



Травма

www.mif-ua.com



Том 27, № 4, 2026

ЦЕНТР ЛІКУВАННЯ СКОЛІОЗУ



AKSIME D
КЛІНІКА СУЧАСНОЇ НЕВРОЛОГІЇ

(044) 390 0055
AKSIMED.UA

Ліцензія МОЗ України: серія АГ № 599054 від 21.11.2011 р.

САМОЛІКУВАННЯ МОЖЕ БУТИ ШКІДЛИВИМ ДЛЯ ВАШОГО ЗДОРОВ'Я

Міністерство охорони здоров'я України
Донецький національний медичний університет
Науково-дослідний інститут травматології та ортопедії
Асоціація ортопедів-травматологів України

Ministry of Health Service of Ukraine
Donetsk National Medical University
Research and Development Institute of Traumatology and Orthopedics
Association of Traumatologist and Orthopedists of Ukraine

Травма

TRAUMA

Спеціалізований рецензований науково-практичний журнал
Заснований у січні 2000 року
Періодичність виходу 6 разів на рік

Том 27, № 4, 2026

Specialized reviewed practical scientific journal
Founded in January 2000
Periodicity 6 numbers per year

Volume 27, № 4, 2026

Включений в наукометричні і спеціалізовані бази даних

Scopus,

НБУ ім. В.І. Вернадського, «Україніка наукова», «Наукова періодика України»,
Ulrichsweb Global Serials Directory, CrossRef, WorldCat, Google Scholar, ICMJE, SHERPA/RoMEO, BASE,
NLM-catalog, NLM-Locator Plus, EBSCO, OUCI



Травма

Trauma

Спеціалізований рецензований
науково-практичний журнал

Том 27, № 4, 2026

ISSN 1608-1706 (print), ISSN 2307-1397 (online)

DOI: 10.22141/1608-1706

УДК: 616-001



Засновник журналу:

Донецький національний медичний
університет

Адреса редакції:

E-mail: editor@trauma-journal.com

(Тема: До редакції журналу «Травма»)

<https://trauma-journal.com>

Журнал внесено до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук. Наказ МОН України від 26.11.2020 № 1471. Категорія Б.

Рекомендовано до друку та до поширення через мережу Інтернет вченою радою Донецького національного медичного університету, протокол № 4 від 27.08.2026 р.

Реєстрація: ідентифікатор медіа R30-05649. Рішення Національної ради України з питань телебачення та радіомовлення № 3279 від 05.12.2024. Адреса, за якою здійснюється редакційний контроль: Україна, м. Кропивницький, вул. Ю. Коваленка, буд. 4а

Українською та англійською мовами

Формат: 60x84/8. Ум. друк. арк. 17,21.

Тираж 8000 прим. Зам. 2026-trauma-133.

Видавець Заславський О.Ю.

oleksandrzaslavsky@gmail.com

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 2128 від 13.05.2005

Друк: ТОВ «Ландпрес»

Головний редактор

Климовицький Федір Володимирович

(Лиман, Україна)

Заступник головного редактора

Чорний Володимир Сергійович

(Київ, Україна)

Відповідальний секретар

Гузовська М.Д. (Краматорськ, Україна)

Редакційна колегія

Бондаренко С.Є. (Харків, Україна),

Бур'янов О.А. (Київ, Україна),

Головач І.Ю. (Київ, Україна),

Зазірний І.М. (Київ, Україна),

Страфун С.С. (Київ, Україна),

Тяжелов О.А. (Харків, Україна),

Філіпенко В.А. (Харків, Україна),

Чернишова О.Є. (Краматорськ, Україна),

Hagen Schmal (Фрайбург-ім-Брайсгау,

Німеччина),

Robert Smigielski (Варшава, Польща),

Francesco Benazzo (Павія, Італія)

Редакційна рада

Анкін М.Л. (Київ, Україна),

Головаха М.Л. (Запоріжжя, Україна),

Гур'єв С.О. (Київ, Україна),

Король С.О. (Київ, Україна),

Левицький А.Ф. (Київ, Україна),

Піонтковський В.К. (Рівне, Україна),

Сулима В.С. (Івано-Франківськ, Україна),

Сухін Ю.В. (Одеса, Україна),

Філь А.Ю. (Львів, Україна),

Ярмолюк Ю.О. (Київ, Україна)

Редакція не завжди поділяє думку автора публікації. Відповідальність за вірогідність фактів, власних імен та іншої інформації, використаної в публікації, несе автор. Передрук та інше відтворення в якій-небудь формі в цілому або частково статей, ілюстрацій або інших матеріалів дозволені тільки при попередній письмовій згоді редакції та з обов'язковим посиланням на джерело. Усі права захищені.

© Донецький національний медичний університет, 2026
© НДІ травматології та ортопедії Донецького національного медичного університету, 2026
© Заславський О.Ю., 2026

Травма

Trauma

Specialized reviewed
practical scientific journal

Volume 27, № 4, 2026

ISSN 1608-1706 (print), ISSN 2307-1397 (online)

DOI: 10.22141/1608-1706

UDC: 616-001



Founder:

**Donetsk National Medical
University**

Editorial office address:

E-mail: editor@trauma-journal.com

(Subject: Editorial board of the «Trauma» Journal)

<https://trauma-journal.com>

The journal is included in the list of scientific periodicals of Ukraine, which can publish the results of dissertations on competition of the scientific degrees of doctor and candidate of sciences. Order of the MES of Ukraine dated 26.11.2020 No. 1471. Category B

Recommended for publication and distribution over the Internet by the scientific council of the Donetsk National Medical University, protocol No. 4 dated 27.08.2026

Registration: Media identifier R30-05649. Decision of the National Council of Ukraine on Television and Radio Broadcasting No. 3279 dated December 5, 2024. The address at which the editorial control is carried out: Ukraine, Kropyvniitskiy, Yu. Kovalenko st., 4a

In Ukrainian and English

Folio: 60x84/8. Printer's sheet 17,21.

Circulation 8000. Order 2026-trauma-133.

Publisher Zaslavsky O.Yu.

oleksandrzaslavsky@gmail.com

Publishing entity certificate

ДК № 2128 dated 13.05.2005

Print: Landpress Ltd.

Editor-in-Chief

Klymovytsky Fedir

(Lyman, Ukraine)

Deputy Editor-in-Chief

Chorny Volodymyr

(Kyiv, Ukraine)

Executive Secretary

Huzovska Maria (Kramatorsk, Ukraine)

Editorial Board

Bondarenko S.Y. (Kharkiv, Ukraine),

Burianov O.A. (Kyiv, Ukraine),

Golovach I.Yu. (Kyiv, Ukraine),

Zazirny I.M. (Kyiv, Ukraine),

Strafun S.S. (Kyiv, Ukraine),

Tyazhelov Olexiy (Kharkiv, Ukraine),

Filipenko V.A. (Kharkiv, Ukraine),

Chernyshova O.Y. (Kramatorsk, Ukraine),

Hagen Schmal (Freiburg im Breisgau, Germany),

Robert Smigielski (Warszawa, Poland),

Francesco Benazzo (Pavia, Italia)

Editorial Council

Ankin M.L. (Kyiv, Ukraine),

Golovaha M.L. (Zaporizhzhia, Ukraine),

Guryev S.O. (Kyiv, Ukraine),

Korol S.O. (Kyiv, Ukraine),

Levitsky A.F. (Kyiv, Ukraine),

Piontkovsky V.K. (Rivne, Ukraine),

Sulyma V.S. (Ivano-Frankivsk, Ukraine),

Sukhin Y.V. (Odesa, Ukraine),

Fil A.Y. (Lviv, Ukraine),

Yarmoliuk Y.O. (Kyiv, Ukraine)

The editorial board not always shares the author's opinion. The author is responsible for the significance of the facts, proper names and other information used in the paper. No part of this publication, pictures or other materials may be reproduced or transmitted in any form or by any means without permission in writing form with reference to the original. All rights reserved.

© Donetsk National Medical University, 2026
© Research and Development Institute of Traumatology and Orthopedics of Donetsk National Medical University, 2026
© Zaslavsky O.Yu., 2026

Зміст

Оригінальні дослідження

Лоскутов О.Є., Олійник О.Є., Синегубов Д.А. Комбінована хондропротекторна терапія в лікуванні дегенеративно-дистрофічних захворювань суглобів	9
Кузьмов Р.А., Луцишин В.Г., Браніцький О.Ю., Собко В.С., Майко В.М., Шеремета Р.О. Особливості комп'ютерно-томографічних показників у пацієнтів із масивними дефектами кінцівок після мінно-вибухових уражень за різних типів реконструктивної пластики....	15
Камінська М.О., Дігтяр В.А., Яресько О.В. Біомеханічне обґрунтування місця проведення пластини при хірургічній корекції лікоподібної деформації грудної клітки	24
Труфанов І.І. Іпсилатеральні переломи кісток таза та стегнової кістки (флотуюче стегно) при бойовій травмі: клінічний досвід лікування у військовому госпіталі	31
Козін О.А., Нестеренко М.М., Павленко С.М. Комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану системи фіксації перелому проксимального відділу стегнової кістки.....	37
Тимошенко С.В. Результати хірургічного лікування ризартрозу	47
Ibrahim Barsoum Anis, Wael Samir Abd El Mageed, Sherif Mostafa El Sayed, Zeiad Mohamed Zakaria, Mohamed El Sayed Awad Вплив надлишкової та недостатньої товщини борозни блока стегнової кістки на функціональні результати після тотального ендопротезування колінного суглоба	52
Страфун С.С., Богдан С.В., Страфун О.С., Сергієнко Р.О. Результати шва сухожильків ротаторної манжети плеча у хворих з різними стадіями ротаторної артропатії плечового суглоба (ретроспективне дослідження)	59
Гринь В.Г., Максименко О.С., Броварник Я.О., Драбовський В.С., Давиденко С.В., Пілюгін А.В., Тарасенко Я.А., Устенко Р.Л., Гринь М.В., Годуадзе Г.Н., Чіп Є.Є., Кононенко С.В., Paulsen F. Архітектоніка губчастої речовини п'яткової кістки: пілотне дослідження	65

Contents

Original Researches

O.Ye. Loskutov, O.Ye. Oliynyk, D.A. Syniehubov Combined chondroprotective therapy in the treatment of degenerative-dystrophic joint diseases.....	9
R.A. Kuzmov, V.H. Lutsyshyn, O.Yu. Branitskyi, V.S. Sobko, V.M. Maiko, R.O. Sheremeta Features of computed tomography indicators in patients with massive limb defects after mine-blast injuries with different types of reconstructive plastic surgery	15
M.O. Kaminska, V.A. Dihtiar, O.V. Yaresko Biomechanical analysis of bar placement level during surgical correction of pectus excavatum	24
I.I. Trufanov Ipsilateral pelvic and femoral fractures (floating hip) in combat trauma: clinical experience from a military hospital.....	31
O.A. Kozin, M.M. Nesterenko, S.M. Pavlenko Computer modeling of the stress-strain state of the proximal femoral fracture fixation system	37
S.V. Tymoshenko Outcomes of rhizarthrosis surgical treatment	47
Ibrahim Barsoum Anis, Wael Samir Abd El Mageed, Sherif Mostafa El Sayed, Zeiad Mohamed Zakaria, Mohamed El Sayed Awad Effect of trochlear overstuffing and understuffing on functional outcomes after total knee arthroplasty	52
S.S. Strafun, S.V. Bohdan, O.S. Strafun, R.O. Sergienko Results of rotator cuff tendon repair in patients with different stages of rotator cuff arthropathy (retrospective study)	59
V.H. Hryn, O.S. Maksymenko, Ya.O. Brovarnyk, V.S. Drabovskiy, S.V. Davydenko A.V. Piliuhin, Ya.A. Tarasenko, R.L. Ustenko, M.V. Hryn, H.N. Hoduadze, Ye.E. Chip, S.V. Kononenko, F. Paulsen Trabecular architectonic of the calcaneus: a pilot study	65



*“Аксімед”
завжди
попереду!*

НА БАЗІ КЛІНІКИ “АКСІМЕД” ФУНКЦІОНУЄ

ЦЕНТР ПРОБЛЕМ СНУ

ЕФЕКТИВНА ДІАГНОСТИКА ТА ЛІКУВАННЯ:

- порушень дихання уві сні (нічне апное);
- усіх видів безсоння;
- синдрому неспокійних ніг.

ПРОВДИМО НАЙСУЧАСНІШУ
ПОЛІСОМНОГРАФІЮ



ЛІКУВАННЯ
ХРАПУ



AKSIMED.UA • 044 390 00 55

О. СІДЕЛКОВСЬКИЙ

ЮРИДИЧНА ГІГІЄНА МЕДИЧНИХ ПРАЦІВНИКІВ

ПРОЧИТАЙ
ТА ПРАЦЮЙ
СПОКІЙНО

КЛІНІКА СУЧАСНОЇ НЕВРОЛОГІЇ "АКСІМЕД"

Посібник містить вкрай необхідну інформацію для кожного медичного працівника незалежно від напрямку його діяльності. Книга буде надійним помічником у разі виникнення конфліктних або непередбачуваних ситуацій у щоденній практичній діяльності.

AKSIMED.UA



(044) 390-0055

Фіщенко В.О., Гуменюк О.О., Фіщенко О.В., Гуменюк Р.С. Проспективна клінічна валідація алгоритму вибору методу комплексного фізіотерапевтичного лікування при остеоартриті плечового суглоба 73	V.O. Fishchenko, O.O. Humeniuk, O.V. Fishchenko, R.S. Humeniuk Prospective clinical validation of an algorithm for selecting a comprehensive physiotherapeutic treatment modality in patients with shoulder osteoarthritis 73
Бородюк Д.В., Зазірний І.М., Анкін М.Л., Ладика В.О. Хірургічне лікування вогнепальних переломів стегнової кістки: роль маркерів запалення 80	D.V. Borodiuk, I.M. Zazirnyi, M.L. Ankin, V.O. Ladyka Surgical treatment of gunshot femoral fractures: the role of inflammation markers..... 80
Махник В.В., Жаріков С.О., Кліманський Р.П., Собченко Д.А. Діагностика закритої травми живота при політравмі: порівняння методів 89	V.V. Makhnyk, S.O. Zharikov, R.P. Klimanskyi, D.A. Sobchenko Diagnosis of closed abdominal trauma in polytrauma: comparison of methods 89
Нехлопочин О.С., Вербов В.В., Чешук Є.В., Фортуненко В.І. Морфофункціональна стратифікація ушкоджень типу А груднопоперекового переходу: КТ-морфометричні морфотипи та алгоритм вибору тактики лікування 99	O.S. Nekhlopochyn, V.V. Verbov, Ye.V. Cheshuk, V.I. Fortunenko Morphofunctional stratification of type A injuries of the thoracolumbar junction: CT morphometric morphotypes and an algorithm for treatment decision-making..... 99
Гур'єв С.О., Гаріян С.В., Кушнір В.А., Цибульський О.С. Дефекти довгих кісток у постраждалих із сучасною бойовою травмою. Ризикорієнтовне визначення потреби в пластиці м'яких тканин залежно від розміру та локалізації кісткового дефекту 113	S.O. Guryev, S.V. Hariyan, V.A. Kushnir, O.S. Tsybulsky Long bone defects in victims with modern combat trauma. Risk-based determination of the need for soft tissue plastic surgery depending on the size and location of the bone defect 113
Петрушенко В.В., Чорна В.В., Ордатій Н.М., Ордатій А.В. Черепно-мозкова травма в умовах сучасних викликів: епідеміологія, механізми ушкодження, гендерні відмінності та довгострокові наслідки (систематичний огляд)..... 122	V.V. Petrushenko, V.V. Chorna, N.M. Ordatii, A.V. Ordatii Traumatic brain injury in the context of contemporary challenges: epidemiology, mechanisms of injury, gender differences, and long-term consequences (a systematic review)..... 122
Купрій В.О., Бур'янов О.А., Понятовський В.А., Дубок В.А., Кусяк А.П., Насека Ю.М., Чорний В.С. Біоплівкова інфекція ортопедичних імплантатів: діагностика, лікування та профілактика 134	V.O. Kuprii, O.A. Burianov, V.A. Ponyatovskyi, V.A. Dubok, A.P. Kussyak, Yu.M. Nasieka, V.S. Chorny Biofilm infection of orthopedic implants: diagnosis, treatment, and prevention 134
Хвисюк М.І., Хвисюк О.М. Витоки української вертебрології (харківська школа)..... 145	M.I. Khvysyuk, O.M. Khvysyuk Origins of Ukrainian vertebrology (Kharkiv school)..... 145

Вистачає
на 2 місяці^{1,2}



глюкозаміну сульфату 500 мг
хондроїтину сульфату натрію 400 мг
1 таб. 3 р/добу - 3 тижні, далі по
1 таб. 2 р/добу, протягом 3 місяців

РЕМІСІЯ³



калію диклофенаку 50 мг
глюкозаміну сульфату 500 мг
хондроїтину сульфату натрію 400 мг
1 таб. 3 р/добу

ЗАГОСТРЕННЯ³

**Комбінація глюкозаміну сульфату
і хондроїтину сульфату натрію¹**

**Знеболення
з хондропротекцією³**



Мовекс® Комфорт¹/ Мовекс® Актив³

- Уповільнює процеси пошкодження хрящової тканини
- Чинить протизапальну, анальгезуючу (знеболюючу) дію
- Стимулює регенерацію хрящової тканини
- Сприяє відновленню функції суглобів

Р.П. МОЗ України № UA/9817/01/01; № UA/10205/01/01. 1. Інструкція для медичного застосування лікарського засобу Мовекс® Комфорт. 2. При умові прийому по 1 таблетці 2 рази на добу. 3. Інструкція для медичного застосування лікарського засобу Мовекс® Актив. За підсумками конкурсу торгових марок «Фаворити Успіху» 2014 року Мовекс® - Фаворит Успішних людей у категорії «Препарат для лікування захворювань суглобів», 2015 року - Фаворит Успішних людей у категорії «Препарат для лікування захворювань суглобів», 2016 Абсолютний Фаворит в категорії «Препарат для лікування захворювань суглобів», 2017 Фаворит Експертів в категорії «Препарат для лікування захворювань суглобів», 2018 Абсолютний Фаворит в категорії «Препарат для лікування захворювань суглобів». Мовекс Актив переможець конкурсу «Панацея 2017, 2018, 2019, 2020» в номінації «Препарат року», Мовекс Актив переможець конкурсу «Панацея 2021» в номінації «Рецептурний препарат року» та Мовекс Комфорт переможець конкурсу «Панацея 2021» в номінації «Безрецептурний препарат року», Мовекс Актив переможець конкурсу «Панацея 2023», «Панацея 2024» та «Панацея 2025» в номінації «Препарат року. Серед рецептурних лікарських засобів», <http://panacea.ua/>. Інформація надана в скороченому вигляді. Повна інформація про застосування та повний перелік протипоказань і побічних реакцій містяться в інструкції для медичного застосування лікарського засобу. Інформація для медичних та фармацевтичних працівників. Для розповсюдження на спеціалізованих семінарах, конференціях, симпозиумах з медичної тематики.

