому відділі хребта трапляється найчастіше. Такі грижі є однією з основних причин хронічного больового синдрому й тимчасової втрати працездатності [1, 2]. У більшості випадків (59%) грижі міжхребцевих дисків, які вражають поперекові й крижові корінці, розташовуються на рівні L4–L5 (із компресією корінця L5). Друге місце за частотою посідає рівень L5–S1 (із компресією корінця S1) – 30% [3, 4].

Золотим стандартом хірургічного лікування гриж попереково-крижового відділу хребта є мікродискектомія (мікрохірургічне видалення грижі з міжхребцевого диска). Основною перевагою цього методу є можливість видалення грижі будь-якої щільності, розташування та розміру, з наявністю

стенозу хребтового каналу та секвестру грижі міжхребцевого диска [5]. Однак використання цього методу не запобігає розвитку рецидиву грижі, а також нестабільності попереково-крижового відділу хребта, що потребує виконання повторного хірургічного втручання [6, 7]. Таким чином, питання щодо вибору оптимальної тактики (мікродискектомія чи мікродискектомія з корпородезом кейджем) залишається актуальним.

Мета: оптимізувати вибір хірургічної тактики лікування пацієнтів із грижами попереково-крижового відділу хребта шляхом порівняльного аналізу результатів мікродискектомії та мікродискектомії з міжтіловим корпородезом кейджем для поліпшення результатів лікування.

Copyright © 2026 Є.І. Слинко, Р.В. Чамата



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

Матеріали і методи**Учасники дослідження**

У дослідження було залучено 200 хворих із грижами попереково-крижового відділу хребта, які перебували на лікуванні в Інституті нейрохірургії імені акад. А.П. Ромоданова НАМН України у 2015–2022 рр.

Від усіх хворих отримана усвідомлена та добровільна письмова згода на участь у дослідженні та публікацію даних.

Проведення дослідження схвалене комісією з етики та біоетики Інституту нейрохірургії імені А.П. Ромоданова НАМН України (протокол №3 від 24.11.2022 р.).

Критерії залучення:

1. Вік пацієнтів 19–70 років.
2. Наявність грижі міжхребцевих дисків L4–L5 або L5–S1, підтверджена даними магнітно-резонансної томографії (МРТ).
3. Відсутність попередніх стабілізаційних втручань у поперековому відділі.
4. Тривалість клінічних виявів не менше ніж 6 тиж за неефективності консервативного лікування.
5. Письмова інформована згода на участь у дослідженні.

Критерії вилучення:

1. Мультифракментарні ураження (>1 рівня).
2. Травматичні, інфекційні або пухлинні ураження хребта.
3. Тяжка супутня патологія, що підвищує ризик операції.
4. Вагітність або неможливість проходження реабілітації.

Характеристики групи

Усім пацієнтам проведено хірургічне лікування гриж попереково-крижового відділу хребта, з них 100 – мікродискектомію, решті – мікродискектомію з корпородезом кейджами.

Показання до проведення мікродискектомії (MD):

1. Наявність клінічних симптомів компресії нервового корінця (больовий синдром за типом люмбагіалгії, позитивні симптоми натягу).
2. Наявність грижового випинання міжхребцевого диска L4–L5 або L5–S1, підтверджена даними МРТ.
3. Відсутність ознак виразної дегенерації суміжних структур (Modic 0–I тип, без суттєвої втрати висоти диска).
4. Неефективність консервативного лікування протягом 6–8 тиж.
5. Стабільність рухового сегмента за функціональними рентгенограмами (зміщення <3 мм, кут деформації <10°).

Таким чином, мікродискектомію виконували переважно у хворих з ізольованою грижею диска без структурної нестабільності.

Мікродискектомію з міжтіловим корпородезом кейджем (MD + Cage) застосовували в пацієнтів із дискогенними ураженнями, що супроводжувалися структурними або біомеханічними порушеннями стабільності сегмента, коли лише декомпресія була недостатньою для стабілізації хребта й запобігання рецидиву грижі.

Основні показання до проведення мікродискектомії з міжтіловим корпородезом кейджем:

1. Поєднання грижі диска з рентгенологічними ознаками сегментарної нестабільності (зміщення тіл >3 мм або патологічна рухливість >10° за функціональними пробами).

2. Modic II типу за даними МРТ (ознаки ендопластичної дегенерації, кістозної перебудови чи фіброзу).

3. Рецидивна грижа диска після попередньої дискектомії.

4. Виразна втрата висоти диска (>50%) або постдискектомічна деформація сегмента.

5. Клінічні вияви механічного болю, що зменшується в положенні розвантаження (ознака нестабільності рухового сегмента).

Таким чином, мікродискектомію з міжтіловим корпородезом кейджем виконували у хворих, в яких лише декомпресія було недостатньою для стабілізації сегмента й запобігання рецидиву.

Протипоказання до мікродискектомії:

1. Тяжкий соматичний стан (серцева, дихальна або ниркова недостатність III–IV ступеня).
2. Системні інфекції, гарячкові стани, коагулопатії, прийом антикоагулянтів без можливості тимчасового припинення.
3. Психічні розлади, що унеможливають реабілітацію.
4. Нестабільність хребцевого сегмента (зміщення >3 мм, патологічна рухливість >10°).
5. Значна втрата висоти диска з колапсом тіл хребців.

6. Тяжкі зміни (кістозно-фіброзні, Modic II–III).

Протипоказання до мікродискектомії з міжтіловим корпородезом кейджем:

1. Виразний остеопороз, що не перешкоджає стабільній імплантації кейджа.
2. Активний інфекційний спондилодисцит.
3. Анатомічна неможливість доступу (аномалії розвитку, рубцево-спайкові зміни після багаторазових операцій).
4. Виразна нестабільність хребцевого сегмента III ступеня (зміщення >6 мм, патологічна рухливість >15°), що є показанням для проведення спондилодезу.

Дизайн дослідження

Проведено порівняльне дослідження двох груп пацієнтів, яким виконано мікродискектомію та мікродискектомію з фіксацією кейджем. Аналізували хірургічну технологію, кількість рецидивів після двох видів операцій, а також неврологічну симптоматику в ранній та віддалений період після операції. На підставі отриманих результатів розроблено показання до застосування зазначених методик і рекомендації.

Усім пацієнтам проводили оцінку неврологічного стану за виявами больового синдрому, інтенсивності болю за візуальною аналоговою шкалою (ВАШ), функціонального статусу за ODI (Oswestry Disability Index), шкалою Макнаб (Macnab Scale, **Табл.1**) і шкалою функціонально-економічного результату Проло (Prolo Scale, **Табл.2**), а також визначали частоту рецидиву. Застосовували хірургічні методи, мікродискектомію та мікродискектомію гриж попереково-крижового відділу хребта з корпородезом кейджами гриж L4–L5 або L5–S1. Переважно використовували задній міжламінарний доступ на рівні L4–L5 або L5–S1, у поодиноких випадках при вузькому міжламінарному просторі –

мікроскопічний трансфорамінальний доступ (TLIF). Застосовували титанові або PEEK (polyetheretherketone) кейджи виробництва «Medtronic» або «Novo Spine». Кейджи мали форму «banana» та «bullet». Розмір обирали індивідуально за інтраопераційною висотою дисково-вого простору. Простір усередині кейджа й навколо нього не заповнювали автокістковим матеріалом. Додаткову фіксацію не використовували. У групі порівняння застосовували лише техніку stand-alone cage.

З основних скарг до операції переважали біль у поперековій ділянці, що іррадіював у нижню кінцівку, неможливість тривало ходити й перебувати у вертикальному положенні. Парез стопи виявлено у 12,5 % пацієнтів, тазові розлади — у 4,2 %.

Аналіз розподілу пацієнтів за віковими групами виявив, що грижі міжхребцевих дисків діагностували переважно в групі віком від 41 до 50 років (Табл.3). Розподіл гриж міжхребцевих дисків попереково-крижового відділу хребта за рівнем був таким: L4–L5 — 108 (54%) випадків, L5–S1 — 92 (46%).

У пізній післяопераційній період (через 12 міс) провели анкетування пацієнтів.

1. Для визначення суб'єктивного відчуття болю використовували ВАШ – 100-міліметрову

горизонтальну лінію, де 0 мм відповідає повній відсутності болю, 100 мм — максимально можливому болю. Пацієнт відзначає інтенсивність болю. Відстань від нульової точки до позначки вимірюють у міліметрах.

Для цілей аналізу ми умовно поділили показники ВАШ на такі категорії інтенсивності болю:

- 0 мм — відсутність болю;
- 1–20 мм — легкий біль;
- 21–60 мм — помірний біль;
- 61–100 мм — сильний біль.

Для зручності клінічної інтерпретації результати ВАШ наведено в перерахунку до 0–10 умовних балів (еквівалент 0–100 мм).

2. Анкета якості життя Освестрі (ODI) (Табл.4) — інструмент для кількісної оцінки порушення життєдіяльності, пов'язаного з дегенеративними ураженнями хребта. У нашому дослідженні використано версію ODI v2.0 [10], яка містить 10 пунктів, кожен із яких оцінюють від 0 до 5 балів. Первинну оцінку здійснювали в балах відповідно до структури опитувальника, потім результати перераховували у відсотки, що відповідає загальноприйнятому підходу до інтерпретації показників ODI та дає змогу уніфікувати порівняння отриманих показників із даними літератури.

Таблиця 1. Шкала Макнаб [8]

Оцінка	Характеристика результату
Відмінно (Excellent)	Повне усунення болю, пацієнт повернувся до звичного способу життя та роботи
Добре (Good)	Незначний періодичний біль, який не обмежує повсякденну діяльність; пацієнт може працювати на тій самій посаді
Задовільно (Fair)	Біль зберігається, але значно менший, ніж до операції; діяльність частково обмежена, пацієнт має змінити роботу на менш фізично активну
Погано (Poor)	Відсутнє поліпшення або більший біль, ніж до операції; пацієнт непрацездатний

* Оцінка пацієнтом результатів лікування.

Таблиця 2. Шкала функціонально-економічного результату Проло* [9]

1. Економічна шкала (E)	
Бал	Опис
1	Пацієнт непрацездатний, не може виконувати роботу
2	Працездатність збережена лише частково, пацієнт виконує легку або неповну роботу
3	Пацієнт може працювати, але з обмеженнями (зміна спеціальності або умов праці)
4	Пацієнт працює на попередній роботі з незначними обмеженнями
5	Повна працездатність, повернення до попередньої професійної діяльності
2. Функціональна шкала (F)	
Бал	Опис
1	Виразний біль, постійна потреба в анальгетиках
2	Помірний біль, суттєві обмеження щоденної активності
3	Періодичний біль, часткові обмеження активності
4	Незначний біль, побутова активність збережена
5	Відсутність болю, нормальна фізична активність, відсутність обмежень
Інтерпретація загального результату (E + F)	
Сума балів	Оцінка результату
9–10	Відмінний
7–8	Добрий
5–6	Задовільний
<5	Незадовільний

* Призначена для комплексної оцінки функціонального та економічного статусу пацієнта після хірургічного лікування поперекової патології. Складається з двох підшкал: економічної (E) та функціональної (F). Кожну оцінюють від 1 до 5 балів, максимальна сума — 10 балів.

Таблиця 3. Розподіл пацієнтів за віковими групами

Вікова група, роки	Кількість пацієнтів	
	Абс.	%
19–30	25	12,5
31–40	51	25,5
41–50	53	26,5
51–60	49	24,5
61–70	22	11,0
Усього	200	100,0

Таблиця 4. Інтерпретація показників ODI [10]

Рівень обмеження	ODI%	Інтерпретація
Мінімальне порушення	0–20	Пацієнт може виконувати більшість повсякденних дій
Помірне порушення	21–40	Зниження активності, переважно через біль
Виразне порушення	41–60	Значне обмеження працездатності
Інвалідизація	61–80	Суттєві функціональні обмеження
Повна нерухомість, лежачий стан	81–100	Пацієнт непрацездатний

Сумарний бал за шкалою (0–50) конвертували у відсотковий показник непрацездатності за формулою $ODI\% = (\text{Отриманий бал} : 50) \times 100$.

Статистичний аналіз

Статистичну обробку даних здійснювали з використанням прикладних програм Statistica 6.0. Різницю між групами за всіма основними показниками (ВАШ, ODI, ДВАШ, ΔODI) визначали за допомогою t-тесту Вельча, статистичного методу для порівняння середніх двох незалежних вибірок, який не потребує рівності дисперсій. Він є надійнішою адаптацією t-критерію Стьюдента, особливо коли дисперсії у вибірках сильно відрізняються або розмір вибірок невеликий. Динаміку змін кількісних залежних показників у групах оцінювали за допомогою непараметричного критерію Вілкоксона. Відмінності вважали статистично значущими за умови $p < 0,05$.

Результати

За результатами оцінки інтенсивності болю за ВАШ у групі MD середній рівень болю знизився на 5,3 умовного бала (що відповідає ~63,1% зменшення), тоді як у групі MD + Cage зниження становило 7,1 умовного бала (82,6%). Таким чином, у пацієнтів, яким виконували MD + Cage, зареєстровано виразніше післяопераційне зменшення болю, а також нижчу частоту рецидивів гриж міжхребцевого диска (**Табл.5**).