ТОВ «Мові Хелс» вул. Промислова, 3А, Обухівський р-н, Київська обл., с. Хотів, Україна, 08171. Тел.: (044) 500-71-40
www.movi-health.com.ua

УДК 616.72-002.16-007.2:615.015.2:615.27:615.35

Лоскутов О.Є., Олійник О.Є., Синегубов Д.А.
Дніпровський державний медичний університет, м. Дніпро, Україна

Комбінована хондропротекторна терапія в лікуванні дегенеративно-дистрофічних захворювань суглобів

Резюме. Остеоартрит характеризується болем у суглобах і скутістю, що призводить до функціональних порушень, втрати активності й зниження якості життя. Лікування остеоартриту повинно бути спрямоване на запобігання структурному руйнуванню суглобового хряща. Симптоматичні препарати уповільненої дії (SYSADOA), до яких належать хондроїтину сульфат та глюкозаміну сульфат, спрямовані на уповільнення перебігу остеоартриту, стабілізацію і регресування наявних змін у суглобових тканинах. Даними міжнародних досліджень підтверджено ефективність застосування комбінації хондроїтину сульфату і глюкозаміну сульфату при лікуванні остеоартриту, що забезпечує тривале полегшення болю та поліпшення функцій суглоба.

Ключові слова: остеоартрит; біль у суглобах; SYSADOA; хондроїтину сульфат; глюкозаміну сульфат; огляд

На сьогодні остеоартрити (ОА) різної локалізації становлять одну з найпоширеніших груп захворювань у населення та характеризуються болем у суглобах і скутістю, що призводить до функціональних порушень, втрати активності й зниження якості життя [1, 24]. За даними літератури, на ОА хворіють до 10–12 % жителів планети. Остеоартрит розвивається внаслідок дегенеративних змін суглобового хряща та прилеглих тканин, що найчастіше зумовлено віковими процесами, травматичними uszkodженнями, надмірним механічним навантаженням на суглоби та ожирінням [31, 32]. Сучасні погляди на етіологію ОА враховують, крім механічних, різні біохімічні і генетичні фактори, а також молекулярні і ферментативні сигнальні каскади зворотного зв'язку, що врешті-решт призводить до розвитку і прогресування захворювання [3].

Лікування остеоартриту залежить від клінічного перебігу та функціональних порушень, які впливають на якість життя та зумовлюють високий рівень інвалідності серед пацієнтів. Так, наприклад, остеоартрит кульшового й колінного суглобів разом є одинадцятим за значущістю фактором, що сприяє інвалідності у світі: кількість років життя, прожитих з інвалідністю, пов'язаною

з ОА, зросла на 64 % з 1990 по 2010 рік, досягнувши 17 мільйонів [15]. Консервативне лікування дає високу частку позитивних результатів на початковому та середньому рівні розвитку ОА. Також на цих стадіях ефективними є методи малоінвазивного хірургічного лікування. Тяжкий перебіг ОА зумовлює визначення основних показань до ендопротезування суглобів. При цьому консервативне лікування тяжкого остеоартриту часто має паліативний характер з метою зниження больового синдрому та запальних проявів загострення.

Сучасні погляди на консервативне лікування ОА відображають комплексне використання медикаментозних та немедикаментозних методів з метою зменшення симптомів та уповільнення прогресування захворювання, що може зменшити вплив ОА на функціональні можливості пацієнта, а також на якість життя [1, 7, 8, 24]. І якщо раніше метою лікування ОА було підтримати або збільшити рухомість суглобів, зменшити функціональні обмеження та біль у суглобах, підвищити якість життя, то на сьогодні стратегія лікування спрямована на запобігання структурному руйнуванню суглобового хряща [9]. При цьому використовується мультимодальний та пацієнт-орієнтований підхід.

© «Травма» / «Trauma» («Травма»), 2026

© Видавець Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2026

Для кореспонденції: Лоскутов Олександр Євгенович, академік НАМН України, доктор медичних наук, професор, завідувач кафедри травматології та ортопедії, Дніпровський державний медичний університет, вул. Володимира Вернадського, 9, м. Дніпро, 49044, Україна; e-mail: LoskutovAE@ukr.net

For correspondence: Oleksandr Loskutov, Academician of NAMSU, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Traumatology and Orthopedics, Dnipro State Medical University, Volodymyr Vernadsky st., 9, Dnipro, 49044, Ukraine; e-mail: LoskutovAE@ukr.net

Full list of authors information is available at the end of the article.

До схеми комплексного лікування остеоартриту, спрямованого на уповільнення перебігу захворювання, стабілізацію і регресування наявних змін у суглобових тканинах, додаються хондропротектори, які входять до групи **симптоматичних препаратів уповільненої дії** (SYSADOA, від англ. Symptomatic Slow Acting Drugs for Osteoarthritis). У них практично відсутні побічні ефекти, при цьому симптоматичний ефект можна порівняти з нестероїдними протизапальними препаратами (НПЗП), що дозволяє навіть знизити їх дозу, ефект зберігається після закінчення лікування. Прийом хондропротекторних препаратів може поєднуватися з прийомом анагетиків і НПЗП [13, 33, 34]. Препарати цієї групи були включені в алгоритм лікування болю і відновлення функціональної активності ураженого суглоба, вони позитивно впливають на метаболічні процеси в хрящовій тканині і потенційно здатні уповільнювати прогресування ОА [3, 21, 25].

До групи SYSADOA входять препарати, які містять хондроїтину сульфат, глюкозаміну сульфат. У міжнародних рекомендаціях EULAR, ESCEO, OARSi тощо [6, 8, 9, 11, 12, 19, 25] визначено, що для лікування остеоартриту використовують як монопрепарати, так і комбінацію хондроїтину сульфату і глюкозаміну сульфату. Застосування комбінації хондроїтину та глюкозаміну описане на початку 90-х рр. XX століття. В основу цієї ідеї було покладено уявлення, що механізми пригнічення катаболічних і активації анаболічних процесів у хрящі, а також їх вплив на запалення відрізняються для глюкозаміну та хондроїтину сульфату, тому їх комбіноване застосування є перспективним напрямком.

В алгоритмі ESCEO рекомендується застосовувати саме сульфатні сполуки глюкозаміну та хондроїтину та їх комбінації [8, 25]. Актуальний алгоритм лікування ОА, затверджений ESCEO, наведено на рис. 1.

В експериментальних та клінічних дослідженнях показано, що при поєднаному застосуванні хондроїтину сульфату та глюкозаміну сульфату, які входять до складу комбінованих препаратів-хондропротекторів, спостерігається найбільший ефект [18, 20, 35, 27]. Дані рандомізованих контрольованих досліджень (GAIT, 2006; MOVES, 2016 тощо) підтверджують високу ефективність та синергію саме лікування з використанням комбінації хондроїтину та глюкозаміну сульфату в плані зменшення болю порівняно з монотерапією хондроїтином або глюкозаміном [30]. Дослідження MOVES (Multicentre Osteoarthritis interVention trial with SYSADOA) було проведено в п'яти країнах Європи; комбіновану терапію глюкозаміну сульфатом та хондроїтину сульфатом отримували 264 пацієнти (229 жінок) тривалістю 6 місяців. Дослідники довели, що комбінація хондроїтину сульфату та глюкозаміну сульфату має повільний початок дії та забезпечує тривале полегшення болю та поліпшення функцій суглоба при ОА. Дослідження продемонструвало протизапальну дію як глюкозаміну сульфату, так і хондроїтину сульфату [20]. Важливі висновки щодо ефективності комбінованого застосування хондроїтину сульфату та глюкозаміну сульфату були зроблені й у ході масштабного метааналізу [4, 10].

Комбіноване застосування глюкозаміну та хондроїтину асоціюється з позитивною динамікою показників якості життя, зокрема фізичного її компонента. Це пояснюється не лише зменшенням болю, а й стабілізацією функціональних можливостей суглоба при тривалому застосуванні [10, 23]. Оскільки глюкозамін і хондроїтин є структурними компонентами позаклітинного матриксу гіалінового хряща, досить закономірним є їх використання у клінічній практиці для лікування запально-дегенеративних захворювань суглобів. Сучасні уявлення щодо особливостей фармакодинаміки передбачають, що їхній терапевтичний вплив за ОА реалізується через комплекс механізмів, що включають модуляцію запальної відповіді, інгібування катаболічних процесів деградації хряща та стимуляцію анаболічної активності хондроцитів [30]. Так, в роботі E.D. Kantor et al. (2021) доведена протизапальна дія комбінації глюкозаміну сульфату й хондроїтину сульфату, при цьому рівень С-реактивного білка знижася на 23 % [21].

Проведення інструментальних досліджень у пацієнтів з ОА, які приймали комбінацію глюкозаміну та хондроїтину протягом тривалого часу, виявило значне зменшення втрати об'єму хряща в колінному суглобі [26]. Інша група авторів показала, що прийом комбінації глюкозаміну сульфату та хондроїтину сульфату протягом 24 місяців вірогідно уповільнює втрату об'єму суглобового хряща за даними МРТ-дослідження колінних суглобів. Ці дані підтверджують довгострокові захисні структурно-модифікуючі ефекти комбінованої хондропротекторної терапії [22].

Глюкозамін, ендогенний аміносахарид, що синтезується хондроцитами, є основним попередником глікозаміногліканів та інших протеогліканів, наявних у хрящі, і є частиною його позаклітинного матриксу [17]. Встановлено, що анаболічні та антикатаболічні властивості глюкозаміну сульфату є результатом активації фактора транскрипції NF-κB і, як наслідок, блокування ІЛ-1-залежної експресії матриксних металопротеїназ, індукцйбельної синтетази NO (iNOS), ЦОГ-2, що підтримують запалення та деструкцію в суглобовому хрящі та синовіальній оболонці [1]. Глюкозамін інгібує індуквану експресію гена інтерлейкіну-1, яка супроводжується інгібуванням транскрипційного фактора NF-κB хондроцитів та синовіоцитів, що призводить до одночасного зниження синтезу циклооксигенази-2, простагландину E2, оксиду азоту [2]. Таким чином, глюкозамін має виражену антиексудативну, протизапальну, антиоксидантну, антипротеолітичну дію. Глюкозамін продемонстрував здатність відновлювати міжклітинний матрикс хрящової тканини, захищаючи хрящ від пошкоджень, пов'язаних з порушеннями метаболізму міжклітинного матриксу [16], і виявляючи легку протизапальну активність [29].

Хондроїтин є основним компонентом міжклітинного матриксу, де він становить суттєву складову протеогліканів. Він стимулює анаболічні процеси в хрящовій тканині, бере участь у синтезі глікозаміногліканів, справляє стимулюючий вплив на хондроцити, стиму-

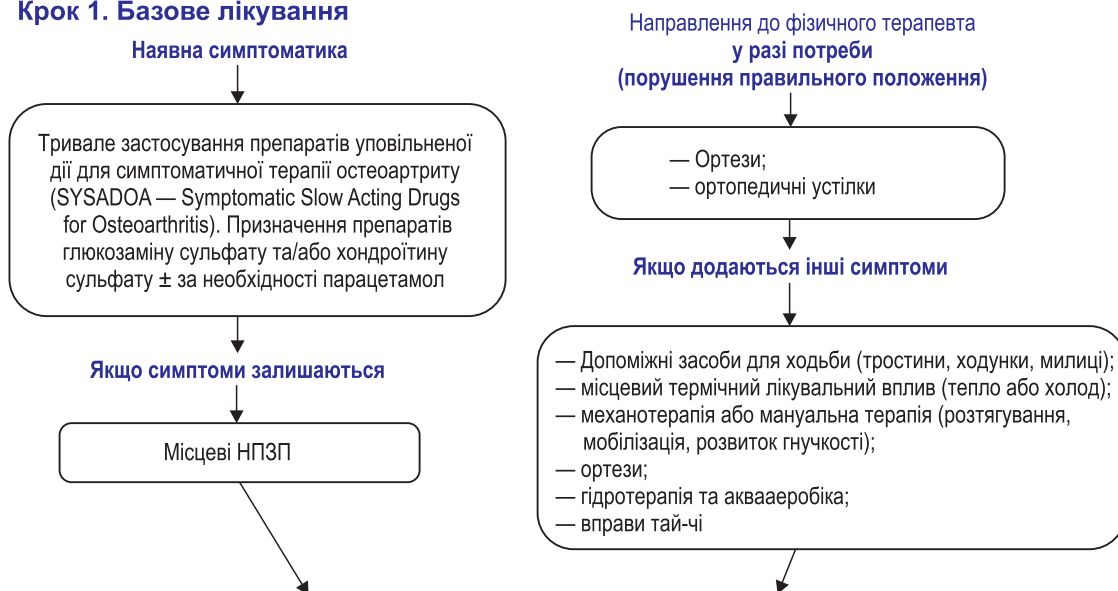
Базові та основні принципи

Настійно рекомендується поєднання методів лікування, включно з нефармакологічними та фармакологічними методами лікування.

Основні принципи:

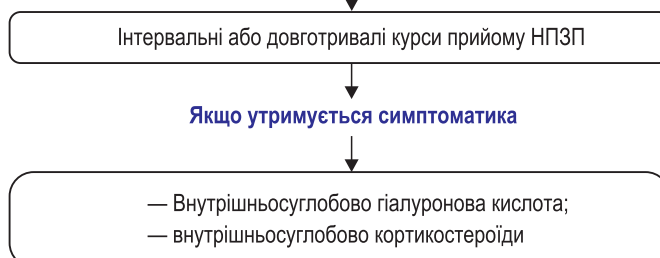
- інформування/освіта;
- у випадку зайвої ваги — її зниження;
- фізичні вправи (тобто аеробні, зміцнювальні або вправи з опором)

Крок 1. Базове лікування

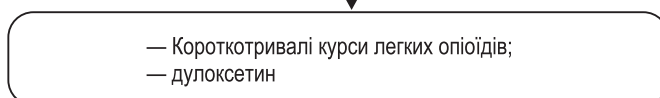


Крок 2. Розширене фармакологічне лікування пацієнтів зі стійкими симптомами

Якщо симптоми не зникають або посилюються



Крок 3. Остання спроба фармакологічної корекції



Крок 4. Лікування ОА на різних стадіях і хірургічне втручання

Якщо зберігаються виражені симптоми й істотно порушена якість життя



Рисунок 1. Алгоритм ESCEO лікування ОА колінного суглоба (в авторському перекладі) [8]

лює синтез гіалуронової кислоти та перешкоджає її руйнуванню, збільшує продукцію внутрішньосуглобової рідини, зменшує інтенсивність запалення. Застосування хондроїтину поліпшує функцію хондроцитів і синовіоцитів та асоціюється зі зниженням больового синдрому [28].

Знеболювальна та протизапальна дія хондроїтину сульфату і глюкозаміну сульфату реалізується не за рахунок пригнічення синтезу простагландинів, а шляхом пригнічення активності лізосомальних ферментів та інгібування супероксидних радикалів. Перевагою комбінації глюкозаміну сульфату та хондроїтину сульфату є синергійний механізм дії, який перевищує ефект монотерапії кожним компонентом окремо [2, 14].

До групи препаратів SYSADOA належить препарат **Мовекс® Комфорт**, кожна таблетка якого містить 500 мг глюкозаміну сульфату та хондроїтину сульфату в дозі 400 мг. Цей препарат використовується для тривалого прийому. Дозування призначається за рекомендованою схемою: перші 3 тижні — по 1 таблетці 3 рази на добу, потім — по 1 таблетці 2 рази на добу (табл. 1). Курс триває 3 місяці, після перерви 1 місяць курс повторюють.

Таблиця 1. Дозування препарату Мовекс® Комфорт при лікуванні остеоартриту

Час прийому	1–3-й тиждень прийому	4–12-й тиждень прийому
Ранок	1 таблетка	1 таблетка
Обід	1 таблетка	–
Вечір	1 таблетка	1 таблетка

Слід враховувати той факт, що, за даними літератури, симптоматичний ефект від застосування препаратів SYSADOA реалізується через 8–12 місяців прийому, тоді як реалізація структурно-модифікуючої дії починається не менше ніж через 2 роки лікування [5].

Дослідження показали, що поєднання SYSADOA та НПЗП забезпечує синергетичний ефект і може бути основним варіантом лікування для пацієнтів з помірним та сильним болем або під час загострень остеоартриту [21, 28]. У таких ситуаціях можна призначати

препарат **Мовекс® Актив**, який містить 500 мг глюкозаміну сульфату та 400 мг хондроїтину сульфату, а також диклофенак калію 50 мг. Калієва сіль диклофенаку дає швидкий знеболювальний ефект. Приймають препарат 3 рази на день протягом 10 днів, потім продовжують лікування препаратом **Мовекс® Комфорт**. Для зниження дозування диклофенаку калію і посилення структурно-модифікуючої дії можна призначити разом **Мовекс® Актив** та **Мовекс® Комфорт**. Залежно від причин виникнення болю, при ранковій скутості — ранішній прийом **Мовекс® Актив**, в обід та увечері — **Мовекс® Комфорт**. Якщо біль виникає після фізичного навантаження, **Мовекс® Актив** приймають увечері, а зранку та в обід — **Мовекс® Комфорт**.

Якщо причиною загострення є запалення і біль виникає зранку й супроводжується ранковою скутістю, призначають препарати таким чином: вранці **Мовекс® Актив** по 1 таблетці; в обід — **Мовекс® Комфорт** 1 таблетку; увечері приймають 1 таблетку **Мовекс® Комфорт**.

Якщо має місце біомеханічний біль, який виникає після фізичних навантажень у другий половині дня, то препарат призначають так: вранці 1 таблетку **Мовекс® Комфорт**; в обід — 1 таблетку **Мовекс® Комфорт**; ввечері — 1 таблетку **Мовекс® Актив** (табл. 2).

Таким чином, для терапії остеоартриту необхідне поєднання нефармакологічних та фармакологічних методів лікування. Оскільки може бути недостатньо основних нефармакологічних методів для лікування симптомів остеоартриту і часто спостерігається погане дотримання режиму лікування, необхідне використання багатокомпонентного, мультимодального підходу і при фармакологічних методах.

Комбіновані хондропротектори, які містять хондроїтину сульфат та глюкозаміну сульфат, довели ефективне зменшення інтенсивності болю, поліпшення функції суглобів, добру переносимість та мінімальні побічні ефекти. Також доведена висока ефективність поєднання глюкозаміну, хондроїтину та диклофенаку калію для швидкого зменшення больового синдрому, що важливо при лікуванні загострення остеоартрозу для поліпшення якості життя цієї категорії пацієнтів.

Таблиця 2. Схема поєднаного застосування Мовекс® Актив та Мовекс® Комфорт при загостренні остеоартриту

Час прийому	Препарат	Дозування
Причина: запалення, біль, який виникає зранку, може бути ранкова скутість		
Ранок	Мовекс® Актив	1 таблетка
Обід	Мовекс® Комфорт	1 таблетка
Вечір	Мовекс® Комфорт	1 таблетка
Причина: біомеханічний біль, який виникає після фізичних навантажень у другий половині дня		
Ранок	Мовекс® Комфорт	1 таблетка
Обід	Мовекс® Комфорт	1 таблетка
Вечір	Мовекс® Актив	1 таблетка

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів та власної фінансової зацікавленості при підготовці даної статті.

Список літератури

1. Барна О.М., Погребняк О.О. Ефективність комбінації глюкозаміну сульфату та хондроїтину сульфату в лікуванні остеоартриту з позицій доказової медицини. *Ліки України*. 2020;3(239):1-7.
2. Брюханова Т.О. Комбінація глюкозаміну та хондроїтину при остеоартриті: синергічна ефективність і безпека у пацієнтів із коморбідними станами. *Ліки України*. 2026;1(297):26-32. [https://doi.org/10.37987/1997-9894.2026.1\(297\).357807](https://doi.org/10.37987/1997-9894.2026.1(297).357807).
3. Лукьянчук Е. Дослідження ефективності комбінації SYSADOA і вплив їх застосування на прийом анагетиків. *Український ревматологічний журнал*. 2018;3(73):34-37.
4. Рекалов Д.Г., Тер-Вартаньян С.Х. Остеоартроз: оптимізація лікування. *Медична газета «Здоров'я України 21 сторіччя»*. 2019;21(466):34-35.
5. Ревматичні хвороби. Класифікація, стандарти діагностики та лікування. За ред. В.М. Коваленка. Київ: Четверта хвиля, 2025. 528 с.
6. Хиць А.Р. Остеоартрит колінного суглоба: рекомендації з лікування. *Укр. мед. часопис*, 2020, 10 липня. www.umj.com.ua [Електронна публікація].
7. American Academy of Orthopaedic Surgeons Management of Osteoarthritis of the Knee (Non-Arthroplasty). Evidence-Based Clinical Practice Guideline. <https://www.aaos.org/oak-3cpg> Published 08/31/2021.
8. An updated algorithm recommendation for the management of knee osteoarthritis from the European Society for Clinical and Economic Aspects of Osteoporosis, Osteoarthritis and Musculoskeletal Diseases (ESCEO). Bruyère O, Honvo G, Veronese N, et al. *Seminars in Arthritis and Rheumatism*. 2019;49(3):337-350. <https://doi.org/10.1016/j.semarthrit.2019.04.008>.
9. Arden NK, Perry TA, Bannuru RR, et al. Non-surgical management of knee osteoarthritis: comparison of ESCEO and OARSI 2019 guidelines. *Nat Rev Rheumatol*. 2021;17:59-66. <https://doi.org/10.1038/s41584-020-00523-9>.
10. Baden KER, Hoeksema SL, Gibson N, Gadi DN, Craig E, Draime JA, et al. The Safety and Efficacy of Glucosamine and/or Chondroitin in Humans: A Systematic Review. *Nutrients*. 2025 Jun 24;17(13):2093. doi: 10.3390/nu17132093. PMID: 40647198; PMCID: PMC12250884.
11. Bannuru RR, Osani M, Vaysbrot E, Arden N, Bennell K, Bierma-Zeinstra S, et al. OARSI guidelines for the non-surgical management of knee, hip, and polyarticular osteoarthritis. *Osteoarthritis Cartil*. 2019;27(11):1578-89.
12. Bruyèreab O, Honvoab G, Veronesec N, et al. An updated algorithm recommendation for the management of knee osteoarthritis from the European Society for Clinical and Economic Aspects of Osteoporosis, Osteoarthritis and Musculoskeletal Diseases (ESCEO). *Semin. Arthritis Rheum*. 2019;49(3):337-350. doi: 10.1016/j.semarthrit.2019.04.008. www.umj.com.ua/uk/publikatsia-183530-osteoartrit-kolinnogo-sugloba-rekomendatsiyi-z-likuvannya-2.
13. Chelleschi S, Tenti S, Giannotti S, Veronese N, Reginster J-Y, Fioravanti A. A combination of celecoxib and glucosamine sulfate has anti-inflammatory and chondroprotective effects: results from an in vitro study on human osteoarthritic chondrocytes. *Int J Mol Sci*. 2021;22(16):8980.
14. Clegg DO, Reda DJ, Harris CL, Klein MA, O'Dell JR, Hooper MM, et al. Glucosamine, chondroitin sulfate, and the two in combination for painful knee osteoarthritis. *N Engl J Med*. 2006 Feb 23;354(8):795-808. doi: 10.1056/NEJMoa052771. PMID: 16495392.
15. Cross M, Smith E, Hoy D, Nolte S, Ackerman I, Fransen M, et al. The global burden of hip and knee osteoarthritis: estimates from the global burden of disease 2010 study. *Ann Rheum Dis* 2014;73(7):1323-30. <https://doi.org/10.1136/annrheumdis-2013-204763>.
16. da Camara CC, Dowless GV. Glucosamine sulfate for osteoarthritis. *Ann Pharmacother*. 1998 May;32(5):580-7. doi: 10.1345/aph.17214. PMID: 9606480.
17. Herrero-Beaumont GH, Rovati LC. Use of crystalline glucosamine sulfate in osteoarthritis. *Future Med*. 2006;1:397-414.
18. Henrotin Y, Lambert C. Chondroitin and glucosamine in the management of osteoarthritis: an update. *Curr Rheumatol Rep*. 2013 Oct;15(10):361. doi: 10.1007/s11926-013-0361-z. PMID: 23955063.
19. Hochberg MC, Altman RD, Brandt KD, Clark BM, Dieppe PA, Griffin MR, et al. Guidelines for the medical management of osteoarthritis. Part II. Osteoarthritis of the knee. American College of Rheumatology. *Arthritis Rheum*. 1995 Nov;38(11):1541-6. doi: 10.1002/art.1780381104. PMID: 7488273.
20. Hochberg MC, Martel-Pelletier J, Monfort J, Möller I, Castillo JR, Arden N, et al.; MOVES Investigation Group. Combined chondroitin sulfate and glucosamine for painful knee osteoarthritis: a multicentre, randomised, double-blind, non-inferiority trial versus celecoxib. *Ann Rheum Dis*. 2016 Jan;75(1):37-44. doi: 10.1136/annrheumdis-2014-206792. Epub 2015 Jan 14. PMID: 25589511; PMCID: PMC4717399.
21. Kantor ED, O'Connell K, Du M, Cao C, Zhang X, Lee DH, et al. Glucosamine and Chondroitin Use in Relation to C-Reactive Protein Concentration: Results by Supplement Form, Formulation, and Dose. *J Altern Complement Med*. 2021 Feb;27(2):150-159. doi: 10.1089/acm.2020.0283. Epub 2020 Dec 7. PMID: 33290138; PMCID: PMC7891193.
22. Martel-Pelletier J, Roubille C, Abram F, Hochberg MC, Dorais M, Delorme P, et al. First-line analysis of the effects of treatment on progression of structural changes in knee osteoarthritis over 24 months: data from the osteoarthritis initiative progression cohort. *Ann Rheum Dis*. 2015 Mar;74(3):547-56. doi: 10.1136/annrheumdis-2013-203906. Epub 2013 Dec 13. PMID: 24336337.
23. Meng Z, Liu J, Zhou N. Efficacy and safety of the combination of glucosamine and chondroitin for knee osteoarthritis: a systematic review and meta-analysis. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2023 Jan;143(1):409-421. doi: 10.1007/s00402-021-04326-9. Epub 2022 Jan 13. PMID: 35024906.
24. Mobasheri A. New perspectives in osteoarthritis management. *World Congress on Osteoporosis, Osteoarthritis and Musculoskeletal Diseases (WCO-IOF-ESCEO 2024)*. *Aging Clin Exp Res*. <https://doi.org/10.1007/s40520-024-02766-y> PL9.

25. OARSI recommendations for the management of hip and knee osteoarthritis, Part II: OARSI evidence-based, expert consensus guidelines. Zhang W, Moskowitz RW, Nuki G, et al. *Osteoarthritis and Cartilage*. 2008;16:137-162.

26. Ogata T, Ideno Y, Akai M, Seichi A, Hagino H, Iwaya T, et al. Effects of glucosamine in patients with osteoarthritis of the knee: a systematic review and meta-analysis. *Clin Rheumatol*. 2018 Sep;37(9):2479-2487. doi: 10.1007/s10067-018-4106-2. Epub 2018 Apr 30. PMID: 29713967; PMCID: PMC6097075.

27. Raynauld JP, Pelletier JP, Abram F, Dodin P, Delorme P, Martel-Pelletier J. Long-Term Effects of Glucosamine and Chondroitin Sulfate on the Progression of Structural Changes in Knee Osteoarthritis: Six-Year Followup Data From the Osteoarthritis Initiative. *Arthritis Care Res (Hoboken)*. 2016 Oct;68(10):1560-6. doi: 10.1002/acr.22866. Epub 2016 Sep 16. PMID: 26881338.

28. Reginster JY, Veronese N. Highly purified chondroitin sulfate: a literature review on clinical efficacy and pharmacoeconomic aspects in osteoarthritis treatment. *Aging Clin Exp Res*. 2021 Jan;33(1):37-47. doi: 10.1007/s40520-020-01643-8. Epub 2020 Jul 7. PMID: 32638342; PMCID: PMC7897612.

29. Seehusen DA, Bowman MA. Must-Read Family Medicine Research-Glucosamine/Chondroitin Supplements and Mortality, Telomere Length and the Doctor-Patient Relationship, Reducing Opioid Use, and More. *J Am Board Fam Med*. 2020 Nov-Dec;33(6):823-826. doi: 10.3122/jabfm.2020.06.200513. PMID: 33219058.

30. Shikhman AR, Amiel D, D'Lima D, Hwang SB, Hu C, Xu A, et al. Chondroprotective activity of N-acetylglucosamine in rabbits with experimental osteoarthritis. *Ann Rheum Dis*. 2005 Jan;64(1):89-94. doi: 10.1136/ard.2003.019406. PMID: 15608304; PMCID: PMC1755188.

31. Wang Z, Wang R, Yao H, Yang J, Chen Y, Zhu Y, Lu C. Clinical Efficacy and Safety of Chondroitin Combined with Glucosamine in the Treatment of Knee Osteoarthritis: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Comput Math Methods Med*. 2022 Jul 25;2022:5285244. doi: 10.1155/2022/5285244. Retraction in: *Comput Math Methods Med*. 2023 Aug 2;2023:9875743. doi: 10.1155/2023/9875743. PMID: 35924114; PMCID: PMC9343191.

32. World Health Organization. Osteoarthritis. Available online: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/osteoarthritis> (accessed on 20 December 2025).

33. Zeng C, Wei J, Li H, Wang YL, Xie DX, Yang T, et al. Effectiveness and safety of Glucosamine, chondroitin, the two in combination, or celecoxib in the treatment of osteoarthritis of the knee. *Sci Rep*. 2015 Nov 18;5:16827. doi: 10.1038/srep16827. PMID: 26576862; PMCID: PMC4649492.

34. Zhu X, Wu D, Sang L, Wang Y, Shen Y, Zhuang X, et al. Comparative effectiveness of glucosamine, chondroitin, acetaminophen or celecoxib for the treatment of knee and/or hip osteoarthritis: a network meta-analysis. *Clin Exp Rheumatol*. 2018 Jul-Aug;36(4):595-602. Epub 2018 Jan 31. PMID: 29465368.

Отримано/Received 03.07.2026
Рецензовано/Revised 10.08.2026
Прийнято до друку/Accepted 11.08.2026

Information about authors

Oleksandr Loskutov, Academician of NAMSU, MD, DSc, PhD, Professor of the Department of Traumatology and Orthopedics, Dnipro State Medical University, Dnipro, Ukraine; e-mail: LoskutovAE@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0003-0579-5642>

Oleksandr Oliynyk, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Traumatology and Orthopedics, Dnipro State Medical University, Dnipro, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-0382-2590>

Dmytro Syniehubov, PhD in Medicine, Associate Professor at the Department of Traumatology and Orthopedics, Dnipro State Medical University, Dnipro, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0003-2724-5588>

Conflicts of interests. Authors declare the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

O.Ye. Loskutov, O.Ye. Oliynyk, D.A. Syniehubov
Dnipro State Medical University, Dnipro, Ukraine

Combined chondroprotective therapy in the treatment of degenerative-dystrophic joint diseases

Abstract. Osteoarthritis is characterized by joint pain and stiffness, which leads to functional impairment, loss of activity and participation, and reduced quality of life. Treatment for osteoarthritis should be aimed at preventing structural destruction of articular cartilage. Symptomatic slow-acting drugs, which include chondroitin sulfate and glucosamine sulfate, are aimed at slowing the progression of osteoarthritis, stabilizing

and regressing of existing changes in joint tissues. International studies have confirmed the effectiveness of the combination of chondroitin sulfate and glucosamine sulfate in the treatment of osteoarthritis, which provides long-term pain relief and improved joint function.

Keywords: osteoarthritis; joint pain; symptomatic slow-acting drugs; chondroitin sulfate; glucosamine sulfate; review

R.A. Kuzmov, V.H. Lutsyshyn, O.Yu. Branitskyi, V.S. Sobko, V.M. Maiko, R.O. Sheremeta
National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine

Features of computed tomography indicators in patients with massive limb defects after mine-blast injuries with different types of reconstructive plastic surgery

Abstract. Background. Extensive limb injuries after mine-blast trauma require not only successful reconstructive plastic surgery but also objective instrumental monitoring of postoperative tissue remodeling. One such tool that allows this to be performed is computed tomography (CT), which provides information on the condition of the flap, surrounding tissues, and the vascular component of the reconstructed segment. The purpose was to investigate the features of CT indicators of the postoperative flap in patients with massive limb defects after mine-blast injuries during 6 months of follow-up when using different types of reconstructive plastic surgery. **Materials and methods.** The study included 110 patients with massive mine-blast trauma of the limb. They underwent 5 different types of reconstructive plastic surgery. In the postoperative period, immediately after surgery, after 3 and 6 months, the patients underwent CT examination using an Aquilion Prime SP TSX-303B/5C scanner, with analysis of indicators, such as density of the flap and surrounding tissues, lumen of the artery and vein, contrast enhancement, length and lumen of the vein graft. **Results.** Mixed model analysis showed that the observation time significantly affected practically all studied indicators, except for the arterial lumen. The type of plastic surgery was significant for the indicators of flap density, maximum density of surrounding tissues, venous lumen, contrast enhancement, and vein graft lumen. At the same time, the interaction between the type of plastic surgery and time was not statistically significant for any indicator. When analyzing temporal changes in the indicators, it was found that, regardless of the type of plastic surgery, after 6 months the minimum flap density increased by 9.470 Hounsfield units (HU), the maximum flap density by 7.961 HU, the minimum density of surrounding tissues by 8.391 HU, and contrast enhancement by 11.537 %. The arterial lumen did not change significantly, whereas the lumen of the vein and vein graft decreased. The strongest association with the type of plastic surgery was established for contrast enhancement: $\eta^2 = 0.455$ immediately after surgery, $\eta^2 = 0.405$ after 3 months, and $\eta^2 = 0.339$ after 6 months. All correlations of the studied indicators with segment functionality were weak. The highest absolute value was observed for contrast enhancement at the 3-month follow-up period ($r = -0.211$). **Conclusions.** Changes in the studied CT indicators mainly reflect morphological and vascular-tissue remodeling after reconstructive plastic surgery; among them, tissue density and contrast enhancement are the most informative ones. **Keywords:** reconstructive plastic surgery; computed tomography; massive limb defects; mine-blast injuries; surgery

Introduction

Armed conflicts of recent years are accompanied not only by an increase in the number of direct combat injuries, but also by the formation of a considerable long-term medical burden associated with the treatment of severe trauma, tissue reconstruction, restoration of limb

function, and the consequences of disability. According to recent reviews, limb injuries account for about 50 % of the injury pattern among civilians during armed conflicts, whereas head injuries account for 26 %, chest injuries for 18 %, and children constitute nearly 23 % of the wounded. Blast injuries represent a separate clinical problem,

© «Травма» / «Trauma» («Травма»), 2026

© Видавець Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2026

Для кореспонденції: Кузьмов Роман Анатолійович, аспірант кафедри ендоскопічної та серцево-судинної хірургії, Вінницький національний медичний університет ім. М.І. Пирогова, вул. Пирогова, 56, м. Вінниця, 21018, Україна; e-mail: kuzmov1902@gmail.com; тел.: +380 (432) 55-39-10

For correspondence: Roman Kuzmov, Postgraduate Student, Department of Endoscopic and Cardiovascular Surgery, National Pirogov Memorial Medical University, Pirohovo st., 56, Vinnytsia, 21018, Ukraine; e-mail: kuzmov1902@gmail.com; phone: +380 (432) 55-39-10

Full list of authors information is available at the end of the article.

as they are characterized by a combination of mechanical, fragmentation, vascular, and soft-tissue components of trauma, which is confirmed by current data on injuries in zones of active hostilities, particularly under conditions of mass admission of patients with multiple traumatic injuries [1–4].

For patients with combat-related limb trauma, the choice between limb-sparing reconstruction, staged surgical treatment, and amputation is particularly relevant. Recent data from Ukrainian physicians indicate that among the wounded with limb injuries, mine-blast injuries accounted for 29 %, shrapnel wounds for 47 %, with upper limbs injured in 22 % of patients, lower limbs in 32 %, two limbs in 15 %, and combined combat trauma recorded in 31 % of cases. A similar tendency is observed in other studies of war-related trauma: in a retrospective analysis of the consequences of the Lebanon conflict, limb injuries were found in 49.0 % of patients, exceeding the proportion of other anatomical localizations, whereas musculoskeletal injuries accounted for 31.1 % [5–7].

Massive limb defects after mine-blast injuries require not only wound surface closure, but also restoration of tissue volume, vascular perfusion, and weight-bearing capacity, which may create favorable conditions for subsequent functional rehabilitation. Reconstructive plastic surgery in war trauma is one of the key elements of specialized care [8–10]. Data from one study involving a cohort of 300 patients with injuries caused by military actions who required reconstructive interventions showed that limb injuries predominated among them, with a complication rate of 13 %, including wound infection in 8.5 % [9], which demonstrates both the urgency and complexity of the problem under study.

Computed tomography (CT) in this context is an important tool for the objective assessment of the reconstructed segment. This method allows analysis of bone structures, soft tissues, vascular injuries, signs of occlusion, or impaired vascular patency. Considering this tool not only as a mean of primary trauma diagnosis but also for treatment planning and follow-up after reconstructive interventions is essential [11, 12].

It is important to understand that tissue recovery is not always directly related to the functional outcome, since the consequences of severe limb trauma and amputation involve various aspects, including physical, psychological, social, and rehabilitation-related components. Modern reviews emphasize that after traumatic lower limb amputation, it is not sufficient to assess only surgical complications, as the key indicators for the patient remain those that directly affect quality of life, namely function, pain, psychoemotional adaptation, and the possibility of returning to activity [13–15]. In this regard, there is a need for studies that combine objective instrumental indicators after reconstructive treatment with clinical interpretation of the recovery course in patients.

The purpose. To investigate the features of computed tomography indicators of the flap area in patients with massive limb defects after mine-blast injuries during 6 months of follow-up when using different types of reconstructive plastic surgery.