До хірургічного лікування середні значення ODI були високими в обох групах, що свідчило про значну функціональну обмеженість пацієнтів (**Табл.6**). Через

12 міс в обох групах відзначено суттєве зниження показника ODI, виразніше поліпшення – у групі MD+Cage.

Відносно поліпшення функціонального стану становило 61% у групі MD та 81% у групі MD+Cage, що вказує на більшу ефективність комбінованого хірургічного підходу з використанням кейджів щодо зменшення інвалідизації за показником ODI.

Проведено порівняння функціональних результатів лікування за шкалою Макнаб (**Табл.7**). Отримані дані свідчать про кращі функціональні результати лікування в групі MD+Cage (більша частота відмінних результатів і менша частота задовільних та незадовільних).

Оцінювання за шкалою функціонально-економічного результату Проло проводили за чотирма категоріями залежно від ступеня відновлення працездатності, наявності больового синдрому та функціональних обмежень (**Табл.8**). Отримані результати свідчать про кращі функціонально-економічні наслідки лікування в групі MD+Cage (більша частота відмінних результатів і менша частота задовільних та незадовільних).

Використання критерію Вілкоксона виявило статистично значуще поліпшення як больового синдрому (за ВАШ), так і функціонального стану (за ODI) в обох групах ($p < 0,001$). Ефект змін високий ($r = 0,79 - 0,88$), що вказує на клінічно значуще поліпшення після операції з виразнішим ефектом у групі MD+Cage (**Табл.9**).

Таблиця 5. Динаміка больового синдрому та частота рецидивів

Група	Середня оцінка за ВАШ, умовний бал		Зменшення, %	Частота рецидиву, %
	до лікування	через 12 міс		
MD	8,4	3,1	63,1	9 (9 із 100)
MD + Cage	8,6	1,5	82,6	3 (3 із 100)

Таблиця 6. Динаміка ODI, %

Показник	MD (n=100)	MD+Cage (n=100)	Поліпшення
ODI до операції	62	64	—
ODI через 12 міс	24	12	—
Δ (зменшення)	38	52	61/81

Таблиця 7. Функціональні результати за шкалою Макнаб, %

Категорія результату	MD (n=100)	MD+Cage (n=100)
Excellent	46	63
Good	32	28
Fair	14	7
Poor	8	2
Разом	100	100

Таблиця 8. Оцінка за шкалою функціонально-економічного результату Проло

Категорія результату	Опис	MD (n=100)	MD+Cage (n=100)
Excellent (9–10 балів)	Повне відновлення працездатності, відсутність болю	42 %	61 %
Good (7–8 балів)	Незначний біль, збережена більшість функцій, працездатність відновлена	35 %	30 %
Fair (5–6 балів)	Помірні залишкові симптоми, часткове обмеження працездатності	15 %	7 %
Poor (≤4 бали)	Збережена інвалідизація, втрата працездатності	8 %	2 %
Разом	—	100 %	100 %

Таблиця 9. Результати аналізу за критерієм Вілкоксона (Wilcoxon Signed-Rank Test)

Група	Показник	n	W (статистика)	p-значення	Ефект (r)	Інтерпретація
MD	ВАШ (до-після)	100	0	<0,001*	0,82	Значне зниження болю
	ODI (до-після)	100	120	<0,001*	0,79	Поліпшення функціонального стану
MD+Cage	ВАШ (до-після)	100	0	<0,001*	0,88	Виразне зниження болю
	ODI (до-після)	100	45	<0,001*	0,84	Суттєве функціональне поліпшення

Обговорення

Отримані результати підтверджують, що обидва хірургічні методи — класична мікродискектомія та мікродискектомія з корпородезом кейджем забезпечують суттєве зниження больового синдрому та поліпшення функціонального стану пацієнтів із грижами міжхребцевих дисків попереково-крижового відділу.

Післяопераційне зниження оцінки за ВАШ у групі MD становило в середньому –63% (з 8,4 до 3,1 бала), тоді як у групі MD+Cage — –82% (з 8,6 до 1,5 бала). Показник ODI зменшився з 62 до 24% і з 64 до 12% відповідно, що вказує на виразніше функціональне відновлення при застосуванні кейджів.

Аналіз за шкалами Макнаб і Проло продемонстрував перевагу мікродискектомії з корпородезом кейджем:

- 91% пацієнтів мали результати «Excellent» або «Good» за шкалою Макнаб порівняно з 78% після мікродискектомії;

- за шкалою Проло позитивний результат відзначено в 91% пацієнтів у групі MD+Cage та у 77% у групі MD.

Частота рецидивів у групі MD становила 9%, у групі MD+Cage — лише 3%, що свідчить про стабільність сегмента після міжтілової фіксації.

Установлено статистично значущу ($p < 0,001$) різницю за t-тестом Вельча між групами за всіма основними показниками (ВАШ, ODI, ДВАШ, ΔODI). Внутрішньогруповий аналіз за критерієм Вілкоксона (до-після) підтвердив високу ефективність обох методів ($p < 0,001$) із більшим розміром ефекту ($r = 0,84 - 0,88$) у пацієнтів після мікродискектомії з корпородезом кейджем.

Групи дослідження не були повністю однорідними за клінічними та рентгенологічними характеристиками. З огляду на різноманітність дискової патології досягти однорідності групи дослідження та групи порівняння практично неможливо. У групі мікродискектомії з міжтіловим корпородезом частіше реєстрували ознаки сегментарної нестабільності та Modic-зміни II типу, що визначало показання до застосування стабілізаційних хірургічних методик. Для зменшення впливу зазначеної неоднорідності на результати дослідження проведено багатофакторний статистичний аналіз, а також внутрішньогрупове порівняння показників у динаміці (до-після), що забезпечило коректну оцінку ефективності кожного з досліджуваних методів лікування, незважаючи на відсутність повної однорідності груп.

З огляду на отримані результати, показаннями до проведення мікродискектомії можуть бути:

- наявність клінічних симптомів компресії нервового корінця (больовий синдром за типом люмбагіалгії, позитивні симптоми натягу);

- наявність грижового випинання міжхребцевого диска L4–L5 або L5–S1, підтверджена даними МРТ;

- відсутність ознак виразної дегенерації суміжних структур (Modic 0–I тип, без істотної втрати висоти диска);

- неефективність консервативного лікування протягом 6–8 тиж;

- стабільність рухового сегмента за функціональними рентгенограмами (зміщення < 3 мм, кут деформації $< 10^\circ$).

Таким чином, мікродискектомія показана хворим із переважно ізольованою грижею диска без структурної нестабільності, тоді як мікродискектомія з

міжтіловим корпородезом – пацієнтам із дискогенними ураженнями, що супроводжуються структурними або біомеханічними порушеннями стабільності сегмента, коли лише декомпресія нервового корінця недостатньо для стабілізації хребта й запобігання рецидиву грижі. Це такі випадки, як:

- поєднання грижі диска з рентгенологічними ознаками сегментарної нестабільності (зміщення тіл > 3 мм або патологічна рухливість $> 10^\circ$ за функціональними пробами);

- Modic II типу за даними МРТ (ознаки ендопластичної дегенерації, кістозної перебудови чи фіброзу);

- рецидив грижі диска після попередньої дискектомії;

- виразна втрата висоти диска ($> 50\%$) або постдискектомічна деформація сегмента;

- клінічні вияви механічного болю, що зменшується в положенні розвантаження (ознака нестабільності рухового сегмента).

Отримані нами результати узгоджуються з даними літератури та підтверджують ефективність і безпечність застосування міжтілових кейджів при грижах попереково-крижового відділу хребта.

За даними F. Lei та співавт. (2023) [11], застосування стабілізаційних втручань при рецидивній грижі міжхребцевого диска в ретельно відібраних пацієнтів асоціюється зі зниженням частоти рецидивів порівняно з повторною дискектомією.

Аналогічних висновків про прийнятний профіль безпечності міжтілових кейджів за умови коректного відбору пацієнтів і дотримання хірургічної техніки дійшли R.J. Mobbs та співавт. (2015) [12].

Таким чином, застосування міжтілового кейджа можна розглядати як безпечний та ефективний компонент хірургічного лікування в певних клінічних ситуаціях, що узгоджується з результатами нашого дослідження. У випадках, коли за даними МРТ і динамічних рентгенограм визначається сегментарна нестабільність або тип Modic II, доцільним є застосування мікродискектомії з корпородезом кейджем як більш стабілізаційної технології, що забезпечує триваліший функціональний ефект.

Висновки

1. Обидві методики (мікродискектомія та мікродискектомія з корпородезом кейджем) забезпечують статистично значуще поліпшення больового й функціонального стану пацієнтів із грижами попереково-крижового відділу хребта.

2. Частота рецидивів грижі після мікродискектомії з корпородезом кейджем значно нижча (3%), ніж після мікродискектомії (9%).

3. У групі мікродискектомії з корпородезом кейджем відзначено виразніше зниження болю (–82%) та зменшення ODI (–81%), що свідчить про більшу ефективність стабілізаційної методики.

4. За шкалами Макнаб і Проло відмінні та добрі результати реєстрували частіше в групі мікродискектомії з корпородезом кейджем (91 і 78% та 91 і 77% відповідно).

5. Критерій Вілкоксона підтвердив високий рівень внутрішньогрупового поліпшення ($p < 0,001$), а t-тест — вірогідну міжгрупову різницю.

6. Мікродискектомію з корпородезом кейджем можна розглядати для ретельно відібраних пацієнтів з ознаками сегментарної нестабільності, як підхід, що

поєднує декомпресію та стабілізацію та у віддалений період характеризується кращими клінічними результатами.

Розкриття інформації

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Інформована згода

Від кожного пацієнта отримана інформована згода.

Етичні норми

Усі процедури, виконані в дослідженнях за участю людей, відповідали етичним стандартам інституційного та національного дослідницького комітету, а також Гельсінській декларації 1964 р. та її пізнішим поправкам або відповідним етичним стандартам.

Фінансування

Дослідження не мало спонсорської підтримки.

Список літератури

- Weinstein JN, Tosteson TD, Lurie JD, Tosteson AN, Hanscom B, Skinner JS, Abdu WA, Hilibrand AS, Boden SD, Deyo RA. Surgical vs nonoperative treatment for lumbar disk herniation: the Spine Patient Outcomes Research Trial (SPORT): a randomized trial. *JAMA*. 2006 Nov 22;296(20):2441-50. doi: 10.1001/jama.296.20.2441
- Deyo RA, Mirza SK. CLINICAL PRACTICE. Herniated Lumbar Intervertebral Disk. *N Engl J Med*. 2016 May 5;374(18):1763-72. doi: 10.1056/NEJMc1512658
- Peul WC, van Houwelingen HC, van den Hout WB, Brand R, Eekhof JA, Tans JT, Thomeer RT, Koes BW; Leiden-The Hague Spine Intervention Prognostic Study Group. Surgery versus prolonged conservative treatment for sciatica. *N Engl J Med*. 2007 May 31;356(22):2245-56. doi: 10.1056/NEJMo064039
- Hoang R, Song J, Tiao J, Ngan A, Hoang T, J Corvi J, K Namiri N, Chaudhary S, K Cho S, C Hecht A, Essig D, Virk S, D Katz A. Patient Factors Associated with Recurrent Herniation and Revision Surgery following Lumbar Microdiscectomy. *Spine Surg Relat Res*. 2024 Oct 5;9(2):244-250. doi: 10.22603/ssrr.2024-0148
- Caspar W, Campbell B, Barbier DD, Kretschmer R, Gotfried Y. The Caspar microsurgical discectomy and comparison with a conventional standard lumbar disc procedure. *Neurosurgery*. 1991 Jan;28(1):78-86; discussion 86-7. doi: 10.1097/00006123-199101000-00013
- Ebeling U, Kalbarczyk H, Reulen HJ. Microsurgical reoperation following lumbar disc surgery. Timing, surgical findings, and outcome in 92 patients. *J Neurosurg*. 1989 Mar;70(3):397-404. doi: 10.3171/jns.1989.70.3.0397
- McGirt MJ, Ambrossi GL, Dato G, Sciubba DM, Witham TF, Wolinsky JP, Gokaslan ZL, Bydon A. Recurrent disc herniation and long-term back pain after primary lumbar discectomy: review of outcomes reported for limited versus aggressive disc removal. *Neurosurgery*. 2009 Feb;64(2):338-44; discussion 344-5. doi: 10.1227/01.NEU.0000337574.58662.E2
- Ahn Y, Lee U, Kim WK, Keum HJ. Five-year outcomes and predictive factors of transforaminal full-endoscopic lumbar discectomy. *Medicine (Baltimore)*. 2018 Nov;97(48):e13454. doi: 10.1097/MD.00000000000013454
- Prolo DJ, Oklund SA, Butcher M. Toward uniformity in evaluating results of lumbar spine operations. A paradigm applied to posterior lumbar interbody fusions. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1986 Jul-Aug;11(6):601-6. doi: 10.1097/00007632-198607000-00012
- Fairbank JC, Pynsent PB. The Oswestry Disability Index. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2000 Nov 15;25(22):2940-52; discussion 2952. doi: 10.1097/00007632-200011150-00017
- Lei F, Yanfang L, Shangxing W, Weihao Y, Wei L, Jing T. Spinal Fusion Versus Repeat Discectomy for Recurrent Lumbar Disc Herniation: A Systematic Review and Meta-Analysis. *World Neurosurg*. 2023 May;173:126-135.e5. doi: 10.1016/j.wneu.2022.12.091
- Mobbs RJ, Phan K, Malham G, Seex K, Rao PJ. Lumbar interbody fusion: techniques, indications and comparison of interbody fusion options including PLIF, TLIF, MI-TLIF, OLIF/ATP, LLIF and ALIF. *J Spine Surg*. 2015 Dec;1(1):2-18. doi: 10.3978/j.issn.2414-469X.2015.10.05

Ukrainian Neurosurgical Journal. 2026;32(1):113-125
doi: 10.25305/unj.344539

The quality of life of patients with vestibular schwannoma assessed using cross-cultural adapted and validated PANQOL and Mayo VSQOL questionnaires in comparison

Mykola V. Yehorov ¹, Vasyl V. Shust ¹, Oleg M. Borysenko ², Volodymyr O. Fedirko ¹

¹Subtentorial Neurooncology Department, Romodanov Neurosurgery Institute, Kyiv, Ukraine

²Department of Ear Microsurgery and Otoneurosurgery, O.S. Kolomyichenko Institute of Otolaryngology of National Academy of Medical Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Received: 24 November 2025

Accepted: 22 December 2025

Address for correspondence:

Mykola V. Yehorov, Subtentorial Neurooncology Department, Romodanov Neurosurgery Institute, 32 Platona Maiborody st., Kyiv, 04050, Ukraine, e-mail: neuron25@ukr.net

Introduction: Vestibular schwannoma (VS) adversely affects patients' functional status and quality of life (QoL). Disease-specific questionnaires, such as PANQOL and Mayo VSQOL, provide a more sensitive assessment of disease progression and treatment outcomes compared with general instruments. Modern microsurgical techniques aim to preserve facial and cochlear nerve function, which directly influences postoperative QoL.

Objective: To evaluate the QoL of patients with VS using the Ukrainian versions of PANQOL and Mayo VSQOL questionnaires and to validate them according to COSMIN standards.

Materials and methods: The prospective study included 190 patients with VS, divided into three groups: Group I (n=64) — traditional microsurgery (2001–2016); Group II (n=57) — modern microsurgical techniques (2017–2024); Group III (n=69) — observation ("wait-and-scan"). QoL was assessed using PANQOL, Mayo VSQOL, SF-36, QLQ-C30, and BN20 questionnaires. Correlation analysis was performed; statistical significance was set at $p < 0.05$.

Results: Mayo VSQOL scores were significantly higher in Group II compared with Group I in the domains of balance (+33.3%), tinnitus/pain (+36.4%), emotional well-being (+43.1%), memory (+58.4%), and total score (+32.2%). Comparison with Group III also confirmed the advantage of surgical treatment, particularly in emotional well-being and memory (+44.3%). PANQOL demonstrated the greatest improvement in the "Face" domain (+35.6%), while changes in other domains were not statistically significant. Significant correlations were found between PANQOL and Mayo VSQOL results with SF-36, QLQ-C30, and BN20, confirming their validity. Internal consistency was high (PANQOL $\alpha = 0.75$ – 0.93 preoperatively; $\alpha = 0.81$ – 0.90 postoperatively; Mayo $\alpha = 0.763$ – 0.938 preoperatively; $\alpha = 0.858$ – 0.937 postoperatively). Test-retest reliability (ICC) ranged from 0.60–0.91 for PANQOL and 0.778–0.953 for Mayo. Mayo VSQOL demonstrated higher responsiveness to clinical changes (Cohen's $d = 2.11$; SRM=1.74) compared with PANQOL (Cohen's $d = 0.87$; SRM=0.75).

Conclusions: PANQOL and Mayo VSQOL are reliable instruments for assessing QoL in patients with VS. Mayo VSQOL demonstrated higher sensitivity, while PANQOL showed stable correlation with general QoL scales. The use of modern microsurgical techniques substantially improves postoperative QoL in VS patients.

Keywords: vestibular schwannoma; quality of life; PANQOL; Mayo VSQOL; treatment outcomes

Background

Over the past three decades, the diagnosis and treatment of sporadic vestibular schwannomas (VS) have changed significantly. Widespread magnetic resonance imaging (MRI) availability has increased the detection of incidental tumors, while radiosurgery and the "wait-and-scan" strategy have been increasingly used for small, clinically inactive lesions. These changes shifted the focus from purely morphological and neurosurgical endpoints (resection completeness, survival) to broader concepts of "treatment success," including functional outcomes and patient-reported QoL [1–6].

In VS clinical studies general questionnaires such as SF-36, EORTC QLQ-C30 have long been used. They

effectively assess general health but poorly capture VS-specific problems such as hearing loss, tinnitus, balance disorders, anxiety, or social/occupational impacts [5, 7–10]. Over the last 15 years, there has been growing interest in validating disease-specific scales: PANQOL (Penn Acoustic Neuroma QoL) and the newer Mayo VSQOL Index. These scales correlate better with clinical symptoms and provide sensitive criteria for comparing treatment strategies [1–3, 7–11].

PANQOL was developed and validated specifically for patients with acoustic/vestibular schwannomas. It has good psychometric properties including internal consistency, test-retest reliability and demonstrated correlation with clinical indicators. Translations into



Italian, Spanish, Hindi, and other languages have confirmed its stability across cultures, making it suitable for multicenter and long-term cohort studies [3, 9, 12-16].

Mayo VSQOL is a newer 40-item tool designed for a comprehensive assessment of VS impact and treatment on QoL, including employment, treatment satisfaction, and side effects. Initial validation showed excellent psychometric properties and the ability to detect differences between treatment groups. However, further independent validation and comparative studies with PANQOL and general instruments are needed [2, 4, 7].

Recent studies comparing PANQOL and Mayo VSQOL, as well as their correlation with general scales (QLQ-C30/BN20, SF-36), show that disease-specific instruments are more sensitive to VS-related symptoms including hearing, balance, face and emotional state. General scales correlate with overall QoL but may "smooth out" differences between treatment strategies. Using both disease-specific and general tools provides the most complete assessment of the overall and symptom-specific impact of VS and its treatment [1, 2, 4, 5, 7-11, 17].

Prospective studies using PANQOL have tracked QoL dynamics in patients undergoing different strategies including observation, radiosurgery, microsurgery. Differences in disease-specific QoL between strategies are often minimal in the long term, while early postoperative periods show more pronounced differences [4, 18-22]. Modern microsurgery with intraoperative neuromonitoring and nerve-sparing techniques can achieve favorable long-term functional outcomes and improve certain QoL domains. However, results must be interpreted in the context of patient age, tumor size, preoperative hearing status, comorbidities, and individual expectations [5, 17, 23].

Ukrainian data show later diagnosis with a predominance of large tumors (Koos grades III-IV), affecting treatment choice and functional outcomes [1]. Ukrainian versions of PANQOL and Mayo VSQOL questionnaires have undergone cross-cultural adaptation, pilot testing, with most items demonstrating good comprehensibility (<1% required clarification) [1]. However, multi-center registries and long-term follow-up (>5 years) are necessary to evaluate outcomes and treatment impact on QoL patients with VS in Ukraine [1, 2, 5, 17].

Despite the use of PANQOL and Mayo VSQOL, several questions remain open: standardized translation and cross-cultural adaptation and validation, optimal combination of specific and general instruments in routine practice, determination of clinically meaningful minimal changes for each questionnaire, commonly agreed and accepted criteria of VS surgical removal radicality as well as the impact of socioeconomic and professional factors on subjective quality of life. Therefore, large-scale prospective studies are needed to determine which strategies provide better long-term quality of life in different patient subgroups. In this context, the cross-cultural adaptation, validation and comparative use of PANQOL and Mayo VSQOL are particularly important for developing optimal treatment strategies and enhancing patient-centered care in Ukraine and wherever [2, 4, 10, 15, 17].

The cross-cultural adaptation and validation PANQOL and Mayo VSQOL in Ukraine and comparing them with QLQ-C30/BN20 and SF-36 is not only a methodological

need but also clinically relevant: only localized, sensitive instruments allow treatment strategies to be adjusted according to patient priorities such as hearing preservation, facial nerve function, balance, return to work, etc.) and justify choices between early microsurgery, observation, or primary radiosurgery within a specific social-medical context [1, 2, 5, 17, 18, 23]. The present study combines cross-cultural adaptation and validation with analysis of clinical outcomes using contemporary microsurgical techniques and aims to provide evidence to optimize local treatment protocols and improve QoL for patients with VS in Ukraine [1].

Materials and methods

Study participants

A total of 373 patients with VS were under dynamic observation at the Kolomyichenko Institute of Otolaryngology, National Academy of Medical Sciences of Ukraine. The present study was conducted at the Subtentorial Neuro-oncology Department of the Romodanov Neurosurgery Institute and included patients treated or followed between 2001 and 2024.

Quality-of-life (QoL) assessment was completed in 190 patients. Patients were evaluated during inpatient treatment, outpatient follow-up visits, telephone interviews, as well as postal or electronic surveys. Postoperative QoL assessment was performed no earlier than 6 months after surgery.

Inclusion criteria

Patients were eligible for inclusion if they met all of the following criteria:

- unilateral sporadic vestibular schwannoma;
- preoperative MRI or contrast-enhanced CT confirming the diagnosis;
- histopathological verification (for surgically treated patients);
- age \geq 18 years;
- written informed consent;
- completed PANQOL and/or Mayo VSQOL questionnaires.

Exclusion criteria

Patients were excluded from the study if they had:

- neurofibromatosis type II;
- absence of imaging or histopathological confirmation of vestibular schwannoma;
- incomplete questionnaire data;
- Bell's palsy during follow-up;
- age < 18 years.

Group characteristics

Based on treatment strategy and time period, patients were divided into three groups:

Group I – 64 patients who underwent microsurgical removal of VS using conventional microsurgical techniques between 2001 and 2016;

Group II – 57 patients treated with updated contemporary microsurgical techniques between 2017 and 2024;

Group III – 69 patients managed using a "wait-and-scan" observation strategy without surgical intervention.

The mean follow-up duration was 159.44 months (median 136 months) in Group I and 49.52 months (median 60 months) in Group II.

The follow-up period in Group III ranged from 6 months to 18 years.

Response rates were as follows: Group I – PANQOL (61 patients), Mayo VSQOL (64 patients), BN20/QLQ-C30/SF-36 (64 patients); Group II – PANQOL (57 patients), Mayo VSQOL (56 patients), BN20/QLQ-C30/SF-36 (57 patients); Group III – PANQOL and Mayo VSQOL (69 patients), BN20/QLQ-C30/SF-36 (44 patients).

Comparative analysis of the domains “Hearing,” “Balance,” “Pain,” and “Face” between PANQOL and Mayo VSQOL was performed across the three groups, along with analyses of BN20, QLQ-C30, and SF-36 scores between Groups I–II and II–III. Comparative analysis between Groups I and III was not performed because outdated surgical techniques were associated with different indications for surgery, levels of functional risk, and standards for outcome assessment.

Study design

This study employed a retrospective comparative cohort design and was aimed at assessing quality of life in patients with VS using both disease-specific and generic QoL instruments.

The study combined cross-cultural adaptation and validation of the Ukrainian versions of the PANQOL and Mayo VSQOL questionnaires with a comparative analysis of QoL outcomes according to the selected treatment strategy: conventional microsurgery, contemporary microsurgical techniques, or active surveillance using a “wait-and-scan” approach.

In addition, patients completed the EORTC QLQ-C30, EORTC QLQ-BN20, and SF-36 questionnaires. Comparative analyses were performed between Groups I and II and between Groups II and III, with evaluation of specific functional domains (hearing, balance, pain, facial nerve function) as well as overall composite QoL scores.

Cross-cultural adaptation and validation of the PANQOL and Mayo VSQOL [1] questionnaires were conducted in accordance with international recommendations and COSMIN guidelines [24, 25]. Official permission for the translation and use of the Mayo VSQOL questionnaire in Ukraine was obtained from the developers of the original instrument.

Statistical analysis

Statistical analysis was performed using the Deducer package (Java GUI for R, GNU license) [26]. Continuous variables were analyzed using descriptive statistics. Differences were considered statistically significant at $p < 0.05$.

Internal consistency of questionnaire domains was assessed using Cronbach’s α . Test–retest reliability was evaluated using the intraclass correlation coefficient (ICC) based on paired observations with an interval of 2–14 days. Responsiveness to clinically meaningful changes was assessed using Effect Size (Cohen’s d) and Standardized Response Mean (SRM).

Postoperative hearing outcomes were classified according to the Gardner–Robertson hearing scale [27]. Facial nerve function was evaluated using the House–Brackmann grading system. Correlation and regression analyses were applied to assess the relationships between disease-specific and general QoL instruments.