Materials and methods

The study was conducted at the Department of Endoscopic and Cardiovascular Surgery of National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, on the basis of the Clinical Highly Specialized Surgical Center with Minimally Invasive Technologies, the Center of Highly Specialized Endoscopic Diagnosis and Treatment, the Highly Specialized Center of Orthopedics, Endoprosthetics and Reconstructive Traumatology, Interventional Cardiology and Reperfusion Therapy of the Municipal Non-Commercial Enterprise “Vinnytsia Regional Clinical Hospital named after M.I. Pirogov of Vinnytsia Regional Council”.

The study included 110 patients with massive limb defects resulting from mine-blast injuries. Five variants of reconstructive plastic surgery were performed: 1) with bone grafting and the use of a vein graft; 2) with bone grafting without the use of a vein graft; 3) without bone grafting, but with the use of a vein graft; 4) without bone grafting and without a vein graft; 5) by autodermoplasty.

All patients underwent CT immediately after surgery and also 3 and 6 months after it. Computed tomography was performed using a 160-slice Aquilion Prime SP scanner, model TSX-303B/5C, manufactured by Canon Medical Systems Corporation, Japan. During the examination, the following indicators were determined: minimum (min) and maximum (max) flap density (Hounsfield unit, HU), minimum and maximum density of surrounding tissues (HU), arterial and venous lumen (mm), contrast enhancement (%), vein graft length and lumen (mm).

The Bioethics Committee of National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, established that the conducted study complies with the basic bioethical provisions of the Declaration of Helsinki, the Council of Europe Convention on Human Rights and Biomedicine (1977), current WHO recommendations, and the legislation of Ukraine, as confirmed by protocol No. 2 dated February 10, 2025.

The study was carried out within the framework of the research project “Development and implementation of innovative technologies for the treatment and prevention of disorders of the integrity and patency of blood vessels in wartime conditions” (0123U100204).

Statistical processing of the obtained data and creation of graphical representation of the data were performed in the RStudio 2026.01.2+418 “Apple Blossom” Release software environment (1d903d3bd61a40d-82bf71aad8471a5a388cc1f73, 2026-03-25) for Windows Mozilla/5.0 (Windows NT 10.0; Win64; x64) AppleWebKit/537.36 (KHTML, like Gecko) RStudio/2026.01.2+418 Chrome/140.0.7339.249 Electron/38.7.2 Safari/537.36, Quarto 1.8.25. Statistical analysis included ANOVA for mixed models with assessment of the effect of the type of plastic surgery, follow-up time, and their interaction; pairwise post-hoc comparisons with Bonferroni correction; estimation of association strength using η^2 ; one-vs-rest analysis of individual types of plastic surgery; the nonparametric Kruskal-Wallis test; and Spearman correlation analysis to determine the relationship between CT indicators and segment functionality.

Results

According to the results of mixed models, follow-up time was the most stable factor and significantly affected almost all CT indicators, except for the arterial lumen; the type of plastic surgery had a significant effect on minimum and maximum flap density, maximum density of surrounding tissues, venous lumen, contrast enhancement, and vein graft lumen, whereas the interaction between the type of plastic surgery and time did not reach statistical significance for any indicator (Table 1).

When comparing the overall dynamics of CT indicators regardless of the type of plastic surgery, a significant increase was found in minimum flap density by 5.203 HU after 3 months and by 9.470 HU after 6 months, maximum flap density by 4.855 and 7.961 HU, respectively, minimum density of surrounding tissues by 4.958 and 8.391 HU, as well as contrast enhancement by 7.468 and 11.537 %. At the same time, the arterial lumen did not change significantly,

the venous lumen significantly decreased, and the vein graft lumen after 6 months was lower by 0.207 mm compared with the early postoperative period (Table 2).

The most consistent increase was observed for minimum flap density: this indicator significantly increased from immediately after intervention to 6 months in all types of plastic surgery, with the greatest increase in group 4 — 12.750 HU. Maximum flap density also increased in all groups by 6 months, but an increase between 3 and 6 months was significant only for plastic surgery types 2 and 4. For contrast enhancement, a significant increase by 6 months was noted in all groups, whereas for arterial and venous lumen, temporal changes were less stable and mostly did not reach significance (Fig. 1).

The strongest association of the type of plastic surgery was found for contrast enhancement: η^2 was 0.455 immediately after surgery, 0.405 after 3 months, and 0.339 after 6 months. A strong association was also established for maxi-

Table 1. Results of ANOVA for mixed models of CT indicators

Indicator	Effect	F criterion	p value	Significance
Min flap density, HU	Type of plastic surgery	2.990	0.022	*
	Follow-up time	105.150	< 0.001	***
	Type of plastic surgery × time	0.838	0.570	
Max flap density, HU	Type of plastic surgery	5.160	< 0.001	***
	Follow-up time	52.662	< 0.001	***
	Type of plastic surgery × time	1.170	0.318	
Min density of surrounding tissues, HU	Type of plastic surgery	2.054	0.092	
	Follow-up time	67.380	< 0.001	***
	Type of plastic surgery × time	0.426	0.905	
Max density of surrounding tissues, HU	Type of plastic surgery	7.799	< 0.001	***
	Follow-up time	21.044	< 0.001	***
	Type of plastic surgery × time	1.317	0.236	
Arterial lumen, mm	Type of plastic surgery	1.046	0.387	
	Follow-up time	0.942	0.391	
	Type of plastic surgery × time	1.163	0.323	
Venous lumen, mm	Type of plastic surgery	8.745	< 0.001	***
	Follow-up time	7.027	0.001	**
	Type of plastic surgery × time	0.862	0.549	
Contrast enhancement, %	Type of plastic surgery	27.300	< 0.001	***
	Follow-up time	49.002	< 0.001	***
	Type of plastic surgery × time	1.451	0.177	
Vein graft length, cm	Type of plastic surgery	0.401	0.808	
	Follow-up time	4.452	0.013	*
	Type of plastic surgery × time	1.221	0.288	
Vein graft lumen, mm	Type of plastic surgery	11.117	< 0.001	***
	Follow-up time	5.317	0.006	**
	Type of plastic surgery × time	0.453	0.887	

Notes (here and in Table 2, Fig. 1–3): * — $p < 0.05$; ** — $p < 0.01$; *** — $p < 0.001$.

imum density of surrounding tissues, venous lumen after 3 and 6 months, and vein graft lumen. In contrast, arterial lumen and vein graft length had a weak association with the type of plastic surgery, while the minimum density of surrounding tissues did not demonstrate a statistically significant association (Fig. 2).

After correction in the one-vs-rest analysis, differences in contrast enhancement remained the most informative: plastic surgery types 1 and 2 had lower values compared with the other types of plastic surgery, whereas type 3 and especially type 4 had higher values. For plastic surgery type 4, the higher level of contrast enhancement was significant at all time points: immediately after surgery, the difference was 17.656 %, after 3 months — 15.016 %, and after 6 months — 12.580 %. Plastic surgery type 3 was also characterized by a lower venous lumen after 3 and 6 months, while type 1 was characterized by a larger vein graft lumen after 3 and 6 months (Fig. 3).

All correlations between CT indicators and segment functionality were weak; the highest absolute value was observed for contrast enhancement after 3 months ($r = -0.211$), but after correction, it did not remain statistically significant. Thus, according to the available data, CT indicators characterize morphological and vascular-tissue remodeling after plastic surgery, but do not demonstrate an independent strong relationship with segment functionality (Fig. 4).

Discussion

Our results demonstrate the feasibility of using computed tomography to assess postoperative tissue remodeling in patients with massive limb defects. Current publications already consider CT to be a leading method for assessing peripheral vascular injuries, especially in cases of complex limb trauma. It is noteworthy that in our study, the most differentiating parameter between types of reconstructive plastic surgery was contrast enhancement rather than arte-

Table 2. Overall dynamics of CT indicators regardless of the type of plastic surgery

Indicator	Time comparison	Mean difference	Standard error	t criterion	p value	Significance
Min flap density, HU	3 months vs immediately	5.203	0.654	7.954	< 0.001	***
	6 months vs immediately	9.470	0.654	14.478	< 0.001	***
	6 months vs 3 months	4.267	0.654	6.524	< 0.001	***
Max flap density, HU	3 months vs immediately	4.855	0.782	6.209	< 0.001	***
	6 months vs immediately	7.961	0.782	10.181	< 0.001	***
	6 months vs 3 months	3.106	0.782	3.972	< 0.001	***
Min density of surrounding tissues, HU	3 months vs immediately	4.958	0.727	6.822	< 0.001	***
	6 months vs immediately	8.391	0.727	11.545	< 0.001	***
	6 months vs 3 months	3.433	0.727	4.723	< 0.001	***
Max density of surrounding tissues, HU	3 months vs immediately	7.308	1.458	5.013	< 0.001	***
	6 months vs immediately	8.852	1.458	6.073	< 0.001	***
	6 months vs 3 months	1.544	1.458	1.059	0.872	
Arterial lumen, mm	3 months vs immediately	0.871	0.667	1.307	0.578	
	6 months vs immediately	0.194	0.667	0.291	1.000	
	6 months vs 3 months	-0.678	0.667	-1.016	0.932	
Venous lumen, mm	3 months vs immediately	-0.150	0.043	-3.458	0.002	**
	6 months vs immediately	-0.129	0.043	-2.983	0.010	**
	6 months vs 3 months	0.021	0.043	0.475	1.000	
Contrast enhancement, %	3 months vs immediately	7.468	1.182	6.317	< 0.001	***
	6 months vs immediately	11.537	1.182	9.760	< 0.001	***
	6 months vs 3 months	4.069	1.182	3.442	0.002	**
Vein graft length, cm	3 months vs immediately	0.038	0.097	0.396	1.000	
	6 months vs immediately	-0.229	0.097	-2.363	0.057	
	6 months vs 3 months	-0.267	0.097	-2.759	0.019	*
Vein graft lumen, mm	3 months vs immediately	-0.156	0.066	-2.357	0.058	
	6 months vs immediately	-0.207	0.066	-3.130	0.006	**
	6 months vs 3 months	-0.051	0.066	-0.773	1.000	

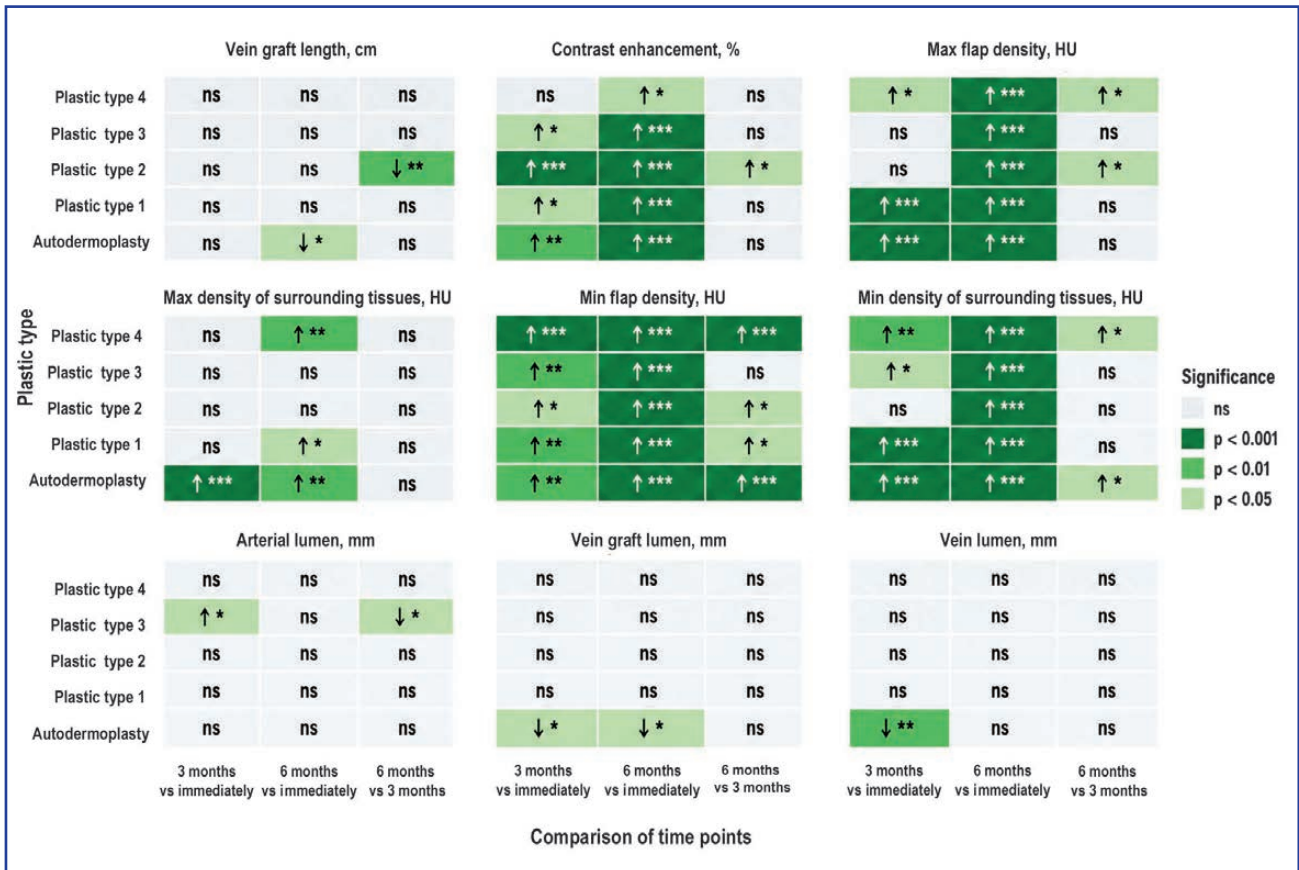


Figure 1. Pairwise comparison of time points within each type of plastic surgery

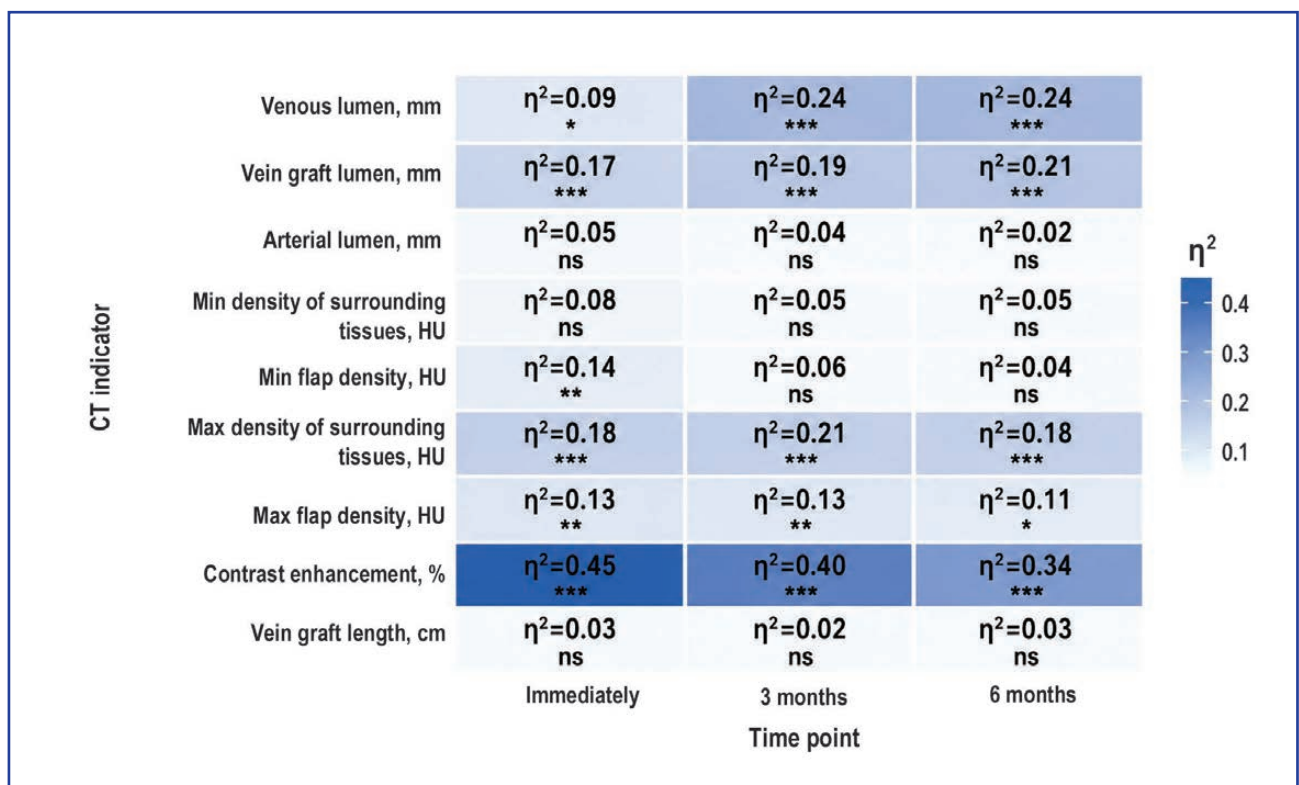
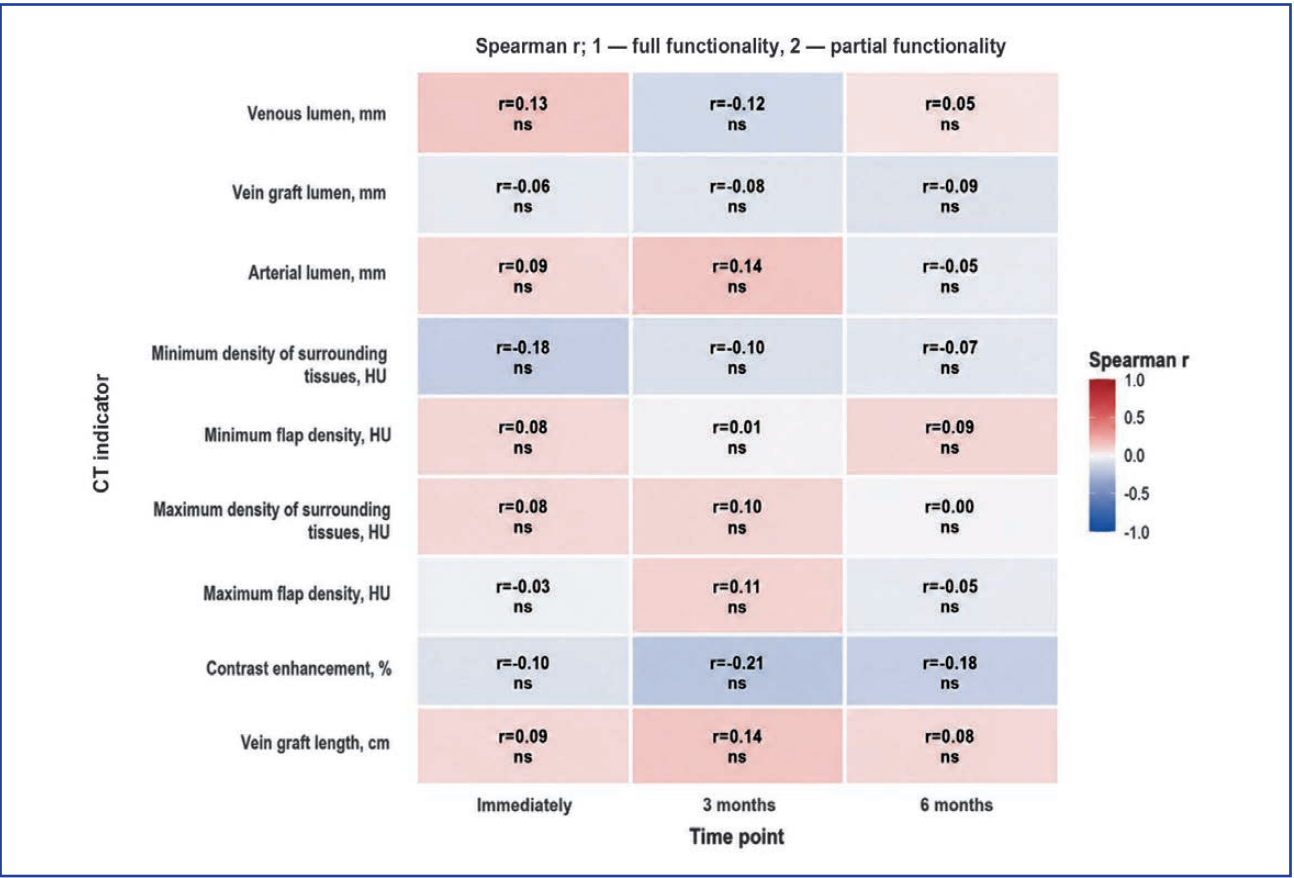
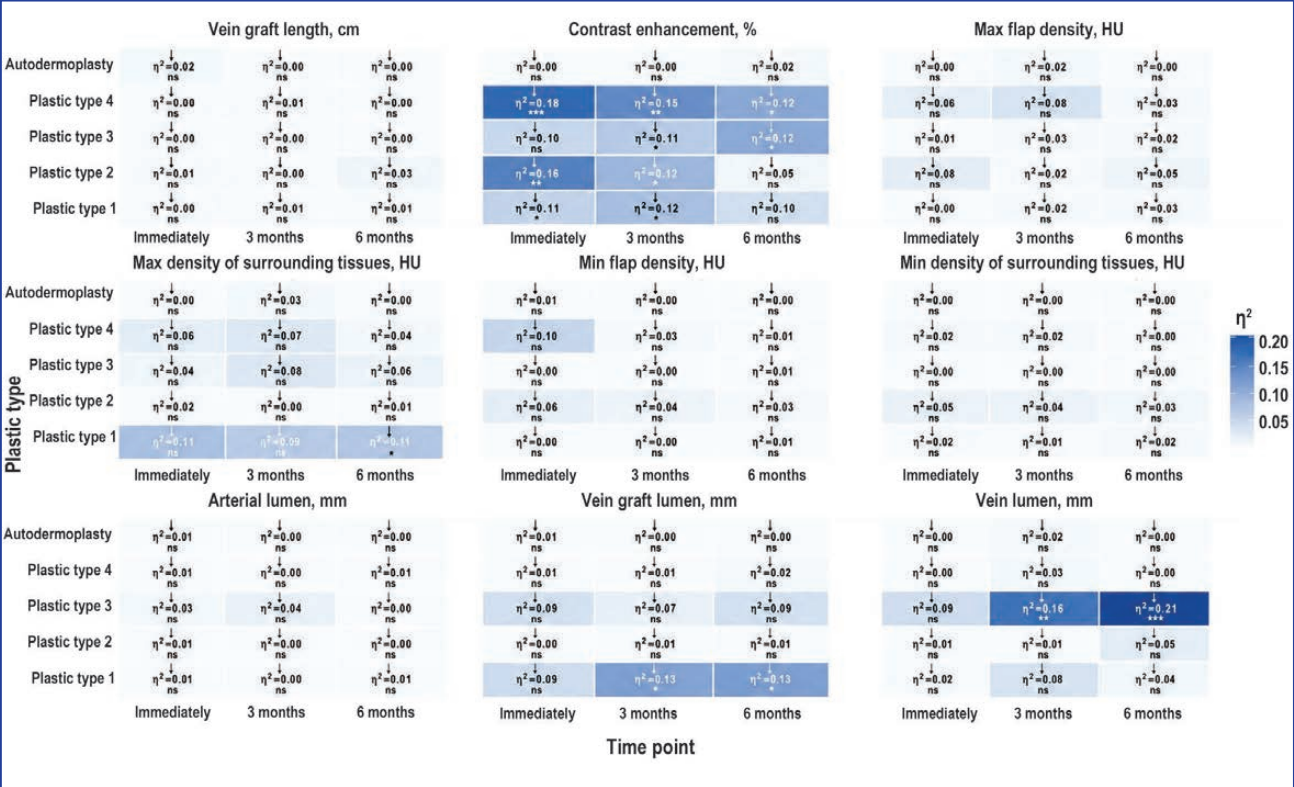