Results

Adaptation and validation of questionnaires

A standardized multi-step cross-cultural adaptation and validation of the PANQOL and Mayo VSQOL questionnaires was conducted in accordance with

international guidelines [24, 25, 28]. Three neurosurgeons independently translated the scale into Ukrainian. A professional Ukrainian philologist from Taras Shevchenko National University of Kyiv compiled three texts into one. The back translation was performed by two native English speakers residing in Canada and the United Kingdom. The reconciled version was subsequently reviewed by a linguist and a methodology expert from Taras Shevchenko National University of Kyiv. Pilot testing in 30 patients confirmed high comprehensibility, with less than 1% of items requiring clarification. The back-translated version demonstrated 96% semantic equivalence with the originals, meeting the recommended validation criteria [28]. The final Ukrainian version of the Mayo VSQOL questionnaire was approved by the original developers, Carlson ML and Lohse CM, and accepted as the official localized version [1].

To assess QoL in Ukrainian patients with VS and validate the PANQOL and Mayo VSQOL scales, a study was conducted using PANQOL, Mayo VSQOL Index, BN20, QLQ-C30, and SF-36 questionnaires (**Tables 1–7**). The observation period spanned 2001–2024 and included patients treated at the Subtentorial Neuro-oncology Department, as well as outpatients followed in the Ear Microsurgery and Oto-neurosurgery Department of the Kolomyichenko Institute of Otolaryngology after diagnosis verification. Patients with tumor progression (increase in VS size to T3 according to Hannover classification or higher on follow-up imaging) were referred for surgical treatment at the Neurosurgery Institute.

A total of 1,183 statistical cards and 829 medical records from the Institutes archive was reviewed. For the survey, 244 patients were possible to reach, and fully completed questionnaires were received from 190 individuals. Comparative analysis of QoL measures using validated scales (PANQOL, Mayo VSQOL, BN20, QLQ-C30, SF-36) revealed significant differences between the three study groups (see **Tables 1–7**).

A total of 373 patients were under dynamic observation at the Kolomyichenko Otolaryngology Institute of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine, of whom 110 (29.5%) subsequently underwent surgical removal of VS due to symptom progression or a progressive disease course, and 24 (6.4%) received radiotherapy (RT). QoL data were obtained for 10 patients who remained under “wait-and-scan” management. Patients who underwent surgery following “wait-and-scan,” either in our department or at the Kolomyichenko Institute, were evaluated according to the department where the surgery was performed.

Comparative analysis of Groups I and II

According to the PANQOL scale, patients in Group II showed improvement across all domains compared to Group I, except for the “Anxiety” domain. The most pronounced positive changes were observed in the following domains: Pain, which increased from 42.2 to 50.4 (+19.5%, mean comparison criterion 0.905); Facial function, from 45.1 to 61.1 (+35.6%, 1.968); Overall health, from 45.7 to 52.9 (+15.7%, 1.222); and the Total score, from 48.4 to 53.8 (+11.1%, 0.964). In contrast, the “Anxiety” domain showed a minimal decrease (–1%). Statistically significant improvements ($p < 0.05$) were noted specifically in the domains of Pain, Facial function, Overall health, and the Total score (see **Table 2**).

Table 1. Correlation between Groups I, II, and III according to the PANQOL and Mayo VSQOL scales with the BN20 and QLQ-C30 scales, as well as correlation between QLQ-C30 and BN20

Correlation of Group I on the PANQOL and Mayo scales with the BN20 and QLQ-C30 scales, and correlation between QLQ-C30 and BN20			
	Parameter	Parameter	Correlation coefficient
1	PANQOL total score	QLQ C30	0,635
2	PANQOL total score	BN20	0,635
3	Mayo total score	QLQ C30	-0,126
4	Mayo total score	BN20	-0,133
5	QLQ C30	BN20	0,816
Correlation of Group II scores on the PANQOL and Mayo scales with the BN20 and QLQ-C30 scales			
1	PANQOL total score	QLQ C30	0,596
2	PANQOL total score	BN20	0,629
3	Mayo total score	QLQ C30	0,586
4	Mayo total score	BN20	0,501
Correlation of Group III scores on the PANQOL and Mayo scales with the BN20 and QLQ-C30 scales			
1	PANQOL total score	QLQ C30	0,663
2	PANQOL total score	BN20	0,743
3	Mayo total score	QLQ C30	0,155
4	Mayo total score	BN20	0,093

Table 2. Comparison of Groups I and II based on the PANQOL scale

Nº	Parameter	Divergence Coefficient	Mean Value Group I	Mean Value Group II	Increase of Group II over I, % of Mean	Mean Comparison Criterion	Direction of Shift in Group II vs I
1	Hearing	0,118	46	49,7	8%	0,582	+
2	Balance	0,089	48,4	50,3	4%	0,259	+
3	Anxiety	0,145	63,2	62,6	-1%	-0,085	-
4	Energy	0,161	48,4	49,6	2,3%	0,165	+
5	Pain	0,197	42,2	50,4	19,5%	0,905	+
6	Face	0,292	45,1	61,1	35,6%	1,968	+
7	Overall Health	0,146	45,7	52,9	15,7%	1,222	+
8	Total Score	0,174	48,4	53,8	11,1%	0,964	+

Table 3. Comparison of Groups I and II based on the Mayo VSQOL

Nº	Parameter	Divergence Coefficient	Mean Value Group I	Mean Value Group II	Increase of Group II over I, % of Mean	Mean Comparison Criterion	Direction of Shift in Group II vs I
1	Domain I (Hearing problems)	0,19	49	57,1	16,5%	1,09	+
2	Domain II (Dizziness and balance disorders)	0,35	46,7	62,3	33,3%	1,872	+
3	Domain III (Pain, discomfort, and ear noise)	0,397	46,7	65,8	36,4%	2,191	+
4	Domain IV (Face or eye problems)	0,128	50,3	55	9,4%	0,668	+
5	Domain V (Impact on physical, emotional, and social well-being)	0,35	47,8	68,4	43,1%	2,532	+
6	Domain VI (Cognitive and memory difficulties)	0,432	43,3	68,5	58,4%	2,858	+
7	Domain VII (Satisfaction or regret)	0,19	47,9	49	2,2%	0,126	+
8	Domains I-VI (average)	0,652	47,3	62,5	32,2%	2,243	+

Table 4. Comparison of Group I and II according to the QLQ-C30, BN20 and SF-36

Nº	Parameter	Divergence Coefficient	Mean Value Group I	Mean Value Group II	Increase of Group II over I, % of Mean	Mean Comparison Criterion	Direction of Shift in Group II vs I
1	QLQ C30	0,19	65,5	72	9,9%	1,252	+
2	BN20	0,208	67	72,5	8,1%	1,027	+
3	Overall Physical Health Score (SF-36)	0,353	31	34,2	10,3%	0,958	+
4	Overall Mental Health Score (SF-36)	0,261	47,6	49,7	4,4%	0,435	+
5	SF-36 Total score	0,359	39,3	41,9	6,7%	0,706	+

Table 5. Distribution comparison characteristics of Group II and III based on the PANQOL scale

Nº	Parameter	Divergence Coefficient	Mean Value Group III	Mean Value Group II	Increase of Group II over III, % of Mean	Mean Comparison Criterion	Direction of Shift in Group II vs III
1	Hearing	0,224	42,3	49,7	17,4	1,19	+
2	Balance	0,186	48,9	50,3	2,9	0,182	+
3	Anxiety	0,17	56,3	62,6	11,1	0,883	+
4	Energy	0,141	46,9	49,6	5,8	0,388	+
5	Pain	0,114	43,1	50,4	17	0,855	+
6	Face	0,143	66,8	61,1	-8,5	-0,733	-
7	Overall Health	0,158	52,3	52,9	0,6	0,051	+
8	Total Score	0,824	51	53,8	5,6	0,511	+

Table 6. Distribution comparison characteristics of Group II and III based on the MAYO VSQOL scale

Nº	Parameter	Divergence Coefficient	Mean Value Group III	Mean Value Group II	Increase of Group II over III, % of Mean	Mean Comparison Criterion	Direction of Shift in Group II vs III
1	Domain I (Hearing problems)	0,203	48,2	57,1	18,6	1,06	+
2	Domain II (Dizziness and balance disorders)	0,276	47,3	62,3	31,5	1,699	+
3	Domain III (Pain, discomfort, and ear noise)	0,231	46,8	63,8	36,2	2,174	+
4	Domain IV (Face or eye problems)	0,175	47,7	55	15,3	0,95	+
5	Domain V (Impact on physical, emotional, and social well-being)	0,328	46	68,4	48,7	2,743	+
6	Domain VI (Cognitive and memory difficulties)	0,32	46,5	68,5	47,5	2,453	+
7	Domain VII (Satisfaction or regret)	0,157	43,6	49	12,5	0,608	+
8	Domains I-VI (average)	0,317	47,2	62,5	32,5	2,142	+

Table 7. Comparison of Group II and III according to the QLQ-C30, BN20 and SF-36

Nº	Parameter	Divergence Coefficient	Mean Value Group III	Mean Value Group II	Increase of Group II over III, % of Mean	Mean Comparison Criterion	Direction of Shift in Group II vs III
1	QLQ C30	0,187	67,5	72	6,7	0,901	+
2	BN20	0,126	67,5	72,5	7,4	0,916	+
3	Overall Physical Health Score (SF-36)	0,263	30,8	34,2	10,9	1,123	+
4	Overall Mental Health Score (SF-36)	0,172	43,8	49,7	13,4	1,495	+
5	SF-36 Total score	0,19	37,3	41,9	12,3	1,517	+

Assessment using the Mayo VSQOL scale also demonstrated systematic improvement in Group II compared to Group I across all domains. The most notable and statistically significant changes were observed in: Domain I ("Hearing problems"), from 49 to 57.1 (+16.5%, mean comparison criterion 1.09); Domain II ("Dizziness and balance disturbances"), from 46.7 to 62.3 (+33.3%, -1.872); Domain III ("Pain, discomfort, and tinnitus"), from 46.7 to 65.8 (+36.4%, 2.191); Domain V ("Impact on physical, emotional, and social well-being"), from 47.8 to 68.4 (+43.1%, 2.532); Domain VI ("Cognitive difficulties and memory"), from 43.3 to 68.5 (+58.4%, 2.858). Additionally, the mean total score on the Mayo scale significantly increased from 47.3 to 62.5 (+32.2%, 2.243). For these measures, the null hypothesis of equal population means was rejected with $p=0.001$, confirming the high statistical significance of the results (see **Table 3**).

Comparison of BN20, QLQ-C30, and SF-36 scores showed a consistent shift in Group II toward improvement of QoL relative to Group I. The most pronounced differences were observed for BN20 (from 67 to 72.5, +8.1%, mean comparison criterion 1.027) and QLQ-C30 (from 65.5 to 72, +9.9%, 1.252), with statistically significant results ($p<0.05$). Regarding SF-36, improvement in overall physical health in Group II nearly reached statistical significance (mean comparison criterion = 0.958, $p=0.06$), indicating a trend toward a positive effect of the enhanced microsurgical techniques on patients' QoL (see **Table 4**).

Comparative analysis of Groups II and III

QoL assessment in patients with VS using PANQOL, Mayo VSQOL, BN20, QLQ-C30, and SF-36 instruments demonstrated statistically significant improvement in Group II (operated on from 2017) compared to the observation group (Group III).

According to the PANQOL scale (see Table 5), Group II showed improvement in most domains compared to the observation group. The mean score for the Hearing domain increased from 42.3 to 49.7 (+17.4%), which was statistically significant (mean comparison criterion = 1.19, positive shift). Improvements were also observed in the Balance domain from 48.9 to 50.3 (+2.9%, 0.182), Anxiety from 56.3 to 62.6 (+11.1%, 0.883), Energy

from 46.9 to 49.6 (+5.8%, 0.388), Pain from 43.1 to 50.4 (+17%, 0.855), and Overall health from 52.3 to 52.9 (+0.6%, 0.051). The only domain showing a slight decrease was Facial function (from 66.8 to 61.1, -8.5%, -0.733), reflecting the prolonged recovery of facial nerve function, which typically requires more than six months postoperatively. The total PANQOL score increased from 51.0 to 53.8 (+5.6%, 0.511).

Mayo VSQOL analysis (Table 6) also revealed statistically significant improvement in Group II. All domains showed increased mean scores, with significant improvement in six domains: Domain I (Hearing problems) – from 48.2 to 57.1 (+18.6%, mean comparison criterion -1.06); Domain II (Dizziness and balance disturbances) – from 47.3 to 62.3 (+31.5%, 1.699); Domain III (Pain, discomfort, and tinnitus) – from 46.8 to 63.8 (+36.2%, 2.174); Domain V (Impact on physical, emotional, and social well-being) – from 46.0 to 68.4 (+48.7%, 2.743); Domain VI (Cognitive difficulties and memory) – from 46.5 to 68.5 (+47.5%, 2.453); Total Mayo VSQOL score – from 47.2 to 62.5 (+32.5%, 2.142); Domains IV (Facial or eye problems) and VII (Satisfaction or regret) also showed positive trends; however, these changes did not reach statistical significance.

Regarding QLQ-C30, BN20, and SF-36, Group II demonstrated improvement compared to Group III (Table 7). Mean QLQ-C30 scores increased from 67.5 to 72 (+6.7%, mean comparison criterion = 0.901), and BN20 scores increased from 67.5 to 72.5 (+7.4%, 0.916). Overall physical health on SF-36 increased from 30.8 to 34.2 (+10.9%, 1.123), mental health from 43.8 to 49.7 (+13.4%, 1.495), and the total SF-36 score from 37.3 to 41.9 (+12.3%, 1.517).