Figure 2. Association of the type of plastic surgery with CT indicators



rial lumen. This is consistent with the approach described in the international literature, according to which assessment of an injured limb should include not only the fact of main vascular patency, but also the analysis of tissue perfusion indicators and indirect signs of viability of the reconstructed segment [16–19].

The absence of a significant relationship between the type of plastic surgery and follow-up time in the models suggests that different reconstructive approaches did not change the general direction of postoperative dynamics. At the same time, this did not exclude the formation of different features of CT indicators. This is a clinically expected result, because combined trauma, such as mine-blast injury, is not simply a defect but a set of different factors. Modern approaches to surgical interventions for lower limb reconstruction after trauma emphasize that the outcome depends on the sequential combination of debridement, stabilization, soft-tissue coverage, and reconstruction of small vessels [20–24]. This explains why, in our study, the most stable positive dynamics concerned the density of the flap and surrounding tissues, rather than linear vascular indicators.

The increases in minimum flap density and contrast enhancement observed in our study after 6 months may reflect the gradual structural organization of reconstructed tissues. Specifically, edema decreases, the connective tissue component forms, and local blood supply stabilizes. It is important to note that the arterial lumen remained practically unchanged over time, indicating that arterial diameter alone is not a sufficiently sensitive marker of the recovery course. In this respect, our data partially coincide with studies emphasizing the need to combine instrumental vascular assessment with characterization of the soft-tissue defect and the selected method of reconstruction [25–28].

It is noteworthy that venous system parameters and vein graft lumen better reflected intergroup differences than arterial lumen. This may be related to the fact that after massive trauma, venous outflow and the condition of reconstructed vessels are more variable and more dependent on the type of plastic surgery than arterial patency. From the standpoint of practical surgery, this is important because insufficiency of the venous component may influence various complications of the postoperative period. Scientific sources studying flap failures in lower limb trauma also emphasize that an unfavorable outcome often develops not in isolation, but as a result of a combination of vascular, infectious, and other factors [29].

The weak correlations between CT indicators and segment functionality found in our study demonstrate that morphological tissue recovery cannot be directly equated with the functional outcome. The strongest association in absolute value was found for contrast enhancement after 3 months ($r = -0.211$), but even this association was weak. This, in turn, means that CT well characterizes the condition of reconstructed tissues; however, limb functionality after severe trauma is likely to depend on other factors, such as the level of injury, preservation of weight-bearing function, the neuromuscular compo-

nent, pain syndrome, the extent of rehabilitation, and others. International literature on patients with severe lower limb injuries also supports our data, indicating that functional scales after reconstruction reflect a much broader range of factors than only anatomical closure of the defect or vascular patency [30].

Conclusions

1. Patients with massive limb injuries after mine-blast trauma show a significant increase in CT parameters, such as flap density, density of surrounding tissues, and contrast enhancement, during 6 months after reconstructive plastic surgery, indicating postoperative tissue remodeling in the flap area.

2. The type of reconstructive plastic surgery has a greater effect on the expression of most, but not all, CT data. Among the studied CT indicators, the greatest difference between different types of plastic surgery was established for contrast enhancement, the strength of association of which with the type of intervention remained high at all follow-up time points.

3. Indicators of tissue density and contrast enhancement were more informative for assessing postoperative dynamics than linear vascular indicators. Venous indicators and vein graft lumen better reflected differences between types of reconstructive intervention.

4. Practically no significant associations were established between CT parameters and segment functionality, which indicates the advisability of interpreting the obtained CT results in combination with clinical and functional criteria.

Acknowledgements

To Valerii Ihorovych Gunas, the Head of the Department of Forensic Medicine and Law of National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, for translating the article into English and organizing the process of submitting the manuscript.

References

1. Bendavid E, Boerma T, Akseer N, Langer A, Malembaka EB, et al. The effects of armed conflict on the health of women and children. *The Lancet*. 2021 Feb 6;397(10273):522–32. doi: 10.1016/S0140-6736(21)00131-8.
2. Chevalley K, Zimmerman J, Mittendorf A, Sennersten F, Dalman A, et al. Civilian pattern of injuries in armed conflicts — a systematic review. *Scandinavian Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine*. 2024 Dec 4;32(1):125. doi: 10.1186/s13049-024-01299-7.
3. Roy CM, Garbern SC, Relan P, Bills CB, Schultz ML, et al. Acute Facility Management of Blast Injuries In Low- and Middle-Income Countries: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Prehospital and Disaster Medicine*. 2025 Jun 30;1–3. doi: 10.1017/S1049023X25101222.
4. El-Taji O, Ali A, Alser O, Ghali A, Jomaa A, et al. Patterns of war related trauma in Gaza during armed conflict: survey study of international healthcare workers. *BMJ*. 2025 Sep 25;390. doi: 10.1136/bmj-2025-087524.
5. Trutyak I, Malickii V, Samotowka M, Trunkvalter V, Trutyak R, Ivaschenko V. Problematic issues of limb amputation

in wounded with combat trauma. *Proceeding of the Shevchenko Scientific Society. Medical Sciences*. 2023 Dec 22;72(2). doi: 10.25040/ntsh2023.02.08.

6. Neeman U, Hashavia E, Soffer D, Timor I, Zeltser D, et al. Blast injuries: the experience of a level 1 trauma center. *Injury*. 2025 Jan 1;56(1):111839. doi: 10.1016/j.injury.2024.111839.

7. Farhat T, Nahouli H, Hajjar M, Abdul-Sater Z, Ko-beissi E, et al. Characteristics of injuries during the 2006 Lebanon conflict: a three-center retrospective study of survivors, 16 years after the conflict. *Frontiers in public health*. 2024 May 28;12:1382514. doi: 10.3389/fpubh.2024.1382514.

8. Yuste V, Rodero MD, Bernal A, Gomez-Escolar L, Sevilla JJ, Garin M. The role of plastic surgery in the management of war injuries from the Russo-Ukrainian War. *European Journal of Plastic Surgery*. 2024 Sep 6;47(1):91. doi: 10.1007/s00238-024-02236-8.

9. Ahmed AK, Bakhiet MY, Mohamed HH. Plastic surgery interventions for war-related injuries: a review of 300 cases from Sudan, a cohort study. *BMC surgery*. 2025 Oct 3;25(1):442. doi: 10.1186/s12893-025-03181-4.

10. Khomenko IP, Lurin IA, Gumeniuk KV, McKnight G, Makarov VV, et al. Telemedicine support aids lower limb reconstruction after combat injury in Ukraine. *Journal of Surgical Case Reports*. 2023 Jul;2023(7):rjad403. doi: 10.1093/jscr/rjad403.

11. Dreizin D, Smith EB, Champ K, Morrison JJ. Roles of trauma CT and CTA in salvaging the threatened or mangled extremity. *Radiographics*. 2022 Mar;42(2):E50-67. doi: 10.1148/rg.210092.

12. Tamburrini S, Lassandro G, Tiralongo F, Iacobellis F, Ronza FM, et al. CTA imaging of peripheral arterial injuries. *Diagnostics*. 2024 Jun 26;14(13):1356. doi: 10.3390/diagnostics14131356.

13. Tirrell AR, Kim KG, Rashid W, Attinger CE, Fan KL, Evans KK. Patient-reported outcome measures following traumatic lower extremity amputation: a systematic review and meta-analysis. *Plastic and Reconstructive Surgery — Global Open*. 2021 Nov 1;9(11):e3920. doi: 10.1097/GOX.0000000000003920.

14. Schober TL, Abrahamsen C. Patient perspectives on major lower limb amputation — a qualitative systematic review. *International Journal of Orthopaedic and Trauma Nursing*. 2022 Jul 1;46:100958. doi: 10.1016/j.ijotn.2022.100958.

15. Ghai S, Hitzig SL, Eberlin L, Melo J, Mayo AL, et al. Reporting of rehabilitation outcomes in the traumatic lower limb amputation literature: a systematic review. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2024 Jun 1;105(6):1158-70. doi: 10.1016/j.apmr.2023.08.028.

16. Paes FM, Munera F. Computer tomography angiography of peripheral vascular injuries. *Radiologic Clinics*. 2023 Jan 1;61(1):141-50. doi: 10.1016/j.rcl.2022.08.006.

17. Joseph TI, Ratnakanthan PJ, Paul E, Clements W. Utility of computed tomography angiography in traumatic lower limb injury: Review of clinical impact in level 1 trauma centre. *Injury*. 2021 Oct 1;52(10):3064-7. doi: 10.1016/j.injury.2021.02.047.

18. Warwick H, Cherches M, Shaw C, Toogood P. Comparison of computed tomography angiography and physical

exam in the evaluation of arterial injury in extremity trauma. *Injury*. 2021 Jul 1;52(7):1727-31. doi: 10.1016/j.injury.2021.04.057.

19. Du Plessis J, Kalu A, McKee H, Mohammed A, Maroun R, et al. Computed tomography angiography utilization in lower extremity trauma: insights from a Canadian Level I Trauma Centre. *Canadian Association of Radiologists Journal*. 2026 Feb;77(1):187-94. doi: 10.1177/08465371251342064.

20. Stefanou N, Arnaoutoglou C, Papageorgiou F, Matsagkas M, Varitimidis SE, Dailiana ZH. Update in combined musculoskeletal and vascular injuries of the extremities. *World Journal of Orthopedics*. 2022 May 18;13(5):411. doi: 10.5312/wjo.v13.i5.411.

21. Zeiderman MR, Pu LL. Contemporary approach to soft-tissue reconstruction of the lower extremity after trauma. *Burns & Trauma*. 2021;9:tkab024. doi: 10.1093/burnst/tkab024.

22. Othman S, Azoury SC, Klifto KM, Levin LS, Kovach SJ. Soft-tissue management and reconstruction of lower-extremity trauma. *Plastic and Aesthetic Research*. 2022 Apr 9;9:29. doi: 10.20517/2347-9264.2021.135.

23. Evans BG, Colen DL. The evolution of lower extremity reconstruction. *Plastic and Aesthetic Research*. 2022 May 6;9(5):34. doi: 10.20517/2347-9264.2021.134.

24. Jenny LY, Tolley PD, Kneib C, Miller EA, Crowe CS. Current concepts in microsurgical soft tissue reconstruction of lower extremity trauma in a single-vessel extremity. *Plastic and Aesthetic Research*. 2022 May 17;9(5):37. doi: 10.20517/2347-9264.2021.124.

25. Li B, Tian X, Fei H, Li G, Wu X. Management of suspected peripheral vascular injuries in orthopedic trauma. *Orthopaedic Surgery*. 2024 Jul;16(7):1548-54. doi: 10.1111/os.14079.

26. Györi E, Fast A, Resch A, Rath T, Radtke C. Reconstruction of traumatic and non-traumatic lower extremity defects with local or free flaps. *European Surgery*. 2022 Feb;54(1):44-9. doi: 10.1007/s10353-021-00704-0.

27. Mert S, Heidekrueger PI, Fuchs B, Nuernberger T, Haas-Lützenberger EM, et al. Microvascular Muscle vs. Fascio-Cutaneous Free Flaps for Reconstruction of Plantar Load-Bearing Foot Defects — An International Survey. *Journal of Clinical Medicine*. 2024 Feb 24;13(5):1287. doi: 10.3390/jcm13051287.

28. List EB, Hahn BA, Qiu SS, de Jong T, Rakhorst HA, et al. Free fasciocutaneous versus muscle flaps in lower extremity reconstruction: Implications for functionality and quality of life. *Journal of Reconstructive Microsurgery*. 2025 Oct;41(08):641-8. doi: 10.1055/a-2483-5388.

29. Koster IT, Borgdorff MP, Jamaludin FS, de Jong T, Botman M, Driessen C. Strategies following free flap failure in lower extremity trauma: a systematic review. *JPRAS open*. 2023 Jun 1;36:94-104. doi: 10.1016/j.jprra.2023.03.002.

30. Düzgün S, Özdemir MT, Manti N, Ülgen NK, Akkurt MO. Optimizing outcomes in mangled lower extremity reconstruction: insights from a retrospective study of 93 patients and their functional scores. *Journal of Clinical Medicine*. 2025 Feb 21;14(5):1436. doi: 10.3390/jcm14051436.

Received 04.04.2026

Revised 22.05.2026

Accepted 12.06.2026

Information about authors

Roman Kuzmov, Postgraduate Student of the Department of Endoscopic and Cardiovascular Surgery, National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: kuzmov1902@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0007-3454-956X>

Vadym Lutsyshyn, MD, DSc, PhD, Assistant of the Department of Endoscopic and Cardiovascular Surgery, National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: drlutsyshyn@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0001-6232-1748>

Oleksandr Branitskyi, PhD, Assistant of the Department of Physical and Rehabilitation Medicine, National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: branicki2018@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7091-5279>

Vadym Sobko, PhD, Associate Professor of the Department of Endoscopic and Cardiovascular Surgery, National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia; e-mail: sv.eskulap@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-9182-6769>

Vyacheslav Maiko, MD, DSc, PhD, Professor of the Department of Traumatology and Orthopedics, National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: vmmaiko@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-0715-4104>

Ruslan Sheremeta, PhD, Assistant of the Department of Pathological Anatomy, National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: cheremetavolos79@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0007-4243-3399>

Conflicts of interests. Authors declare the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

Authors' contribution. R.A. Kuzmov — data collection and analysis; V.H. Lutsyshyn — final approval of the article, formation of the study model; O.Yu. Branitskyi — formatting the article in accordance with the journal requirements; V.S. Sobko — work with literature sources; V.M. Maiko — statistical analysis; R.O. Sheremeta — graphic design of the publication.