Clinical status evaluation between groups: facial and cochlear nerve function

Facial nerve function was assessed using the House-Brackmann (HB) scale in the early postoperative period, with distribution as follows: Group 1: HB I was observed in 24 patients (5%), II – 30 (6.3%), III – 67 (14.1%), IV – 102 (21.6%), V – 149 (31.5%), VI – 102 (21.5%); Group 2: HB I was recorded in 132 patients (37.2%), II – 77 (21.7%), III – 95 (26.8%), IV – 37 (10.4%), V – 11 (3.1%), VI – 3 (0.8%) ($p<0.001$, χ^2 test).

Intraoperative identification and preservation of the cochlear nerve were not performed in Group 1. In Group 2, such attempts were made in patients with functional hearing preoperatively. Among 93 identified patients, anatomical preservation of the cochlear nerve was achieved in 49 (52.7%). Postoperative hearing outcomes in these patients were classified according to the Gardner–Robertson (GR) scale as follows: GR-I in 21 patients (42.9%), GR-II – 12 (24.5%), GR-III – 16 (32.6%).

Correlation analysis

Correlation analysis showed a moderate to high positive relationship between total PANQOL and Mayo VSQOL scores and QLQ-C30 and BN20 scores in Group II: PANQOL and QLQ-C30 – $r = 0.596$, PANQOL and BN20 – $r = 0.629$, Mayo and QLQ-C30 – $r = 0.586$, Mayo and BN20 – $r = 0.501$, confirming consistency of QoL assessment across different scales (see **Table 1**).

Correlation analysis and multiple correlation coefficient assessment were used to compare the consistency of PANQOL and Mayo VSQOL questionnaires with the validated SF-36 scale across the three groups of patients with VS.

Group I: Correlation between PANQOL and physical health – $r = 0.651$; mental health – $r = 0.532$; SF-36 total score – $r = 0.611$. Mayo VSQOL: physical health – $r = 0.188$; mental health – $r = 0.129$; SF-36 total score – $r = 0.163$. Multiple regression: PANQOL (physical health $\beta = 0.623$; mental health $\beta = 0.035$), Mayo (physical health $\beta = 0.189$).

Group II: Correlation between PANQOL and physical health – $r = 0.495$; mental health – $r = 0.397$; SF-36 total score – $r = 0.503$. Mayo VSQOL: physical health – $r = 0.477$; mental health – $r = 0.451$; SF-36 total score – $r = 0.532$. Multiple regression: PANQOL (physical health $\beta = 0.527$), Mayo (physical health $\beta = 0.539$).

Group III: Correlation between PANQOL and physical health – $r = 0.716$; mental health – $r = 0.613$; SF-36 total score – $r = 0.748$. Mayo VSQOL: physical health – $r = 0.208$; mental health – $r = -0.182$; SF-36 total score – $r = -0.007$. Multiple regression: PANQOL (physical health $\beta = 0.753$), Mayo (physical health $\beta = 0.414$).

Overall, PANQOL consistently demonstrated moderate to high concordance with SF-36 across all three groups, confirming its ability to reflect both physical and psycho-emotional status of patients. In contrast, Mayo VSQOL showed weak or minimal correlation with SF-36, particularly in Group III, indicating limited sensitivity of this scale for evaluating overall physical and mental health. Multiple regression confirmed that the main predictor of total PANQOL score is physical health, while the contribution of mental health is minimal. For Mayo, the contribution of physical health in regression was significantly lower, consistent with the observed correlation coefficients.

Comparison of corresponding domains between PANQOL and Mayo VSQOL

Analysis of correlations between corresponding domains of the PANQOL and Mayo VSQOL questionnaires in Group II patients revealed only weak positive correlations: Hearing – $r = 0.395$, Balance – $r = 0.405$,

Pain – $r = 0.440$, Face – $r = 0.470$. In Group III, the strength of correlations was even lower: Hearing – $r = 0.262$, Balance – $r = 0.117$, Pain – $r = 0.181$, Face – $r = 0.080$. These results indicate that direct comparison of individual domains between the two questionnaires has limited clinical significance, as the content and structure of the respective questions partially differ. It is more appropriate to use each questionnaire as an independent tool for assessing the QoL or to compare their total scores, which demonstrates better concordance between the scales.

Test-retest reliability, internal consistency, and responsiveness

The internal consistency of the Ukrainian versions of PANQOL and Mayo VSQOL questionnaires was evaluated using Cronbach's α for each domain in pre- and postoperative samples. The ICC was interpreted according to commonly accepted categories: Cronbach's $\alpha < 0.50$ – poor/unacceptable reliability; 0.50–0.59 – weak; 0.60–0.69 – moderate/acceptable; 0.70–0.79 – acceptable/satisfactory; 0.80–0.89 – high; ≥ 0.90 – excellent [29].

The preoperative sample for PANQOL included 154 patients. Cronbach's α values ranged from 0.75 to 0.93 across domains I, II, III, V, and VI, indicating acceptable to excellent internal consistency. Domain IV consisted of a single item and was not analyzed. Domain VII showed low consistency ($\alpha = 0.38$), typical for two-item scales. The overall Cronbach's α for PANQOL in the preoperative sample was 0.91, confirming high internal consistency for the entire scale. Postoperatively (199 patients), domain-specific α values remained stable (0.75–0.90 for domains I, II, III, V, and VI), while domain VII improved slightly ($\alpha = 0.48$) but remained below the acceptable threshold due to the limited number of items. The overall Cronbach's α after surgery was 0.92, demonstrating stability and reliability of the scale postoperatively (**Table 8**).

The preoperative sample for Mayo VSQOL included 105 patients, with α values ranging from 0.763 to 0.938, indicating high internal consistency. In the postoperative sample (177 patients), the overall Cronbach's α for all 40 items was 0.953, reflecting excellent internal consistency. Domain-specific α values ranged from 0.858 to 0.937, demonstrating high to very high reliability of the measured constructs after surgery (**Table 9**).

Test-retest reliability of the Ukrainian versions of PANQOL and Mayo VSQOL was evaluated to determine the temporal stability of the scales. All domains of PANQOL and Mayo VSQOL are presented as interval scales; therefore, reliability was assessed using the ICC, in accordance with COSMIN recommendations [24,26]. ICC interpretation followed widely accepted categories: <0.50 – poor; 0.50–0.75 – moderate; 0.75–0.90 – good; >0.90 – excellent reliability. The test-retest interval ranged from 2 to 14 days, in line with guidelines.

For PANQOL analysis, 33 paired observations were included. ICC values across domains ranged from 0.60 to 0.91. The highest stability was observed in Domain VI (ICC = 0.91), indicating excellent reliability. Domains II, III, IV, and V demonstrated good to high reliability (ICC = 0.72–0.84). Domains I and VII showed moderate

reliability (ICC = 0.60–0.65), corresponding to an acceptable level according to COSMIN [25, 26]. Overall, all PANQOL domains had ICC > 0.60, indicating sufficient and clinically acceptable stability of the questionnaire during repeated administration (**Table 10**).

For the Mayo VSQOL test-retest analysis, 31 patients were included. ICC values for all domains ranged from 0.778 to 0.953, corresponding to good or excellent reliability according to conventional criteria. The highest stability was observed in Domains II (ICC = 0.942) and III (ICC = 0.953), indicating exceptional reproducibility during repeated completion. Pearson's correlation coefficients were also high ($r = 0.872$ – 0.975), further confirming the reliability of results (**Table 11**).

The responsiveness of the Ukrainian versions of the PANQOL and Mayo VSQOL questionnaires was evaluated to determine their ability to detect clinically meaningful postoperative changes. Responsiveness was assessed using two commonly accepted indicators — Effect Size (Cohen's d) and Standardized Response Mean (SRM), calculated based on paired pre- and postoperative observations. The interpretation followed established thresholds: <0.20 — negligible; 0.20–0.49 — small; 0.50–0.79 — moderate; ≥ 0.80 — large effect.

A total of 30 paired PANQOL patient observations in Group II were analyzed. All PANQOL domains demonstrated improvement after surgery. Cohen's d ranged from 0.52 to 1.09, indicating moderate to

large responsiveness. The highest responsiveness was observed in Domain VI (Energy/Vitality) with Cohen's $d = 1.09$ and SRM = 0.81, reflecting a substantial improvement in overall well-being and functional vitality. The total PANQOL score also showed a large effect (Cohen's $d = 0.87$; SRM = 0.75), confirming the high sensitivity of the scale in detecting overall changes in quality of life after treatment. Domains I, II, III, V and VII demonstrated moderate responsiveness, whereas Domain IV (Headache) showed the lowest yet still clinically meaningful effect (Cohen's $d = 0.52$), corresponding to a small–moderate effect (**Table 12**).

For the Mayo VSQOL, 31 paired observations in Group II were included. All domains demonstrated clinically meaningful changes, with Cohen's d values ranging from 0.31 to 2.11. The greatest responsiveness was observed in Domain V, where Cohen's $d = 2.11$ and SRM = 1.74, indicating an exceptionally large effect. High responsiveness was also demonstrated in domains VI (Cohen's $d = 1.33$; SRM = 1.36) and VII (Cohen's $d = 1.12$; SRM = 0.94), reflecting substantial improvements in social functioning, emotional status, and treatment satisfaction. The total Mayo VSQOL score demonstrated a large effect (Cohen's $d = 1.17$; SRM = 1.11), confirming high overall responsiveness of the scale. Domains I–IV showed small to moderate effects (Cohen's $d = 0.31$ – 0.63), which is typical for physical or functional aspects of QoL (**Table 13**).

Table 8. Internal consistency (Cronbach's α) of the PANQOL domains before and after surgery

Domain	Preoperative α	Postoperative α	Interpretation
I. Hearing	0.75	0.75	Acceptable internal consistency at both time points
II. Balance	0.93	0.90	Excellent and consistently high reliability
III. Face	0.79	0.81	Good consistency, no deterioration
IV. Headache	—	—	α not computed (single item domain)
V. Anxiety / Stress	0.81	0.83	Good reliability both pre- and postoperatively
VI. Energy / Vitality	0.87	0.87	Very good and stable reliability
VII. Isolation / Cognition	0.38	0.48	Low (expected for a 2-item domain), slight improvement postoperatively

Table 9. Internal consistency (Cronbach's α) of the MAYO VSQOL domains before and after surgery

Domain	Preoperative α	Postoperative α	Interpretation
I	0.867	0.858	Very good
II	0.931	0.905	Excellent
III	0.873	0.875	Very good
IV	0.763	0.864	Acceptable / good
V	0.938	0.937	Excellent
VI	0.925	0.913	Excellent
VII	0.886	0.894	Very good

Table 10. Test-retest reliability of PANQOL domains (n = 33 paired observations)

PANQOL Domain	ICC	Interpretation
I	0.65	Moderate
II	0.84	High
III	0.75	Good
IV	0.82	High
V	0.72	Good
VI	0.91	Excellent
VII	0.60	Moderate

Table 11. Test-retest reliability of Mayo VSQOL domains (n = 31 paired observations)

Domain	Pearson r	ICC	Interpretation
I	0.896	0.889	Good
II	0.961	0.942	Excellent
III	0.975	0.953	Excellent
IV	0.884	0.858	Good
V	0.872	0.778	Good
VI	0.944	0.860	Good
VII	0.930	0.893	Good

Table 12. Responsiveness of PANQOL domains (n = 30 paired observations)

Domain	Δ (post-pre)	Cohen's d	SRM	Interpretation
I. Hearing	+16.00	0.60	0.55	Moderate effect
II. Balance	+17.17	0.65	0.47	Moderate (d), small-moderate (SRM)
III. Face	+14.67	0.54	0.53	Moderate effect
IV. Headache	+15.00	0.52	0.49	Small-moderate effect
V. Anxiety/Stress	+16.25	0.76	0.59	Moderate-large effect
VI. Energy/Vitality	+24.50	1.09	0.81	Large effect
VII. Isolation/Cognition	+12.50	0.58	0.53	Moderate effect
Total PANQOL	+16.58	0.87	0.75	Large effect

Table 13. Responsiveness of Mayo VSQOL domains (n = 31 paired observations)

Domain	Δ (post-pre)	Cohen's d	SRM	Interpretation
I	+10.17	0.41	0.40	Small-moderate effect
II	+16.82	0.63	0.58	Moderate effect
III	+11.33	0.45	0.37	Small-moderate effect
IV	+7.00	0.31	0.37	Small effect
V	+29.36	2.11	1.74	Very large effect
VI	+22.58	1.33	1.36	Large effect
VII	+18.81	1.12	0.94	Large effect
Total Mayo	+16.58	1.17	1.11	Large effect

Both scales demonstrated adequate ability to detect clinically important postoperative changes; however, their sensitivity profiles differed: PANQOL provided more uniform responsiveness across domains and was particularly sensitive to changes in energy/vitality and overall quality of life. In contrast, Mayo VSQOL showed markedly higher responsiveness in social and emotional domains and in the total score, with Cohen's *d* exceeding 1.0 in three domains.

Discriminant Validity

The discriminant validity of the Ukrainian versions of PANQOL and Mayo VSQOL was assessed based on their ability to differentiate patients with objectively different clinical outcomes. Patients were stratified according to the extent of tumor resection, facial nerve (FN) function assessed by HB scale in the early postoperative period, and cochlear nerve preservation and hearing outcomes. In Group 1 (traditional microsurgery, 2001–2016), FN function was distributed as follows: HB I – 24 (5%), II – 30 (6.3%), III – 67 (14.1%), IV – 102 (21.6%), V – 149 (31.5%), VI – 102 (21.5%). In Group 2 (modern microsurgical techniques, 2017–2024), significantly better outcomes were observed: HB I – 132 (37.2%), II – 77 (21.7%), III – 95 (26.8%), IV – 37 (10.4%), V – 11 (3.1%), VI – 3 (0.8%) ($p < 0.001$). Cochlear nerve preservation and postoperative hearing further demonstrated the discriminant ability of the questionnaires. In Group 2, among 93 patients with functional preoperative hearing, the cochlear nerve was anatomically preserved in 49 (52.7%), with postoperative hearing graded as GR-I in 42.9%, GR-II in 24.5%, and GR-III in 32.6%. Cochlear nerve preservation was not performed in Group 1.

Both PANQOL and Mayo VSQOL effectively reflected these clinical differences, confirming the questionnaires' ability to discriminate clinically distinct subgroups and demonstrating adequate discriminant validity.

Discussion

We performed cross-cultural adaptation and validation of the PANQOL and Mayo VSQOL questionnaires for Ukrainian-speaking patients. To the best of our knowledge, for the first time, apart from the authors of Mayo VSQOL, a comparative analysis of these questionnaires and cross-cultural adaptation and validation of the Mayo VSQOL scale was conducted outside the USA.

The study results confirmed that the Ukrainian versions of PANQOL and Mayo VSQOL demonstrate high internal consistency, adequate test-retest reliability, and sensitivity to clinically meaningful postoperative changes. Internal consistency of PANQOL was high across most domains, whereas Domain VII (Isolation/Cognition) showed lower α values due to the limited number of items, which is typical for short domains. Similarly, Mayo VSQOL exhibited high α values in all domains postoperatively, reflecting the reliability of the measured constructs.

Test-retest analysis indicated that both questionnaires were stable upon repeated administration, with ICCs >0.75 in most domains and exceeding 0.90 in some, corresponding to high to excellent reliability.

Responsiveness analysis demonstrated that PANQOL provides a more uniform detection of clinically meaningful changes, particularly in domains related to energy and overall well-being, while Mayo VSQOL showed exceptionally high responsiveness in social-emotional domains and in the total score. For more precise assessment of responsiveness, a larger sample size than 30 patients and a longer postoperative follow-up period may be required. These findings support the practical utility of both scale for evaluating quality of life in patients after microsurgical removal of vestibular schwannoma and highlight different sensitivity profiles, which may inform the choice of tool depending on research or clinical objectives.

In this study, we assessed and compared patients with vestibular schwannomas who underwent surgical treatment or were managed using the "wait-and-scan" strategy. However, for a comprehensive evaluation of the quality of life of all VS patients, it would be also necessary to include groups treated with radiation or combined (surgical and radiation) modalities. Unfortunately, this was not possible due to the lack of feedback from these patient categories, as well as whole amount included into research (244 from 829) largely as a result of the people migration during war in Ukraine.

Our study demonstrated that the PANQOL and Mayo VSQOL questionnaires provide complementary information on the quality of life of patients with VS.

PANQOL showed a stable moderate-to-high correlation with total SF-36, QLQ-C30, and BN20 scores across all three groups, confirming its reliability for comprehensive assessment in both physical and mental health. For example: In Group I, the correlation coefficients were $r = 0.635$ with QLQ-C30 and $r = 0.635$ with BN20; In Group II, $r = 0.596$ with QLQ-C30 and $r = 0.629$ with BN20; In Group III, $r = 0.663$ with QLQ-C30 and $r = 0.743$ with BN20. These data indicate that PANQOL provides consistent and reliable quality-of-life assessment across different patient groups. Mayo VSQOL, on the other hand, showed a moderate correlation with SF-36, QLQ-C30, and BN20 only in Group II ($r = 0.586$ with QLQ-C30 and $r = 0.501$ with BN20) but demonstrated higher sensitivity to intergroup differences, particularly when comparing Group I vs. II and Group II vs. III. This suggests that Mayo VSQOL more effectively reflects clinical differences between patients undergoing different treatment modalities, even if its correlation with total SF-36 scores is lower.

Therefore, PANQOL can be used for comprehensive assessment of physical and mental health, whereas Mayo VSQOL is more suitable for sensitive detection of clinical differences between treatment groups. Direct comparisons of corresponding domains showed only weak correlations, indicating that each questionnaire should be used as an independent tool or that only total scores should be compared. Although further investigation is advisable to spend on more material for precise comparison.

Comparative analysis of Groups II and III demonstrated a statistically significant improvement after surgery in several domains. The "Anxiety" domain showed a mild decrease only when comparing Groups I and II, while between Groups II and III it remained

relatively stable, though without statistical significance. In our opinion, this trend may be influenced by the timing of the study in Ukraine during the wartime period (2022–2024).

When comparing Groups II and III, not all patients completed the items within the “Satisfaction or Regret” domain, as some questions were applicable only to individuals who had undergone active treatment (surgery or radiation). Additionally, some patients did not fully understand that the “wait-and-scan” strategy constitutes an independent management approach. Therefore, including this domain for patients managed with the “wait-and-scan” strategy may be methodologically inappropriate unless accompanied by additional clarification regarding this treatment modality.

For comprehensive validation, PANQOL and Mayo VSQOL should be compared to other scales; however, the total number of items in all of these questionnaires including BN20, QLQ-C30, and SF-36 reaches 152. Continuous completion of all instruments takes 20–60 minutes, requiring many patients to take breaks. Fatigue and cognitive load may affect the accuracy of responses and overall perception of questions. Practical experience showed that PANQOL can be self-administered by patients, whereas Mayo VSQOL requires explanations, comfortable conditions, and greater attention to each question. Despite or due to the greater complexity and duration, Mayo VSQOL demonstrates increased sensitivity to intergroup differences compared with other assessment tools, making it effective for detailed evaluation of treatment impact on QoL.

The use of the Mayo VSQOL, developed by Carlson *et al.* (2022) [2], demonstrates a contemporary approach to assessing disease-specific quality of life in patients with VS, taking into account hearing, balance, cognitive impairments, anxiety, and psychosocial adaptation. The authors emphasized high internal consistency (Cronbach’s $\alpha > 0.80$ for most domains), adequate test–retest reliability, and confirmed construct validity of the instrument [2]. In our study, the adapted Ukrainian version demonstrated similar psychometric properties, confirming its effectiveness and validity for use in clinical practice and research in Ukraine. To further enhance the reliability and generalizability of the results, analysis on a larger patient cohort is warranted, considering potential cultural and socio-economic factors that may influence patients’ perception of QoL.

Conclusion

1. PANQOL demonstrates a stable moderate-to-high correlation with total SF-36, QLQ-C30, and BN20 scores across all three groups of vestibular schwannoma patients treated by: Group I - traditional microsurgery (2001–2016); Group II - contemporary modern microsurgical techniques (2017–2024); and Group III - observation (“wait and scan”), confirming its adequacy for comprehensive assessment of physical and mental health.

2. Mayo VSQOL shows a moderate correlation with SF-36, QLQ-C30, and BN20 only in Group II, but demonstrates higher sensitivity to intergroup differences, making it effective for detecting clinical

differences between patients undergoing different treatment modalities.

3. Direct comparison of corresponding domains between PANQOL and Mayo VSQOL is of limited clinical value; it is more appropriate to compare total scores or treat the questionnaires as independent instruments.

4. PANQOL is convenient for self-administration by patients, whereas Mayo VSQOL requires explanations and a comfortable setting but shows higher sensitivity to differences between treatment groups.

5. Updated microsurgical techniques (2017–2024) provide a statistically significant improvement in quality of life for patients with VS compared with traditional methods and “wait and scan”/observation.

6. The Ukrainian versions of PANQOL and Mayo VSQOL demonstrated high reliability, stability, and sensitivity to clinically meaningful postoperative changes. PANQOL showed more uniform responsiveness across domains, particularly for energy and overall well-being, while Mayo VSQOL was especially sensitive in social-emotional domains and the total score.

7. The Ukrainian versions of PANQOL and Mayo VSQOL demonstrated adequate discriminant validity, effectively distinguishing patients with different facial nerve outcomes, extent of tumor resection, and cochlear nerve preservation. Higher quality-of-life scores were reported in patients with better clinical outcomes, confirming the scale sensitivity to meaningful clinical differences.

8. The cross-cultural adaptation and validation of the PANQOL and Mayo VSQOL questionnaires were successfully completed. However, further statistical analysis on a larger patient cohort is required to confirm their reliability and generalizability.

Disclosure

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Funding

The study was conducted as part of a research project (R&D) funded by the institution, project number 2 dated 14.04.2021. No additional sponsorship or financial support was received.

Informed consent

Written informed consent was obtained from all patients who participated in the study and/or whose images or clinical data were used in the publication.

Ethical approval

The study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki (2013) and the current legislation of Ukraine. The protocol was approved by the Ethics Committee of SI «Romodanov Neurosurgery Institute of NAMS of Ukraine» (Minutes No. 2, 14.04.2021).

Use of artificial intelligence

Individual sections of the text were edited, translated and grammar-checked using ChatGPT (OpenAI, San Francisco, USA). All statements were verified by the authors.

Author contributions

All authors equally contributed to study conception, data collection and analysis, manuscript drafting and revision, and approved the final version of the manuscript.