Кузьмов Р.А., Луцишин В.Г., Браніцький О.Ю., Собко В.С., Майко В.М., Шеремета Р.О.
Вінницький національний медичний університет ім. М.І. Пирогова, м. Вінниця, Україна

Особливості комп'ютерно-томографічних показників у пацієнтів із масивними дефектами кінцівок після мінно-вибухових уражень за різних типів реконструктивної пластики

Резюме. Актуальність. Значні за обсягом ушкодження кінцівок після мінно-вибухової травми потребують не лише вдалої реконструктивної пластики, але й об'єктивного інструментального контролю перебігу післяопераційної тканинної перебудови. Одним із таких засобів, що дозволяє виконати це, є комп'ютерна томографія (КТ), яка надає інформацію про стан клаптя, навколишніх тканин і судинного компонента реконструйованого сегмента. **Мета:** вивчити особливості КТ-показників післяопераційного клаптя в пацієнтів із масивними дефектами кінцівок після мінно-вибухових уражень протягом 6 місяців спостереження при застосуванні різних типів реконструктивної пластики. **Матеріали та методи.** У дослідженні взяли участь 110 осіб із масивною мінно-вибуховою травмою кінцівки, яким виконували 5 видів реконструктивної пластики. У післяопераційному періоді одразу після операції, через 3 та 6 місяців пацієнтам проводили КТ-дослідження на томографі Aquilion Prime SP TSX-303B/5C з аналізом таких показників, як щільність клаптя й навколишніх тканин, просвіт артерії і вени, контрастне накопичення, довжина та просвіт венграфта. **Результати.** Аналіз змішаних моделей показав, що час спостереження вірогідно впливав практично на всі досліджувані показники, окрім просвіту артерії. Тип пластики був значущим для показників щільності клаптя, максимальної

щільності навколишніх тканин, просвіту вени, контрастного накопичення й просвіту венграфта. Водночас взаємодія типу пластики з часом не була статистично значущою для жодного показника. При аналізі часових змін показників встановлено, що незалежно від виду пластики через 6 місяців мінімальна щільність клаптя зростала на 9,470 одиниці Гаунсфілда (HU), максимальна щільність клаптя — на 7,961 HU, мінімальна щільність навколишніх тканин — на 8,391 HU, а контрастне накопичення — на 11,537 %. Просвіт артерії істотно не змінювався, тоді як просвіт вени й венграфта зменшувався. Найсильніший зв'язок з типом пластики встановлено для контрастного накопичення: $\eta^2 = 0,455$ одразу після операції, $\eta^2 = 0,405$ через 3 місяці та $\eta^2 = 0,339$ через 6 місяців. Усі кореляції досліджуваних показників із функціональністю сегмента були слабкими. Найбільше за модулем значення мало контрастне накопичення через 3 місяці спостереження ($r = -0,211$). **Висновки.** Зміни в досліджуваних КТ-показниках відображають переважно морфологічну й судинно-тканинну перебудову після реконструктивної пластики, найбільш інформативними серед них є щільність тканин і контрастне накопичення.

Ключові слова: реконструктивна пластика; комп'ютерна томографія; масивні дефекти кінцівок; мінно-вибухові ушкодження; хірургія

Камінська М.О.¹, Дігтяр В.А.¹, Яресько О.В.²

¹Дніпровський державний медичний університет, м. Дніпро, Україна

²ДУ «Інститут патології хребта та суглобів ім. проф. М.І. Ситенка НАМН України», м. Харків, Україна

Біомеханічне обґрунтування місця проведення пластини при хірургічній корекції ліycopодібної деформації грудної клітки

Резюме. Актуальність. Мінімально інвазивна торакопластика за методом D. Nuss є стандартом лікування ліycopодібної деформації грудної клітки, проте взаємодія імплантату з каркасом часто викликає ускладнення (зміщення пластини, хронічний біль). Більшість сучасних досліджень напружено-деформованого стану фокусується лише на комплексі «грудина — ребра», не враховуючи хребетний стовп та мобільність реберно-хребцевих суглобів. **Мета:** провести порівняльний аналіз особливостей розподілу напружено-деформованого стану в біомеханічній системі «грудина — ребра — хребет» при хірургічній корекції ліycopодібної деформації грудної клітки залежно від анатомічного рівня проведення пластини.

Матеріали та методи. Створено математичну скінченно-елементну модель грудної клітки з урахуванням хребетного стовпа та фізіологічної рухливості реберно-хребцевих з'єднань. Проведено порівняння двох варіантів торакопластики: традиційного проведення короткої пластини через IV–V міжребер'я та використання пластини власної конструкції, встановленої через VI–VII міжребер'я. Моделювання виконували в середовищах SolidWorks та ANSYS. Оцінювання напруженого стану проводили за критерієм еквівалентних напружень за Мізесом. **Результати.** При традиційному проведенні пластини через IV–V міжребер'я максимальні напруження в опорних ребрах досягали 22,4 МПа, а в структурах хребта — 9,9 МПа. При використанні пластини власної конструкції на рівні VI–VII міжребер'я максимальні напруження в ребрах знижувалися до 14,0 МПа, а в хребцях — до 2,4 МПа. Встановлено більш рівномірний розподіл навантаження в системі «грудина — ребра — хребет» та зменшення перевантаження реберно-хребцевих суглобів. Помірне підвищення напружень у зоні контакту «пластина — грудина» не мало критичного впливу на кісткові структури. **Висновки.** Проведення коригувальної пластини через VI–VII міжребер'я забезпечує більш сприятливі біомеханічні показники порівняно з традиційною методикою. Використання пластини власної конструкції дозволяє знизити напруження в ребрах та структурах хребта, поліпшити розподіл навантаження й потенційно зменшити ризик післяопераційних ускладнень при хірургічній корекції ліycopодібної деформації грудної клітки.

Ключові слова: ліycopодібна деформація грудної клітки; торакопластика; метод скінченних елементів; напружено-деформований стан; хребет; пластина

Вступ

Ліycopодібна деформація грудної клітки (ЛДГК) є найпоширенішою вродженою вадою розвитку передньої стінки грудної клітки [1]. Протягом останніх десятиліть стандартом її лікування залишається мінімально інвазивна торакопластика за методом D. Nuss (MIRPE) [2]. Попри високу клінічну ефек-

тивність, механічна взаємодія між імплантатом та кістково-хрящовим каркасом пацієнта нерідко призводить до таких ускладнень, як нестабільність і зміщення пластини, хронічний больовий синдром та прорізування ребер [3, 4]. Це зумовлює необхідність детального біомеханічного планування втручання.

Сучасні дослідження напружено-деформованого стану (НДС) за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) здебільшого фокусуються на ізолюваному аналізі комплексу «грудина — ребра» [5, 6]. При цьому роль хребетного стовпа та мобільності реберно-хребцевих суглобів у загальному розподілі навантажень після торакопластики вивчалася недостатньо. Досі залишається дискусійним питання, як саме рівень міжреберного проміжку, через який проводиться пластина, впливає на зміну НДС грудної клітки та хребта та яким чином реалізується їхня взаємодія.

Мета: провести порівняльний аналіз особливостей розподілу напружено-деформованого стану в біомеханічній системі «грудина — ребра — хребет» при хірургічній корекції ліycopодібної деформації грудної клітки залежно від анатомічного рівня проведення пластины.

Матеріали та методи

Для побудови розрахункової математичної моделі за основу було взято геометрію хребта, розроблену в лабораторії біомеханіки ДУ «Інститут патології хребта та суглобів ім. проф. М.І. Ситенка НАМН України». Створено розрахункову динамічну математичну модель грудної клітки з ліycopодібною

деформацією, що враховує хребетний стовп та фізіологічну рухливість у суглобових з'єднаннях ребер із хребцями [7].

У дослідженні розглянуто та порівняно два клінічні варіанти торакопластики: варіант I — використання стандартної короткої дуги-пластини, проведеної традиційно на рівні IV–V міжребер'я (рис. 1); варіант II — використання пластины власної конструктивної форми, проведеної на нижчому рівні, а саме через VI–VII міжребер'я (рис. 2).

Анатомічні параметри та закономірності функціонального руху ребер верифіковано за даними закордонних досліджень R. Schwend та Z. Li [8]. Матеріали вважали однорідними та ізотопними. Механічні характеристики (E — модуль пружності Юнга, ν — коефіцієнт Пуассона) було відібрано з джерел літератури. Модель будували у програмі SolidWorks. Основні розрахунки зроблені з використанням програми ANSYS. Для оцінювання напруженого стану використовували еквівалентні напруження за Мізесом як найбільш інформативний критерій міцності.

Результати

За допомогою проведеного моделювання (варіант I) визначено, що в разі використання короткої пластины для корекції ліycopодібної деформації на

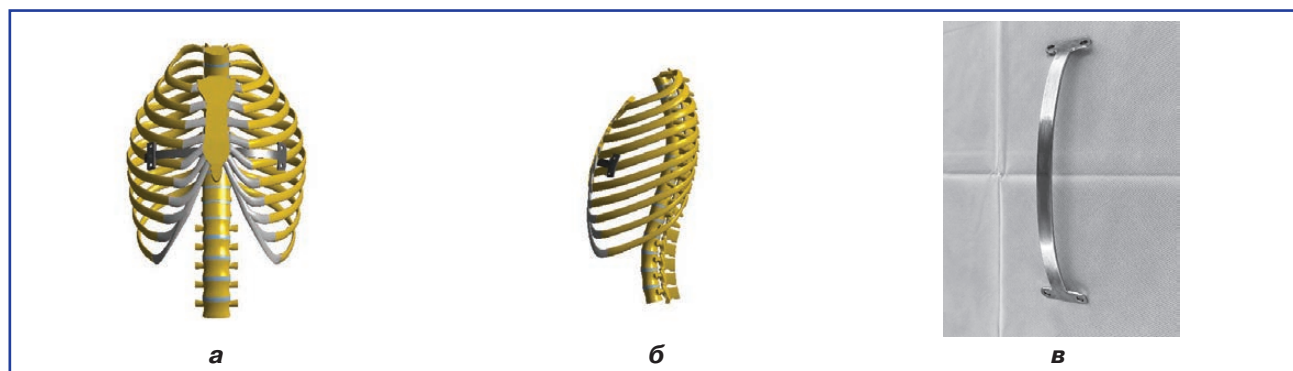


Рисунок 1. Розрахункова модель зі стандартною короткою пластиною на рівні IV–V міжребер'я: а — вигляд спереду; б — вигляд у сагітальній площині; в) дуга-пластина

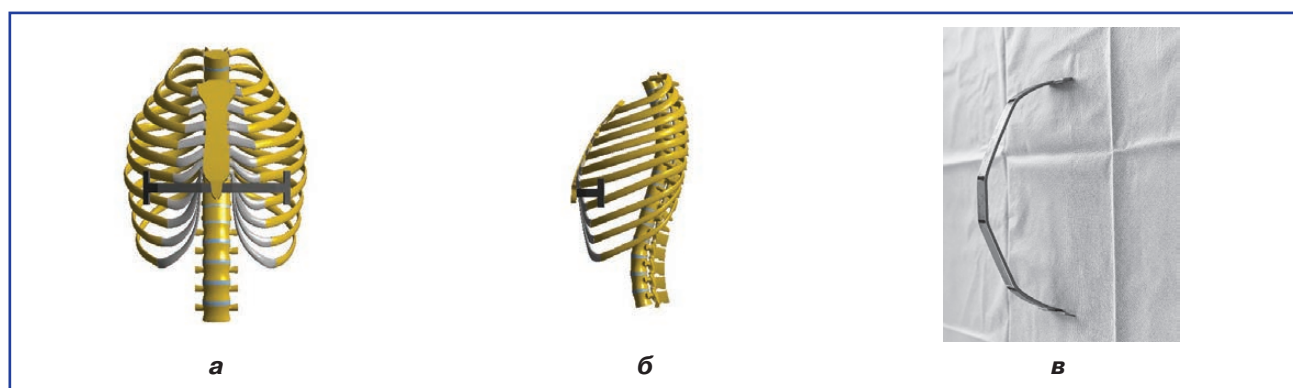


Рисунок 2. Розрахункова модель з чотирьохопорною пластиною, проведеною на рівні VI–VII міжребер'я: а — вигляд спереду; б — вигляд у сагітальній площині; в) пластина власної конструктивної форми

рівні IV–V міжребер'я найбільшого напруження відчуває п'ята пара ребер. Максимальні за величиною напруження сягають позначки 22,4 МПа і спостерігаються на їхній латеральній та медіальній зовнішній поверхні. Це пояснюється тим, що коригувальна пластина своїми кінцями спирається саме на ці ребра. У ділянці контакту пластины з грудиною також виникає підвищений рівень напружень, їхня величина дорівнює 8,1 МПа (рис. 3). Отримані результати свідчать про нерівномірний розподіл механічного навантаження після хірургічної корекції та підтверджують основну роль ребер у сприйнятті коригувальних зусиль.

На наступному етапі вивчали розподіл напружень у хребетному стовпі при варіанті I. Аналіз показав, що підвищений напружений стан спостерігається в хребцях T1–T5, де показники напружень за Мізесом змінюються в діапазоні від 1,8 до 9,9 МПа. Зони концентрації напружень розташовані у верхній ребровій ямці та в коренях дуг хребців. Найбільші за величиною напруження в хребетному стовпі становлять 9,9 МПа і виникають у верхній ребровій ямці хребця T5 (рис. 4). Слід зазначити, що підвищений напружений стан хребця T1 також сягає високих значень, але на цей показник не слід звертати увагу, бо він зумовлений жорстким кріпленням

верхньої поверхні тіла цього хребця, тобто безпосередньо умовами моделювання для запобігання перекиданню моделі, а не самою методикою корекції деформації.

При моделюванні з використанням пластины власної конструктивної форми, проведеної на рівні VI–VII міжребер'я (варіант II), визначили, що найбільш напруженою є шоста і сьома пара ребер, у яких максимальні значення напружень за Мізесом досягають рівня 13,4 та 14,0 МПа відповідно. Зони з максимальним значенням напружень розташовані на їх латеральній та медіальній зовнішній поверхні (рис. 5).

У грудині найбільш напруженою є зона контакту пластины з грудиною, де величина напружень за Мізесом дорівнює 12,0 МПа.

У хребетному стовпі підвищений напружений стан спостерігається в хребцях T6–T7. Зони концентрації напружень розташовані у верхній ребровій ямці та в коренях дуг хребців і змінюються в діапазоні 2,1–2,4 МПа. Зона з максимальним значенням напружень за Мізесом 2,4 МПа в хребетному стовпі розташована у верхній ребровій ямці хребця T7. Слід зазначити, що підвищений рівень напружень у хребці T1 (2 МПа) зумовлений фіксацією верхньої поверхні тіла хребця у розрахунковій моделі (рис. 6.)

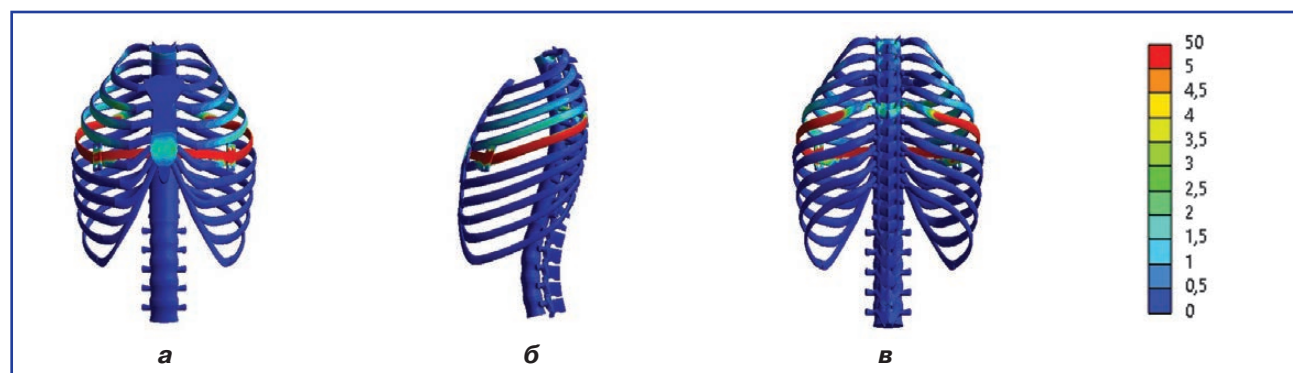


Рисунок 3. Розподіл напружень за Мізесом в розрахунковій моделі з короткою пластиною на рівні IV–V міжребер'я при корекції лійкоподібної деформації: а — вигляд спереду; б — у сагітальній площині; в — ззаду

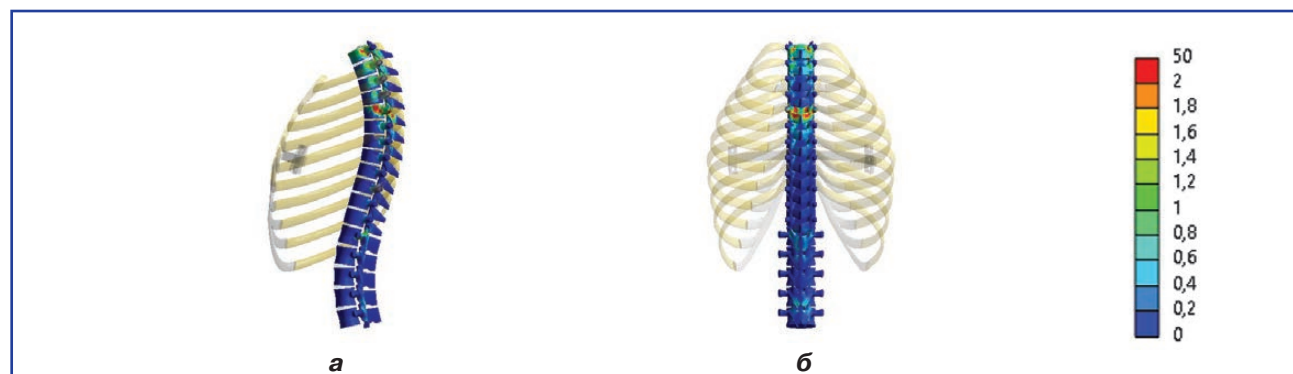


Рисунок 4. Розподіл напружень за Мізесом у хребетному стовпі у розрахунковій моделі з короткою пластиною на рівні IV–V міжребер'я при корекції лійкоподібної деформації: а — вигляд у сагітальній площині; б — вигляд ззаду

Порівняльний аналіз напруженого стану в ребрах обох моделей поданий на рис. 7. Варіант проведення пластини на рівні VI–VII міжребер'я з опорою на пари ребер VI–VII дозволяє отримати менш напружений стан в опорних ребрах 14,0 МПа (22,4 МПа у варіанті з опорою на V пару ребер). В інших парах ребер НДС майже не змінюється.

Порівняльний аналіз напруженого стану у хребцях обох моделей поданий на рис. 8. Як і для ребер грудної клітки, НДС хребтового стовпа при проведенні пластини на рівні VI–VII міжребер'я змінився. Максимальне значення напруження за Мізесом у місці контакту ребер з хребцями зменшилось більш ніж утричі і дорівнює 2,4 МПа

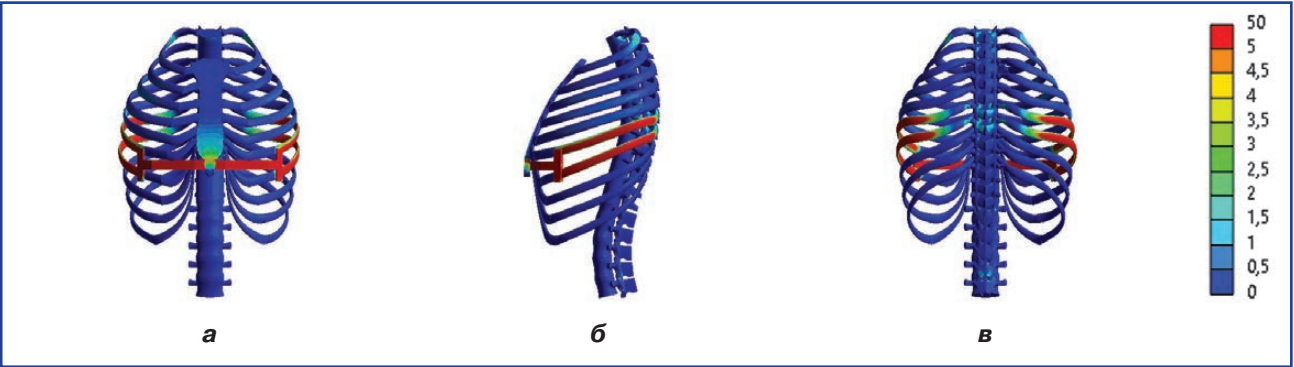


Рисунок 5. Розподіл напружень за Мізесом у розрахунковій моделі з пластиною власної конструктивної форми на рівні VI–VII міжребер'я при корекції лікоподібної деформації: а – вигляд спереду; б – у сагітальній площині; в – ззаду

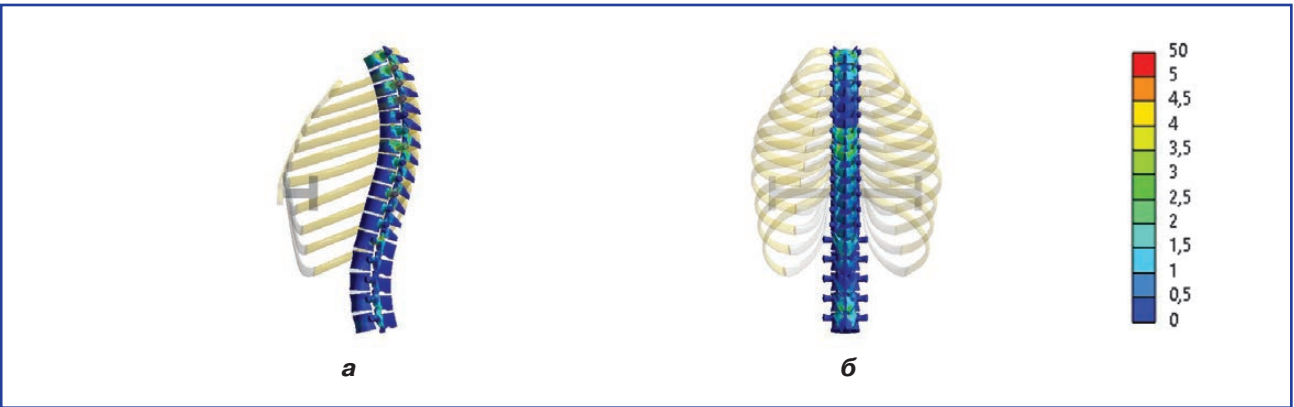


Рисунок 6. Розподіл напружень за Мізесом у хребтному стовпі у розрахунковій моделі з короткою пластиною власної конструктивної форми на рівні VI–VII міжребер'я при корекції лікоподібної деформації: а – вигляд у сагітальній площині; б – вигляд ззаду

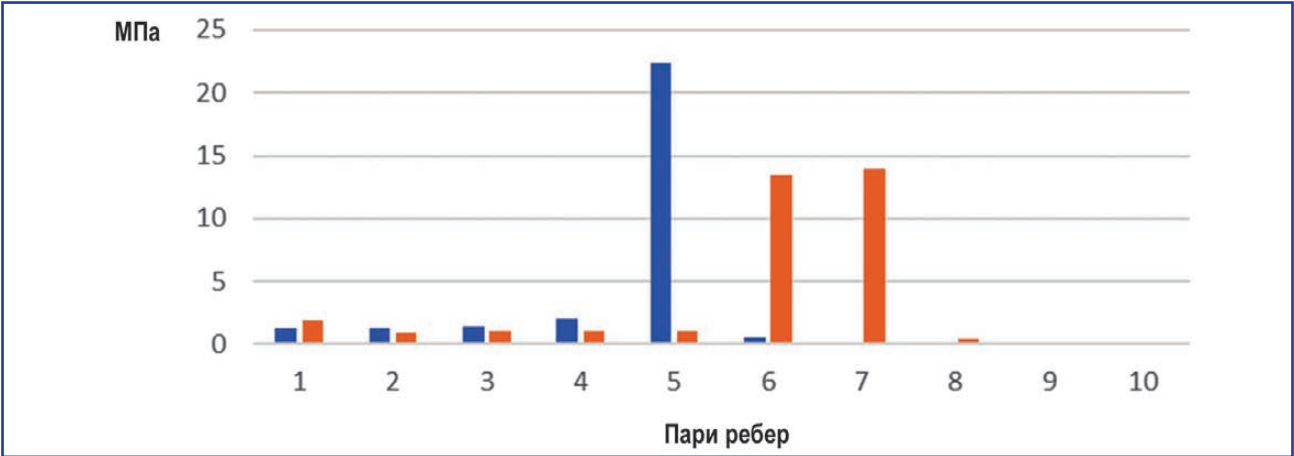


Рисунок 7. Діаграма порівняльних максимальних значень напружень за Мізесом в ребрах у розрахункових моделях грудної клітки

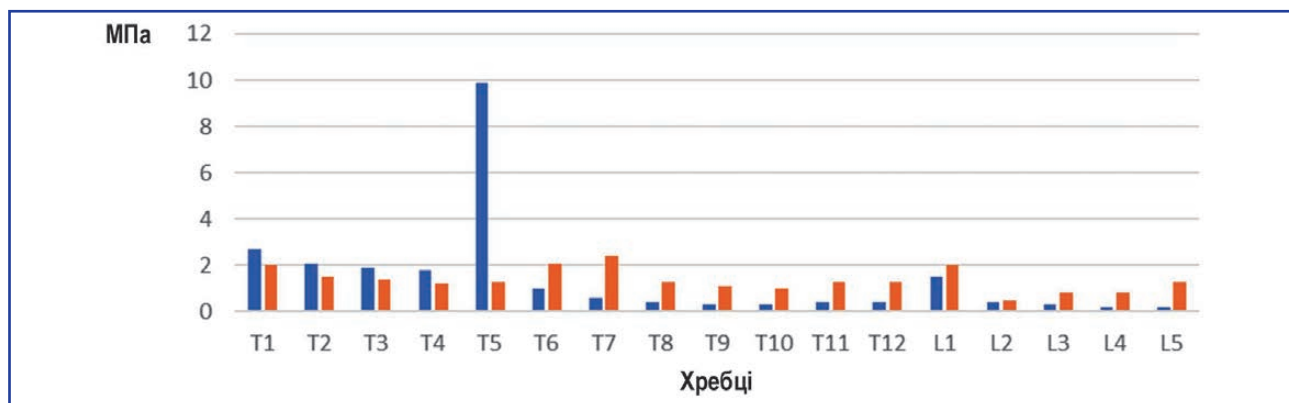


Рисунок 8. Діаграма порівняльних максимальних значень напружень за Мізесом у хребцях у розрахункових моделях грудної клітки

(9,9 МПа у варіанті з опорою на V пару ребер). Також для пластини з опорою на VI–VII пари ребер розподіл напружень у хребетному стовпі більш рівномірний, а для пластини з опорою на V пару ребер більш напруженими є хребці, які розташовані вище опорної пари ребер.

Враховуючи наведені дані, визначили переваги використання пластини власної конструктивної форми, проведеної на рівні VI–VII міжребер'я (варіант II): по-перше, максимальне напруження в ребрах знизилось з 22,4 до 14,0 МПа (37 %), а його розподіл між ребрами став більш рівномірним; по-друге, спостерігається кардинальне поліпшення біомеханічних показників (зони підвищеного НДС обмежуються виключно сегментом Т6–Т7, а еквівалентні напруження знижуються більше ніж у 3 рази — до діапазону 2,1–2,4 МПа, максимальне значення напруження у верхній ребровій ямці хребця Т7 становить лише 2,4 МПа (зменшення на 75,8 %), що вказує на виражене біомеханічне розвантаження хребта та реберно-хребцевих суглобів); по-третє напруження в зоні контакту «пластина — грудина» зростає і становить 12,0 МПа, але не викликає руйнування тканин.

Таким чином, аналіз розподілу еквівалентних напружень за Мізесом продемонстрував виражену залежність у біомеханічній системі «грудина — ребра — хребет» при хірургічній корекції лікоподібної деформації грудної клітки від рівня розташування і конструкції пластини.

Обговорення

Порівняльний аналіз двох моделей свідчить, що зміщення рівня проведення пластини в дистальному напрямку (до VI–VII міжребер'я) забезпечує суттєві біомеханічні переваги. Зниження максимальних напружень в опорних ребрах з 22,4 до 14,0 МПа мінімізує ризик механічної деструкції кісткової тканини та прорізування імплантату. Особливо показовим є зменшення максимальних напружень у місцях контакту ребер із хребцями більше ніж утричі — з 9,9 до 2,4 МПа, що супроводжується значно одноріднішим розподілом

НДС у всьому грудному сегменті хребта. При вищому проведенні фіксатора (варіант I) зони перевантаження зміщуються на хребці, розташовані вище опорної пари ребер, створюючи передумови для стійкого больового синдрому в міжлопатковій ділянці.

Отримані нами дані частково корелюють із результатами відомого дослідження L. Хіе та співавт. [9]. Автори на основі даних КТ побудували тривимірну модель грудної клітки пацієнта з ЛДГК та за допомогою МСЕ симулювали підйом грудини на 15–35 мм при розташуванні пластини у 2, 3, 4 та 5-му міжребер'ях. За критеріями індексу Галлера та загального розподілу НДС вони визначили 4-те міжребер'я як оптимальне для корекції. Проте розроблена L. Хіе модель мала суттєве обмеження — вона взагалі не враховувала хребетний стовп, що нівелювало можливість оцінки реактивних сил у реберно-хребцевих суглобах.

Питання розподілу навантаження при використанні кількох точок опори також детально досліджувалося в роботі B.Y. Lim та співавт. [10]. За допомогою скінченно-елементного моделювання ротаційних та рівноважних зміщень автори встановили, що збільшення кількості пластин або залучення додаткових зон контакту забезпечує суттєві переваги щодо розподілу тиску на кістковий каркас грудної клітки. Проте дослідники акцентують на тому, що при використанні двох пластин виникає ризик фокусного перевантаження верхніх елементів конструкції, що потребує ретельного контролю міцності. У нашому дослідженні застосування оригінальної геометрії форми пластини (варіант II) дозволило ефективно не лише розвантажити реберні дуги (зниження напруження на 37,5 %), а й запобігти перевантаженню верхньогрудних сегментів хребта, забезпечивши плавний біомеханічний профіль розподілу сил.

Отримані нами дані щодо перерозподілу НДС та важливості конструктивних параметрів пластини мають чітку кореляцію із сучасними дослідженнями. У роботі D. Pérez та співавт. [11] на основі математичного моделювання прикладання сили в 250 Н до грудної стінки було доведено, що форма і довжина пластини є ключовими детермінантами її післяопераційної ста-

більності. Автори продемонстрували, що традиційні довгі U-подібні пластини генерують великі незбалансовані крутні моменти в точках фіксації, провокуючи латеральне зміщення та ротацію, тоді як оптимізація форми пластини дозволяє усунути дестабілізуючі зусилля. Отримані результати повністю підтверджують доцільність застосування розробленої нами пластини оригінальної конструкції, оскільки вона забезпечує значне зменшення ротаційного моменту та ризику зміщення завдяки залученню міжребер'я як анатомічного елемента фіксації, щільне прилягання до груднини й мінімізацію локальних напружень у зонах контакту.

Висновки

При проведенні пластини через VI–VII міжребер'я показники напружено-деформованого стану математичної моделі лійкоподібної деформації грудної клітки є значно нижчими, ніж при традиційній корекції через IV–V міжребер'я. При більш низькому проведенні пластини необхідна корекція деформації досягається з переважно кращими показниками напружено-деформованого стану біомеханічної системи «грудина — ребра — хребет», а саме зниження максимальних напружень в опорних ребрах на 37,5 % (з 22,4 до 14,0 МПа) та в структурах хребта більше ніж утричі (з 9,9 до 2,4 МПа). Це дозволяє зменшити навантаження в грудному відділі хребта, запобігти виникненню стійкого післяопераційного больового синдрому та ризику ятрогенних деформацій хребта. Помірне підвищення напруження в зоні контакту пластини з грудиною при низькому встановленні пластини до 12 МПа є фізіологічно безпечним для кісткових структур нижньої третини грудної стінки і повністю компенсується використанням пластини власної конструктивної форми, яка рівномірно розподіляє зусилля на дві суміжні реберні дуги.

Застосування коригувальної пластини власної конструктивної форми на рівні VI–VII міжреберного проміжку є обґрунтованим рішенням при хірургічній корекції ЛДГК, що дозволяє отримати стабільну фіксацію у фронтальній площині в загрудинному просторі, досягти необхідного ортопедичного ефекту відновлення форми грудної клітки, мінімізувати частоту післяопераційних ускладнень, пов'язаних з деторсійним зміщенням пластини, при суттєвому зниженні біомеханічної напруженості у системі «грудина — ребра — хребет».

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів та власної фінансової зацікавленості при підготовці даної статті.

Інформація про фінансування. Джерело фінансування як наукової роботи, так і процесу публікації статті — кошти авторів.

Внесок авторів. Камінська М.О. — концепція і дизайн дослідження, аналіз отриманих даних, написання тексту; Дігтяр В.А. — концепція і дизайн дослідження; Яресько О.В. — збирання й обробка матеріалів.

Список літератури

1. Janssen N, Coorens NA, Franssen AJPM, et al. *Pectus excavatum and carinatum: a narrative review of epidemiology, etiopathogenesis, clinical features, and classification.* J Thorac Dis. 2024;16(2):1687-1701. doi: 10.21037/jtd-23-957.
2. Nuss D, Obermeyer RJ, Kelly RE. *Nuss bar procedure: past, present and future.* Ann Cardiothorac Surg. 2016 Sep;5(5):422-433. doi: 10.21037/acs.2016.08.05.
3. Binkovitz LE, Zendejas B, Moir CR, Binkovitz LA. *Nuss bar migrations: occurrence and classification.* Pediatr Radiol. 2016;46(13):1797-1803. doi: 10.1007/s00247-016-3688-6.
4. Kelly RE Jr, Mellins RB, Shamberger RC, et al. *Multi-center study of pectus excavatum, final report: complications, static/exercise pulmonary function, and anatomic outcomes.* J Am Coll Surg. 2013;217(6):1080-1089. doi: 10.1016/j.jamcoll-surg.2013.06.019.
5. Nagasao T, Miyanagi T, Wu L, Akaike M, Hosokawa A, Sakamoto Y. *Biomechanical evaluation of additional surgical maneuvers to improve symmetry in performing Nuss procedure for asymmetric pectus excavatum.* ePlasty. 2023;23:e65. doi: 10.1097/EP9.000000000000065.
6. Wang H, Yang J, Liu W, Xia H. *Finite Element Analysis-Aided Design of Customized Nuss Bar in Pectus Excavatum Surgery.* Ann Thorac Surg. 2018 Sep;106(3):938-939. doi: 10.1016/j.athoracsur.2018.01.086.
7. Kaminska MO, Dihtiar VA, Yaresko OV. *Mathematical modeling of the chest, its funnel-shaped deformity and thoracoplasty.* Ortop Travmatol Protez. 2021;(2):17-22. doi: 10.15674/0030-59872021217-22.
8. Schwend RM, Schmidt JA, Reigut JL, Blakemore LC, Akbarnia BA. *Patterns of rib growth in the human child.* Spine Deformity. 2015;3(4):297-302. doi: 10.1016/j.jspd.2015.01.007.
9. Xie L, Cai S, Xie L, Chen G, Zhou H. *Development of a computer-aided design and finite-element analysis combined method for customized Nuss bar in pectus excavatum surgery.* Sci Rep. 2017 Jun 14;7(1):3543. doi: 10.1038/s41598-017-03622-y.
10. Lim BY, Yi H, Lee C. *Biomechanical effectivity evaluation of single- and double-metal-bar methods with rotation and equilibrium displacements in Nuss procedure simulations.* Ann Biomed Eng. 2024;52:1067-1077. doi: 10.1007/s10439-024-03441-z.
11. Pérez D, et al. *Does the modelling of the pectus bar affect its stability? Rationale for using a short flat bar.* Interactive CardioVascular and Thoracic Surgery. 2019;29(2):285-290. doi: 10.1093/icvts/ivz051.

Отримано/Received 11.04.2026

Рецензовано/Revised 22.05.2026

Прийнято до друку/Accepted 04.06.2026

Information about authors

Marianna O. Kaminska, PhD in Medicine, Associate Professor at the Department of Pediatric Surgery, Orthopedics and Traumatology, Dnipro State Medical University; e-mail: mkaminska0307@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-5895-9562>

Valerii A. Dihtiar, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Pediatric Surgery, Orthopedics and Traumatology, Dnipro State Medical University, Dnipro, Ukraine; e-mail: Vdihtiar2017@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3182-2512>

Oleksandr V. Yaresko, Junior Research Fellow, Biomechanics Laboratory, Sytenko Institute of Spine and Joint Pathology of NAMSU, Kharkiv, Ukraine; e-mail: avyresko@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-2037-5964>

Conflicts of interests. Authors declare the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

Information about funding. The source of funding for both scientific work and the article publishing process is the authors' funds.

Authors' contribution. M.O. Kaminska — concept and design of the study, analysis of the data obtained, writing the text; V.A. Dihtiar — concept and design of the study; O.V. Yaresko — collection and processing of materials.

M.O. Kaminska¹, V.A. Dihtiar¹, O.V. Yaresko²

¹Dnipro State Medical University, Dnipro, Ukraine

²Sytenko Institute of Spine and Joint Pathology of NAMSU, Kharkiv, Ukraine

Biomechanical analysis of bar placement level during surgical correction of pectus excavatum

Abstract. Background. Minimally invasive thoracoplasty using the D. Nuss technique remains the standard treatment for pectus excavatum. However, interaction between the implant and the thoracic framework is frequently associated with complications, including bar displacement and chronic pain syndrome. Most contemporary studies investigating the stress-strain state focus primarily on the “sternum-ribs” complex without considering the spinal column and the mobility of the costovertebral joints. Objective: to perform a comparative analysis of stress-strain distribution patterns in the biomechanical “sternum-ribs-spine” system during surgical correction of pectus excavatum depending on the anatomical level of bar placement. **Materials and methods.** A finite element mathematical model of the chest wall was developed, incorporating the spinal column and physiological mobility of the costovertebral articulations. Two thoracoplasty techniques were compared: conventional placement of a short bar through the IV–V intercostal spaces and placement of a custom-designed bar through the VI–VII intercostal spaces. Modeling was performed using SolidWorks and ANSYS software. Stress distribution was evaluated

according to the von Mises equivalent stress criterion. **Results.** With conventional bar placement through the IV–V intercostal spaces, maximum stresses in the supporting ribs reached 22.4 MPa, while stresses in the spinal structures reached 9.9 MPa. In contrast, placement of the custom-designed bar at the VI–VII intercostal level reduced maximum stresses to 14.0 MPa in the ribs and 2.4 MPa in the vertebrae. A more uniform load distribution within the “sternum-ribs-spine” system and reduced overload of the costovertebral joints were observed. Moderate stress elevation in the “bar-sternum” contact zone did not produce a critical effect on osseous structures. **Conclusions.** Placement of the corrective bar through the VI–VII intercostal spaces provides more favorable biomechanical characteristics compared with the conventional technique. The use of a custom-designed bar reduces stress levels in the ribs and spinal structures, improves load distribution, and may potentially decrease the risk of postoperative complications following surgical correction of pectus excavatum.