References

1. Fedirko VO, Yehorov MV, Chuvashova OY, Malysheva TA, Borysenko OM, Shust VV, Tsiurupa DM, Onishchenko PM, Rozumenko AV, Kruchok IV, Lisianyi AO. Vestibular schwannomas: implementation of PANQOL and Mayo VSQOL Index scales in Ukraine and justification of treatment strategy with preservation of quality of life (problem analysis, own experience, discussion points). *Ukr Neurosurg J.* 2024;30(2):20–35. doi: 10.25305/unj.299185.
2. Carlson ML, Lohse CM, Link MJ, Tombers NM, McCaslin DL, Saoji AA, Hutchins M, Yost KJ. Development and validation of a new disease-specific quality of life instrument for sporadic vestibular schwannoma: the Mayo Clinic Vestibular Schwannoma Quality of Life Index. *J Neurosurg.* 2022 Sep 2;138(4):981-991. doi: 10.3171/2022.7.JNS221104. PMID: 36057121.
3. Pattankar S, Churi O, Misra BK. Validation of the Penn Acoustic Neuroma Quality of Life (PANQOL) Scale for Hindi-Speaking Patients Recently Diagnosed with Vestibular Schwannoma. *Neurol India.* 2022 May-Jun;70(3):978-982. doi: 10.4103/0028-3886.349775. PMID: 35864628.
4. Carlson ML, Barnes JH, Nassiri A, Patel NS, Tombers NM, Lohse CM, Van Gompel JJ, Neff BA, Driscoll CLW, Link MJ. Prospective Study of Disease-Specific Quality-of-Life in Sporadic Vestibular Schwannoma Comparing Observation, Radiosurgery, and Microsurgery. *Otol Neurotol.* 2021 Feb 1;42(2):e199-e208. doi: 10.1097/MAO.0000000000002863. PMID: 33177408.
5. Carlson ML, Tveiten ØV, Driscoll CL, Goplen FK, Neff BA, Pollock BE, Tombers NM, Lund-Johansen M, Link MJ. What drives quality of life in patients with sporadic vestibular schwannoma? *Laryngoscope.* 2015 Jul;125(7):1697-702. doi: 10.1002/lary.25110. PMID: 25546382.
6. Stangerup SE, Tos M, Thomsen J, Caye-Thomasen P. True incidence of vestibular schwannoma? *Neurosurgery.* 2010 Nov;67(5):1335-40; discussion 1340. doi: 10.1227/NEU.0b013e3181f22660. PMID: 20871439.
7. Apa E, Maccarrone F, Gherpelli C, Sacchetto L, Monzani D, Palma S, Nocini R. Italian validation of the Penn Acoustic Neuroma Quality of Life Scale (PANQOL-It). *Acta Otorhinolaryngol Ital.* 2023 Apr;43(2):130-139. doi: 10.14639/0392-100X-N2263. PMID: 37099437; PMCID: PMC10132483.
8. Di Perna G, De Marco R, Baldassarre BM, Lo Bue E, Cofano F, Zeppa P, Ceroni L, Penner F, Melcarne A, Garbossa D, Lanotte MM, Zenga F. Facial nerve outcome score: a new score to predict long-term facial nerve function after vestibular schwannoma surgery. *Front Oncol.* 2023 Jun 12;13:1153662. doi: 10.3389/fonc.2023.1153662. PMID: 37377918; PMCID: PMC10291180.
9. Wiegand DA, Fickel V. Acoustic neuroma--the patient's perspective: subjective assessment of symptoms, diagnosis, therapy, and outcome in 541 patients. *Laryngoscope.* 1989 Feb;99(2):179-87. doi: 10.1288/00005537-198902000-00010. PMID: 2913427.
10. Bieńkowska K, Kostecka B, Kokoszka A. Quality-of-life assessment instruments for patients with vestibular schwannoma: A systematic review. *Braz J Otorhinolaryngol.* 2025 May-Jun;91(3):101585. doi: 10.1016/j.bjorl.2025.101585. PMID: 40120480; PMCID: PMC11982967.
11. Glaas MF, Schäfer R, Jansen P, Franz M, Stenin I, Klenzner T, Schipper J, Eysel-Gosepath K, Kristin J. Quality of Life After Translabrynthine Vestibular Schwannoma Resection-Reliability of the German PANQOL Questionnaire. *Otol Neurotol.* 2018 Jul;39(6):e481-e488. doi: 10.1097/MAO.0000000000001819. PMID: 29889791.
12. Bender M, Tatagiba M, Gharabaghi A. Quality of Life After Vestibular Schwannoma Surgery: A Question of Perspective. *Front Oncol.* 2022 Feb 11;11:770789. doi: 10.3389/fonc.2021.770789. PMID: 35223451; PMCID: PMC8873590.
13. Tufarelli D, Meli A, Alesii A, De Angelis E, Badaracco C, Falcioni M, Sanna M. Quality of life after acoustic neuroma surgery. *Otol Neurotol.* 2006 Apr;27(3):403-9. doi: 10.1097/00129492-200604000-00018. PMID: 16639281.
14. Nishiyama T, Oishi N, Kojima T, Kasuya K, Noguchi M, Ishikawa T, Hosoya M, Ogawa K. Validation and multidimensional analysis of the japanese penn acoustic neuroma quality-of-life scale. *Laryngoscope.* 2020 Dec;130(12):2885-2890. doi: 10.1002/lary.28488. PMID: 31922264.
15. van Leeuwen BM, Herruer JM, Putter H, Jansen JC, van der Mey AG, Kaptein AA. Validating the Penn Acoustic Neuroma Quality Of Life Scale in a sample of Dutch patients recently diagnosed with vestibular schwannoma. *Otol Neurotol.* 2013 Jul;34(5):952-7. doi: 10.1097/MAO.0b013e31828bb2bb. PMID: 23714709.
16. Kristin J, Glaas MF, Stenin I, Albrecht A, Klenzner T, Schipper J, Eysel-Gosepath K. Multistep translation and cultural adaptation of the Penn acoustic neuroma quality-of-life scale for German-speaking patients. *Acta Neurochir (Wien).* 2017 Nov;159(11):2161-2168. doi: 10.1007/s00701-017-3304-z. PMID: 28861705.
17. Neve OM, Jansen JC, Koot RW, Ridder M, Paul G van Benthem P, Stiggelbout AM, Hensen EF. Long-Term Quality of Life of Vestibular Schwannoma Patients: A Longitudinal Analysis. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 2023 Feb;168(2):210-217. doi: 10.1177/01945998221088565. PMID: 35349360.
18. Marinelli JP, Lohse CM, Link MJ, Carlson ML. Quality of Life in Sporadic Vestibular Schwannoma. *Otolaryngol Clin North Am.* 2023 Jun;56(3):577-586. doi: 10.1016/j.otc.2023.02.016. PMID: 37019770.
19. Helal A, Carlson ML, Link MJ. Management of vestibular schwannoma in the elderly. *Handb Clin Neurol.* 2025;212:325-332. doi:10.1016/B978-0-12-824534-7.00025-1. PMID:41052854.
20. Fuentealba-Bassaletti C, Neve OM, van Esch BF, Jansen JC, Koot RW, van Benthem PPG, Hensen EF. Vestibular Complaints Impact on the Long-Term Quality of Life of Vestibular Schwannoma Patients. *Otol Neurotol.* 2023 Feb 1;44(2):161-167. doi: 10.1097/MAO.0000000000003773. PMID: 36624597; PMCID: PMC9835658.
21. Bambakidis E, Mowry S, Amin-Hanjani S. A Scoping Review on Vestibulopathy After Microsurgical Resection of Vestibular Schwannoma-The Forgotten Symptom. *Neurosurg Pract.* 2024 Aug 28;5(4):e00107. doi: 10.1227/neuprac.000000000000107. PMID: 39959543; PMCID: PMC11810020.
22. Betchen SA, Walsh J, Post KD. Self-assessed quality of life after acoustic neuroma surgery. *J Neurosurg.* 2003 Nov;99(5):818-23. doi: 10.3171/jns.2003.99.5.0818. PMID: 14609159.
23. Machetanz K, Lee L, Wang SS, Tatagiba M, Naros G. Trading mental and physical health in vestibular schwannoma treatment decision. *Front Oncol.* 2023 Jun 26;13:1152833. doi: 10.3389/fonc.2023.1152833. PMID: 37434979; PMCID: PMC10332305.
24. Sharif-Nia H, Sánchez-Teruel D, Sivarajan Froelicher E, Hejazi S, Hosseini L, Khoshnavay Fomani F, Moshtagh M, Mollaei F, Goudarzian AH, Babaei A. Connor-Davidson Resilience Scale: a systematic review psychometrics properties using the COSMIN. *Ann Med Surg (Lond).* 2024 Mar 27;86(5):2976-2991. doi: 10.1097/MS9.0000000000001968. PMID: 38694299; PMCID: PMC11060289.
25. Mokkink LB, Elsman EBM, Terwee CB. COSMIN guideline for systematic reviews of patient-reported outcome measures version 2.0. *Qual Life Res.* 2024 Nov;33(11):2929-2939. doi: 10.1007/s11136-024-03761-6. PMID: 39198348; PMCID:

- PMC11541334.
26. Fellows I. Deducer: A data analysis GUI for R. Version 0.7-9. <https://cran.r-project.org/package=Deducer>
27. Casazza GC, Bowers CA, Gurgel RK. Hearing Outcomes Reporting in Lateral Skull Base Surgery. *J Neurol Surg B Skull Base*. 2019 Apr;80(2):120-124. doi: 10.1055/s-0038-1676371. PMID: 30931218; PMCID: PMC6438792.
28. Beaton DE, Bombardier C, Guillemin F, Ferraz MB. Guidelines for the process of cross-cultural adaptation of self-report measures. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2000 Dec 15;25(24):3186-91. doi: 10.1097/00007632-200012150-00014. PMID: 11124735.
29. Taber K.S. The Use of Cronbach's Alpha When Developing and Reporting Research Instruments in Science Education. *Res Sci Educ*. 2018;48:1273-1296 (2018). doi: 10.1007/s11165-016-9602-2

Оцінка якості життя пацієнтів із вестибулярною шванною за допомогою крос-культурно адаптованих та валідованих опитувальників PANQOL і Mayo VSQOL

М.В. Єгоров ¹, В.В. Шуст ¹, О.М. Борисенко ², В.О. Федірко ¹

¹ Відділення субтенторіальної нейроонкології, Інститут нейрохірургії імені акад. А.П. Ромоданова НАМН України, Київ, Україна

² Відділ мікрохірургії вуха та отонейрохірургії, Інститут отоларингології імені О.С. Коломійченка НАМН України, Київ, Україна

Надійшла до редакції 24.11.2025
Прийнята до публікації 22.12.2025

Адреса для листування:

Єгоров Микола Володимирович,
Відділення субтенторіальної нейроонкології, Інститут нейрохірургії імені акад. А.П. Ромоданова, вул. Платона Майбороди, 32, Київ, Україна, 04050, e-mail: neiron25@ukr.net

Вестибулярна шваннома (ВШ) негативно впливає на функціональний стан і якість життя пацієнтів. Специфічні опитувальники PANQOL (Penn Acoustic Neuroma Quality of Life Scale) та Mayo VSQOL (Mayo Vestibular Schwannoma Quality of Life Scale) забезпечують точнішу оцінку перебігу захворювання й результатів лікування порівняно із загальними інструментами. Сучасні мікрохірургічні техніки спрямовані на збереження функцій лицевого та кохлеарного нервів, що впливає на післяопераційну якість життя.

Мета: Оцінити якість життя пацієнтів із ВШ із використанням українських версій PANQOL і Mayo VSQOL та провести їх валідацію за COSMIN (Consensus-based Standards for the selection of health Measurement Instruments).

Матеріали і методи. У проспективне дослідження було залучено 190 пацієнтів із ВШ, яких розподілили на три групи: I (n=64) — традиційна мікрохірургія (2001–2016), II (n=57) — сучасні мікрохірургічні техніки (2017–2024), III (n=69) — спостереження («wait and scan»). Якість життя оцінювали за PANQOL, Mayo VSQOL, SF-36 (Short Form (36) Health Survey), QLQ-C30 (EORTC Quality of Life Questionnaire – Core 30) і BN20 (Brain Cancer Module (EORTC QLQ-BN20)). Проведено кореляційний аналіз. Відмінності вважали статистично значущими за умови $p < 0,05$.

Результати. Показники Mayo VSQOL були вірогідно вищими в групі II порівняно з групою I: рівновага (+33,3%), шум/біль у вухах (+36,4%), емоційне благополуччя (+43,1%), пам'ять (+58,4%) і загальний бал (+32,2%). Порівняння з групою III також підтвердило перевагу хірургічного лікування, особливо за емоційним благополуччям та пам'яттю (+44,3%). Опитування за PANQOL виявило найбільше поліпшення в домені «Обличчя» (+35,6%), тоді як інші домени не досягли рівня статистичної значущості. Установлено значущі кореляції між результатами за PANQOL, Mayo VSQOL і за SF-36, QLQ-C30, BN20, що підтвердило їхню валідність. Внутрішня узгодженість була високою (PANQOL: $\alpha = 0,75-0,93$ до операції, $\alpha = 0,81-0,90$ після операції, Mayo VSQOL: $\alpha = 0,763-0,938$ до операції, $\alpha = 0,858-0,937$ після операції). Тест-ретест (ICC) становив 0,60–0,91 для PANQOL та 0,778–0,953 для Mayo VSQOL. Чутливість до клінічних змін була вищою в Mayo VSQOL (Cohen's $d = 2,11$, SRM=1,74) порівняно з PANQOL (Cohen's $d = 0,87$, SRM=0,75).

Висновки. PANQOL і Mayo VSQOL є надійними інструментами оцінки якості життя за наявності ВШ. Mayo VSQOL продемонстрував більшу чутливість, а PANQOL — стабільну кореляцію із загальними шкалами. Використання сучасних мікрохірургічних технік суттєво поліпшує післяопераційну якість життя.

Ключові слова: вестибулярна шваннома; якість життя; PANQOL; Mayo VSQOL; результати лікування

Ukrainian Neurosurgical Journal. 2026;32(1):126-128
doi: 10.25305/unj.340623

Bifid median nerve: case report

Irakli B. Goginava ¹, Giorgi Murvelashvili ², Mikheil A. Shavgulidze ³, Mariia V. Riezunenko ⁴, Giorgi L. Giordidze ⁵

¹ Department of Pelvic Fractures Surgery, West Georgia Medical Center, Kutaisi, Georgia

² Orthopedics and Traumatology Department, Medical Center Medina, Batumi, Georgia

³ High Franconia Clinics, Münchberg, Germany

⁴ Department of Traumatology and Orthopedics, West Georgia Medical Center, Kutaisi, Georgia

⁵ Department of Neurology, West Georgia Medical Center, Kutaisi, Georgia

Received: 03 October 2025

Accepted: 27 October 2025

Address for correspondence:

Irakli Borisovich Goginava,
Department of Pelvic Fractures Surgery, West Georgia Medical Center, Javakhsishvili str., 83a, Kutaisi, 4600, Georgia, e-mail: igoginava@evex.ge

In the article a rare case of abnormal anatomical structure of the median nerve in a patient with carpal tunnel syndrome is described: a high bifurcation of the median nerve.

A 67-year-old woman complained of periodic intense nocturnal pain and numbness of 1-3 fingers of her left hand. During clinical examination Phalen's wrist flexion and wrist extension tests, Hoffmann-Tinel, postural provocation, median nerve compression, and the "tourniquet" tests were positive. Allen's test was negative. There was no atrophy of the thenar muscles, the strength of palmar abduction of the thumb was comparable to that of the right hand. Sensitivity of the fingers was unchanged. Based on the history and clinical examination, a diagnosis of idiopathic carpal tunnel syndrome of the left hand was made. Open carpal tunnel release, mesoepineurolysis of the median nerve, and tenosynovectomy were performed. Intraoperatively, it was found that from the proximal edge of the wound, the trunk of the median nerve was split into two parts, which were reconnected in the area of the exit from the carpal tunnel, forming a "loop" like structure. An hourglass deformity was also noted on both branches of the median nerve. The radial branch of the split nerve was visually thicker than the ulnar branch. Postoperatively, pain and numbness of 1-3 fingers resolved completely.

The median nerve bifurcation is extremely difficult to detect preoperatively. In the case of a traumatic complete anatomical injury to the median nerve, one should make sure that this structural anomaly is absent, and if there is a bifurcation of the nerve, an extended revision should be performed and a suture should be placed on both damaged branches.

During surgical treatment of carpal tunnel syndrome, it is advisable to check whether the bifurcated nerve runs through a single canal rather than two separate canals. In the latter case, it is necessary to influence both canals during operative or conservative treatment.

Keywords: abnormal anatomical structure; high bifid median nerve; carpal tunnel syndrome

Introduction

The anatomical structure of the median nerve in the forearm and hand has been extensively described in numerous studies. However, various anomalies in the structure of the nerve are of particular theoretical and practical interest. One such anomaly is high bifurcation—the splitting of the median nerve at the level of the forearm and carpal tunnel. In foreign literature, descriptions of this anomaly, especially clinical cases, are quite rare [1]. Only one publication has been found in the available Ukrainian-language scientific literature [2], and none have been found in national medical publications.

The aim of this study is to familiarize readers of the journal with a rare anomaly in the anatomical structure of the median nerve and to describe the features of diagnosis and treatment of carpal tunnel syndrome in combination with median nerve bifurcation.

Case presentation

A 67-year-old woman was admitted with complaints of periodic, predominantly nocturnal, intense pain and numbness in 1-3 fingers of her left hand. At night, her condition improved only by lowering the hand, rubbing it, and shaking it (the "flick" sign). These complaints began 4 years ago, and her condition gradually worsened. She did not seek treatment. During the clinical examination, Phalen's wrist flexion and wrist extension tests, Hoffmann-Tinel test from the median nerve projection site on the forearm, the postural provocation test, median nerve compression, and the "tourniquet" tests were positive. Allen's test was negative. There was no atrophy of the thenar muscles, and the strength of the palmar abduction of the thumb was comparable to that of the right hand. Sensitivity in the fingers was unchanged. Based on the medical history and clinical examination, a diagnosis of idiopathic carpal tunnel



syndrome of the left hand was made and surgical treatment was indicated.

Surgery was performed under local anesthesia using the WALANT technique with a 1% lidocaine solution [3]. A C-shaped skin incision was made, extending to the lower third of the forearm. The flexor retinaculum was completely dissected longitudinally over the grooved probe inserted into the carpal tunnel. Mesopeineurolysis of the median nerve was subsequently performed. It was found that, starting from the proximal edge of the wound, the trunk of the median nerve was split into two parts, which rejoined in the area of the exit from the carpal tunnel, forming a so-called "loop" (**Fig. 1**).

An hourglass deformity was also noted on both branches of the median nerve. The radial branch of the split nerve was visually thicker than the ulnar branch. Due to severe finger flexor tenosynovitis, a tenosynovectomy was performed. The edges of the flexor retinaculum were excised. Sutures were applied to the skin. The postoperative period proceeded without complications.

Three months after the operation, the patient reported complete resolution of pain and numbness in the fingers of the operated hand.

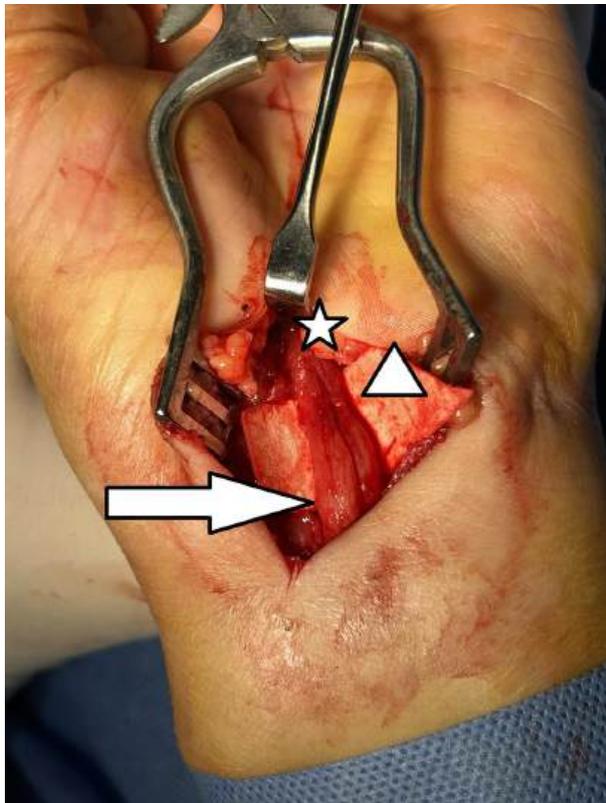


Fig. 1. High bifurcation of the median nerve (arrow – bifurcated median nerve; triangle – hourglass deformity of the median nerve; asterisk – "loop" of the median nerve)

Discussion

According to normal anatomy, the median nerve in the lower third of the forearm looks like a single trunk. In this form, it enters the carpal tunnel distally together with the flexor tendons of I-V fingers and, in the area of the distal edge of the flexor retinaculum, splits into six motor branches to the thenar muscles, two radial lumbrical muscles, and sensory branches to I-III fingers and the radial surface of the ring finger [4]. Most practicing surgeons are guided precisely by this normal anatomy of the median nerve during operations on the forearm and hand. However, upon closer examination of the anatomy of the nerve, many features can be noted that quite often affect the outcomes of surgical interventions. The scientific literature describes variants of the unusual structure and location of the branches of the median nerve in the area immediately adjacent to the carpal tunnel and in the area where it exits, including extraligamentous location of the recurrent motor branch (standard location), transligamentous, supraligamentous, and subligamentous locations; accessory recurrent motor branches; and the origin of the recurrent motor branch from the volar or volar-medial surface of the median nerve trunk, etc. [4, 5, 6]. Variants of bifurcation or even trifurcation of the median nerve at the level of the lower third of the forearm are also presented [7].

During surgery for carpal tunnel syndrome, we incidentally encountered a bifurcation of the median nerve in the lower third of the forearm and hand corresponding to a high bifurcation of the median nerve of group 3A according to the Lanz classification. This variant is characterized by bifurcation of the median nerve trunk proximal to the carpal tunnel, with or without a connecting branch, in the absence of a persistent median artery and lumbrical muscles originating in the carpal tunnel region [8]. High bifurcation of the median nerve was first described in scientific medical literature by I. Kessler [9].

The clinical picture in the patient described above did not differ from that observed in many other patients we operated on with carpal tunnel syndrome. Therefore, it is practically impossible to suspect the presence of high bifurcation of the median nerve in advance. In rare cases of persistent median artery thrombosis, which sometimes occurs with bifurcation of the median nerve, the clinical picture of carpal tunnel syndrome may be altered and include sudden numbness and paresthesia in the fingers innervated by the median nerve, as well as pain and swelling in the volar surface of the wrist joint [10, 11].

Another important feature of the abnormal anatomical structure of the median nerve is that the two branches of the nerve can run in separate cylindrical canals formed by the fibers of the flexor retinaculum [1]. Therefore, during operative or conservative treatment it is necessary to influence both canals.

Conclusion

We describe a case of unusual anatomical structure of the median nerve in the lower third of the forearm and carpal tunnel, specifically a high bifurcation of the median nerve. It is necessary to

be aware of the existence of such an anomaly in order to avoid negative treatment outcomes. In the case of traumatic complete anatomical injury to the median nerve, one should make sure that this structural anomaly is absent, and if there is a bifurcation of the nerve, an extended revision should be performed and a suture should be placed on both damaged branches.

During surgical treatment of carpal tunnel syndrome, it is advisable to check that the bifurcated nerve runs through a single canal, rather than two separate canals. In the latter case, it is necessary to influence both canals during operative or conservative treatment.

Disclosure

Conflict of interest statement

The authors declare that there is no conflict of interest.

Funding

The research had no sponsor support.

Informed consent

The patient gave written consent for this report to be published and for information about the nature of her illness to be posted online.

References

1. Kamat AS, Woon K. Unusually high bifurcation of the median nerve resulting in two separate cylindrical compartments within the transverse carpal ligament: a case report. *International Journal of Anatomical Variations*. 2014;7:24-26. <https://www.pulsus.com/scholarly-articles/unusually-high-bifurcation-of-the-median-nerve-resulting-in-two-separate-cylindrical-compartments-within-the-transverse.pdf>
2. Goloborod'ko S. High bifurcation of the median nerve at carpal tunnel syndrome: case study. *Orthopaedics, Traumatology and Prosthetics*. 2020;(2):89-91. doi: 10.15674/0030-59872020289-91
3. Lalonde D, Martin A. Epinephrine in local anesthesia in finger and hand surgery: the case for wide-awake anesthesia. *J Am Acad Orthop Surg*. 2013 Aug;21(8):443-7. doi: 10.5435/JAAOS-21-08-443
4. Demircay E, Civelek E, Cansever T, Kabatas S, Yilmaz C. Anatomic variations of the median nerve in the carpal tunnel: a brief review of the literature. *Turk Neurosurg*. 2011;21(3):388-96. doi: 10.5137/1019-5149.JTN.3073-10.1
5. Bakhshi Kashi M, Behnejad M, Loghman AH, Zamani-Badi T, Nikzad H. Study of median nerve variations and its clinical implications at the distal art of upper limb: a review. *Anatomical Sciences Journal*. 2022;19(1):1-10. <http://anatomyjournal.ir/article-1-189-en.html>
6. Osiak K, Elnazir P, Walocha JA, Pasternak A. Carpal tunnel syndrome: state-of-the-art review. *Folia Morphol*. 2022;81(4):851-862. doi: 10.5603/FM.a2021.0121
7. Duyum M, Yilmaz O, Ulasli AM, Asal N, Kosar U. Coexistence of trifid and bifid median nerve in a patient with bilateral carpal tunnel syndrome. *Turk Neurosurg*. 2013;23(5):685-7. doi: 10.5137/1019-5149.JTN.6565-12.0
8. Neumann M, Suchomlinov A. Pilot Cadaveric Study of Anatomical Variations of the Median Nerve at the Wrist in the Lithuanian Population. *Cureus*. 2023 May 21;15(5):e39282. doi: 10.7759/cureus.39282
9. Kessler I. Unusual distribution of the median nerve at the wrist. A case report. *Clin Orthop Rel Res*. 1969 Nov-Dec;67:124-126. doi: 10.1097/00003086-196911000-00019
10. Akgun AS, Ertan G, Ulus S. Acute carpal tunnel syndrome caused by thrombosed persistent median artery associated with bifurcated median nerve in a pregnant woman. *BMJ Case Rep*. 2017 Sep 19;2017:bcr2017221446. doi: 10.1136/bcr-2017-221446
11. Miyashima Y, Gotani H, Okamoto K, Yagi H, Tanaka Y. Median nerve neuropathy caused by persistent median artery thrombosis. *Plast Reconstr Surg Glob Open*. 2023 Apr 10;11(4):e4916. doi: 10.1097/GOX.0000000000004916

Біфуркація серединного нерва: опис випадку

І.Б. Гогінава ¹, Г. Мурвелашвілі ², М.А. Шавгулідзе ³, М.В. Рєзуненко ⁴, Г.Л. Гюргідзе ⁵

¹ Відділення хірургії переломів таза, Медичний центр Західної Грузії, Кутаїсі, Грузія

² Відділення ортопедії та травматології, Медичний центр «Медіна», Батумі, Грузія

³ Клініки Верхньої Франконії, Мюнхберг, Німеччина

⁴ Відділення травматології та ортопедії, Медичний центр Західної Грузії, Кутаїсі, Грузія

⁵ Неврологічне відділення, Медичний центр Західної Грузії, Кутаїсі, Грузія

Надійшла до редакції 03.10.2025
Прийнята до публікації 27.10.2025

Адреса для листування:

Irakli Borisovich Goginava,
Department of Pelvic Fractures
Surgery, West Georgia Medical
Center, Javakishvili str., 83a,
Kutaisi, 4600, Georgia, e-mail:
igoginava@evex.ge

Описано рідкісний випадок анормальної анатомічної будови серединного нерва у хворої із синдромом каналу зап'ястка – висока біфуркація серединного нерва.

Жінка, 67 років, звернулася зі скаргами на періодичні інтенсивні болі й оніміння 1–3-го пальців лівої кисті. Під час проведення клінічного обстеження позитивними виявилися прямий і зворотний тести Фалена, Гоффмана–Тінеля з місця проекції серединного нерва на передпліччі, тест постуральної провокації, пальцевої компресії, «манжетки». Тест Аллена негативний. Відсутня атрофія м'язів тенара, сила долонного відведення 1-го пальця порівнянна із такою на правій кисті. Чутливість у пальцях не змінена. На підставі анамнезу та результатів клінічного обстеження встановлено діагноз «ідіопатичний синдром каналу зап'ястка лівої кисті». Виконано ретинакулотомію утримувача згиначів, мезоепіневроліз серединного нерва, теносиновектомію. Виявлено, що починаючи з проксимального краю рани, стовбур серединного нерва розщеплений на дві частини, які в ділянці виходу з каналу зап'ястка з'єднуються знову, утворюючи «петлю». Відзначено також наявність деформації за типом «пісочного годинника» на обох гілках серединного нерва. Радіальна гілка розщепленого нерва візуально була товщою за ульнарну. Після операції болі й оніміння 1–3-го пальців повністю зникли.

Біфуркацію серединного нерва надзвичайно важко виявити до операції. У разі клініки травматичного повного анатомічного ушкодження серединного нерва слід переконатися у відсутності цієї аномалії будови, а за наявності біфуркації нерва виконати розширену ревізію та накласти шов на обидві ушкоджені гілки.

Під час хірургічного лікування синдрому каналу зап'ястка доцільно переконатися в тому, що роздвоєний нерв проходить в одному, а не в двох окремих каналах. В останньому випадку необхідно впливати на обидва канали під час оперативного або консервативного лікування.

Ключові слова: аномальна анатомічна будова; висока біфуркація серединного нерва; синдром каналу зап'ястка