Keywords: pectus excavatum; thoracoplasty; finite element method; stress-strain state; spine; bar

Труфанов І.І.

Запорізький державний медико-фармацевтичний університет, Запорізький військовий госпіталь,
м. Запоріжжя, Україна

Іпсилатеральні переломи кісток таза та стегнової кістки (флотуюче стегно) при бойовій травмі: клінічний досвід лікування у військовому госпіталі

Резюме. Актуальність. Іпсилатеральні переломи кісток таза та стегнової кістки, відомі як флотуюче стегно (floating hip), належать до найбільш тяжких варіантів поєднаної травми опорно-рухового апарату, вони часто супроводжуються політравмою, значною крововтратою та пов'язані з високим ризиком розвитку ускладнень. У сучасних умовах бойових дій частота складних високоенергетичних ушкоджень, спричинених вибуховими й вогнепальними факторами, зростає, що зумовлює появу нових клінічних варіантів поєднаних переломів навколо кульшового суглоба. **Мета дослідження:** проаналізувати клінічні особливості й результати лікування пацієнтів з іпсилатеральними переломами таза та стегнової кістки (флотуюче стегно) при бойовій і високоенергетичній травмі. **Матеріали та методи.** Дослідження виконано на базі травматологічного відділення військової частини А3309 (м. Запоріжжя). У період 2024–2025 років проведено аналіз лікування 7 пацієнтів з іпсилатеральними переломами таза та стегнової кістки. Серед пацієнтів було 6 чоловіків (85,7 %) та 1 жінка (14,3 %). У всіх випадках травма була спричинена високоенергетичним механізмом, включно з бойовими вогнепальними ушкодженнями. У лікуванні застосовувалася поетапна хірургічна тактика, що передбачала первинний остеосинтез стегнової кістки з подальшою стабілізацією тазового кільця або кульшової западини. **Результати.** Повне зрощення переломів було досягнуто в усіх пацієнтів. Інфекційні ускладнення та випадки незрощення не спостерігалися. Неврологічний дефіцит і вкорочення кінцівки — по одному випадку (14,3 %). Отримані результати відповідають даним світової літератури щодо частоти ускладнень при флотуючому стегні. **Висновки.** Іпсилатеральні переломи таза та стегнової кістки при бойовій травмі є рідкісним, але тяжким варіантом поєднаних ушкоджень опорно-рухового апарату. Поетапна стабілізація переломів з первинним остеосинтезом стегнової кістки є ефективною тактикою лікування таких пацієнтів.

Ключові слова: флотуюче стегно; переломи таза; перелом стегнової кістки; бойова травма; політравма; остеосинтез

Вступ

Поєднані переломи кісток таза та стегнової кістки належать до найбільш тяжких ушкоджень опорно-рухового апарату, вони часто супроводжуються політравмою, значною крововтратою і пов'язані з високим ризиком розвитку ускладнень. Одним з варіантів таких ушкоджень є так зване флотуюче стегно (floating

hip) — поєднання іпсилатеральних переломів тазового кільця або кульшової западини з переломом стегнової кістки, що призводить до функціонального відокремлення сегмента нижньої кінцівки від основного скелета [1–3]. Термін floating hip був запропонований Liebergall та співавторами у 1992 році для опису комбінації переломів тазового кільця або кульшової запади-

© «Травма» / «Trauma» («Травма»), 2026

© Видавець Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2026

Для кореспонденції: Труфанов Іван Іванович, кандидат медичних наук, доцент, лейтенант медичної служби, ординатор травматологічного відділення Запорізького військового госпіталю (в/ч А3309), доцент кафедри травматології та ортопедії Запорізького державного медико-фармацевтичного університету, бульвар Марії Примаченко, 26, м. Запоріжжя, Україна, e-mail: trufanovivan367@gmail.com, тел.: +380 (50) 560-20-70, <https://orcid.org/0000-0003-1628-1268>

For correspondence: Ivan Trufanov, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Traumatology and Orthopaedics of Zaporizhzhia Medical and Pharmaceutical University, Orthopaedic surgeon, Zaporizhzhia Military Hospital, Lt; e-mail: trufanovivan367@gmail.com, phone: +380 (50) 560-20-70, <https://orcid.org/0000-0003-1628-1268>

Full list of author information is available at the end of the article.

ни з переломом стегнової кістки на тій самій стороні [3]. У більшості випадків такі ушкодження виникають унаслідок високоенергетичної травми, зокрема дорожньо-транспортних пригод або падіння з висоти, і часто супроводжуються множинними ушкодженнями інших анатомічних ділянок [1, 2, 4].

У сучасних умовах бойових дій характер травматичних ушкоджень зазнає суттєвих змін. Зростає частота складних комбінованих переломів, спричинених вибуховими й вогнепальними факторами. Подібні ушкодження можуть відповідати критеріям флотуючого стегна, однак мають низку клінічних особливостей, зокрема значне ушкодження м'яких тканин, високий ризик інфекційних ускладнень і складність реконструктивного лікування. Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених переломам таза та стегнової кістки, питання оптимальної тактики лікування пацієнтів із флотуючим стегном залишається дискусійним. У літературі обговорюються різні підходи до послідовності оперативного лікування, зокрема первинна стабілізація стегнової кістки або тазового кільця, що значною мірою залежить від тяжкості травми, стану м'яких тканин і загального стану постраждалого [4–7]. Особливої уваги потребують випадки флотуючого стегна, пов'язані з бойовими ушкодженнями, оскільки такі травми часто мають складніший характер і супроводжуються тяжкими пошкодженнями м'яких тканин.

Мета: проаналізувати клінічні особливості й результати лікування пацієнтів з іпсилатеральними переломами таза та стегнової кістки (флотуюче стегно) при бойовій і високоенергетичній травмі.

Матеріали та методи

Дослідження виконано на базі травматологічного відділення військової частини А3309 (м. Запоріжжя). У період 2024–2025 років проведено аналіз лікування 7 пацієнтів з іпсилатеральними переломами таза

та стегнової кістки, яким надавалася хірургічна допомога: чоловіки — 6 пацієнтів (85,7 %), жінки — 1 (14,3 %). Критерієм включення було поєднання перелому таза або кульшової западини з переломом стегнової кістки на одній стороні. Дослідження має ретроспективний характер. Дослідження проведено відповідно до принципів Гельсінської декларації. Персональні дані пацієнтів були деперсоналізовані, а вся інформація використовувалася виключно з науковою метою.

У структурі ушкоджень найбільш часто зустрічались міжвертлюгові переломи стегнової кістки в поєднанні з двоколонними переломами вертлюгової западини — 2 випадки (28,6 %), переломи латеральної маси крижа в поєднанні з переломом стегнової кістки — 2 випадки (28,6 %), а також вогнепальні переломи таза з переломом проксимального відділу стегнової кістки — 2 випадки (28,6 %). Один випадок (14,3 %) становило поєднання вивиху стегнової кістки з розривом лобкового симфізу та крижово-клубового зчленування.

У лікуванні застосовували поетапну хірургічну тактику. На першому етапі виконували остеосинтез стегнової кістки, на наступному етапі проводилася стабілізація тазового кільця або кульшової западини. У тяжких випадках застосовувалася тимчасова стабілізація апаратом зовнішньої фіксації (рис. 1).

Для фіксації задніх структур таза використовувався доступ Кохера — Лангенбека (рис. 2).

На жаль, у бойових умовах трапляються ушкодження, які можливо віднести до таких, що неможливо реконструювати. Наводимо приклад такого тяжкого ушкодження внаслідок вибуху на тілі військового під час бою (імовірно, скид вибухового пристрою з дрона). Такі масивні ушкодження м'яких тканин по задньовнутрішній поверхні правого стегна продиктували нам для ефективного процесу лікування та дебрідменту обширної рани накладання колостоми, що й було виконано на 2-гу добу після поранення та

Таблиця 1. Характеристика клінічних випадків

№	Тип пошкодження	Метод остеосинтезу
1	Вивих стегна + розрив симфізу + розрив крижово-клубового зчленування	Металоостеосинтез пластиною та гвинтами
2	Міжвертлюговий перелом + двоколонний перелом вертлюгової западини	PFNA + металоостеосинтез пластинами
3	Міжвертлюговий перелом + перелом задньої стінки ацетабулума	PFNA + металоостеосинтез пластиною
4	Перелом латеральної маси крижа + перелом стегна	Інтрамедулярний остеосинтез
5	Перелом латеральної маси крижа + перелом стегна	Інтрамедулярний остеосинтез
6	Вогнепальний перелом таза + перелом проксимального стегна	АЗФ + остеосинтез
7	Вогнепальний перелом таза + перелом проксимального стегна	АЗФ

Примітки: PFNA — проксимальний стегновий антиротатійний стрижень; АЗФ — апарат зовнішньої фіксації.

первинного дебридменту рани хірургічною бригадою. Після стабілізації загального стану поранений був переведений на наступний рівень медичного забезпечення (рис. 3).

Результати

У всіх пацієнтів травма була високоенергетичною, включно з бойовими вогнепальними пораненнями й травмуванням під час дії факторів війни. Поетапна хірургічна тактика дозволила стабілізувати пошкоджені сегменти й забезпечити ранню мобілізацію пацієнтів (на 3-тю — 4-ту добу). Основні ускладнення ортопедичного лікування узагальнені в табл. 2.

В одному випадку виконано ранню ревізію післяопераційної рани з дебридментом, після чого рана загоїлася первинно. Частота післяопераційних ускладнень у нашій серії спостережень не перевищувала показники, описані у світовій літературі (табл. 3).

Аналіз структури ушкоджень показав, що найбільш поширеними були міжвертлюгові переломи стегнової кістки в поєднанні з двоколонними переломами вертлюгової западини, переломи латеральної маси крижа в поєднанні з переломом стегнової кістки та вогнепальні переломи таза з переломом проксимального відділу стегнової кістки — по 2 випадки (28,6 %). В одному випадку (14,3 %) відзначено поєднання вивиху стегнової кістки з розривом лобкового симфізу та крижово-клубового зчленування. У пацієнтів з тяжкими вогнепальними ушкодженнями подальше спостереження було обмежене у зв'язку з переведенням до медичних закладів наступного рівня медичного забезпечення військ.

Обговорення

Іпсилатеральні переломи кісток таза та стегнової кістки, відомі як флотуюче стegno, належать до рідкісних, але надзвичайно тяжких варіантів поєднаної

травми опорно-рухового апарату. Ці ушкодження майже завжди виникають унаслідок високоенергетичних механізмів травмування і часто супроводжуються політравмою, що суттєво ускладнює лікування таких пацієнтів.



Рисунок 1. Первинна ортопедична допомога пораненим з іпсилатеральними переломами — накладання апарата зовнішньої фіксації, сегмент «таз — стegno»

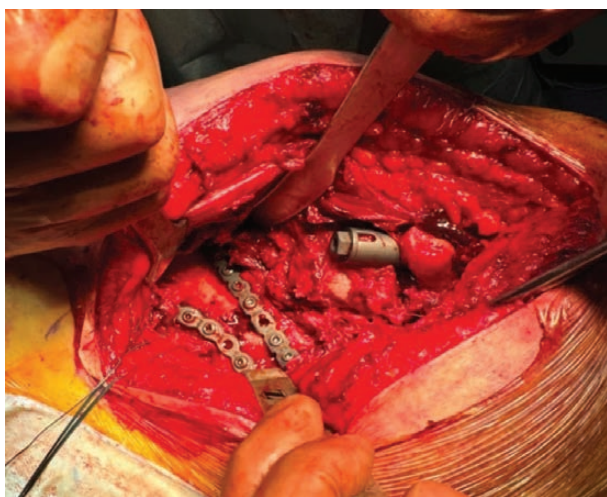


Рисунок 2. Проведення етапного оперативного втручання з фіксації кісток таза після оперативного втручання з приводу перелому проксимального відділу стегнової кістки: металоостеосинтез задньої колони таза двома попередньо вигнутими тазовими пластинами під гвинт 3,5 мм і проксимального відділу стегнової кістки — проксимальним стегновим антиротаційним блокуванням стрижнем

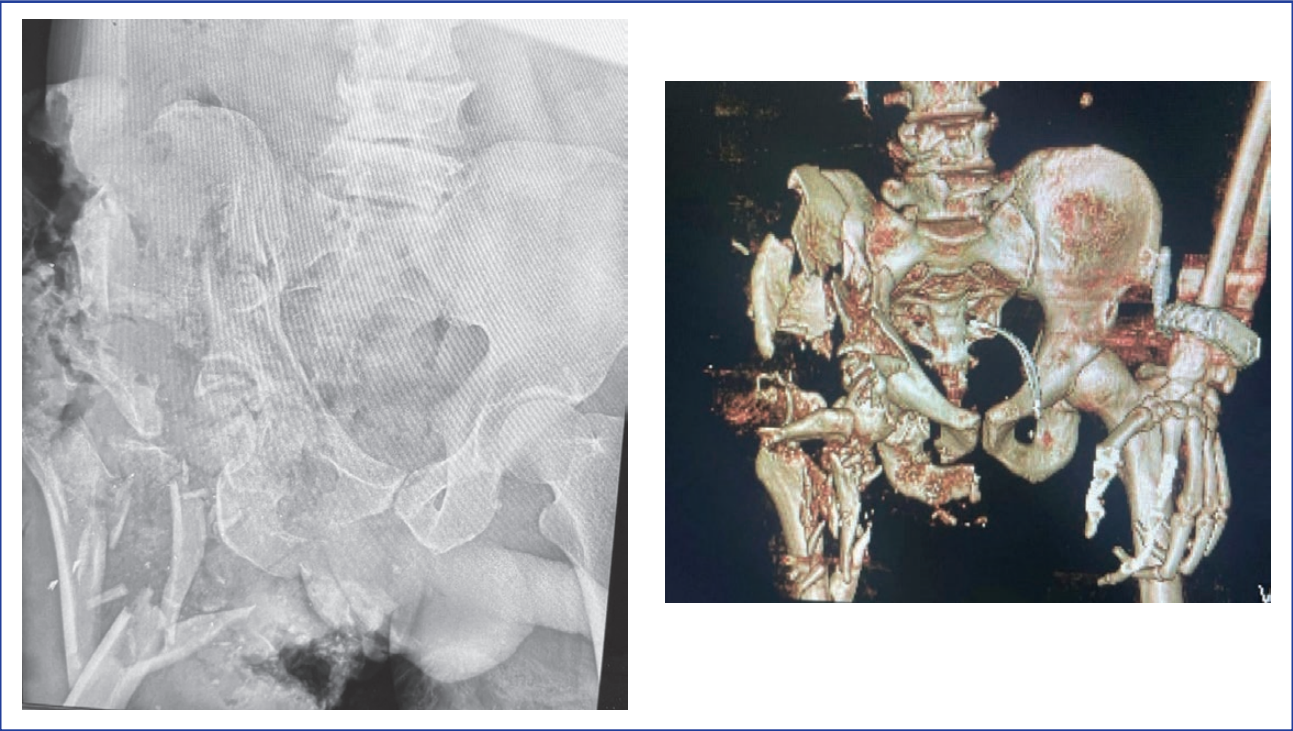


Рисунок 3. Вибухове розтрощення правої половини таза та проксимального відділу стегнової кістки

Таблиця 2. Основні ускладнення ортопедичного лікування

Показник	Кількість, n	Частота, %
Високоенергетична травма	7	100
Вогнепальна травма	2	28,6
Оперативне лікування	7	100
Неврологічний дефіцит	1	14,3
Інфекційні ускладнення	0	0
Незрощення	0	0
Укорочення кінцівки	1	14,3

Таблиця 3. Порівняльна характеристика результатів лікування флотуючого стегна за даними літератури (дані узагальнені за результатами опублікованих клінічних серій)

Автор	Рік	Кількість, n	Високо-енергетична травма, %	Оператив-не лікуван-ня, %	Інфекція, %	Незрощен-ня, %	Невро-логічні усклад-нення, %
Liebergall et al.	1992	17	100	82	6	12	18
Brioschi et al.	2008	32	94	90	8	9	15
Gänsslen et al.	2010	54	96	88	7	10	14
Giannoudis et al.	2013	41	93	91	10	8	17
Wong et al.	2023	42	90,5	100	9,5	7	16
Наше дослі-дження	2025	7	100 (бойова + високо-енергетична)	100	0	0	14,3

ентів [1, 2]. Комбінація переломів тазового кільця або вертлюгової западини з іпсилатеральним переломом стегнової кістки створює складну біомеханічну ситуацію, яка потребує ретельного планування хірургічної тактики й поетапної стабілізації ушкоджених сегментів. У класичному дослідженні А. Medina-Castellanos та співавт. зазначено, що флотуюче стegno є наслідком травм високої енергії та найчастіше виникає в пацієнтів молодого працездатного віку, причому переважають чоловіки [3]. Подібна тенденція спостерігалась і в нашому дослідженні, де більшість пацієнтів становили чоловіки, а механізм травми був пов'язаний з високоенергетичними ушкодженнями. Це узгоджується із сучасними епідеміологічними даними, відповідно до яких поєднані переломи таза та стегнової кістки переважно виникають у результаті дорожньо-транспортних пригод або падіння з висоти [2].

Особливу увагу в літературі приділяють вибору оптимальної хірургічної тактики лікування флотуючого стегна. Більшість авторів вважають, що першочерговим етапом лікування має бути стабілізація перелому стегнової кістки, оскільки це дозволяє відновити довжину і вісь кінцівки, полегшує подальшу репозицію переломів тазового кільця або вертлюгової западини та сприяє стабілізації загального стану пацієнта [1]. Подібний підхід застосовувався і в нашому дослідженні: в усіх випадках проводили первинну стабілізацію стегнової кістки з подальшим хірургічним лікуванням ушкоджень тазового кільця або кульшової западини. Сучасні дослідження свідчать, що пацієнти з флотуючим стегном характеризуються більшою тяжкістю травми, тривалішим перебуванням у стаціонарі та більшою частотою ускладнень порівняно з пацієнтами з ізольованими переломами таза або вертлюгової западини [1]. За даними Х. Zhou та співавт., у таких пацієнтів частіше спостерігаються супутні ушкодження, зокрема травми грудної клітки, черепно-мозкові травми й неврологічні порушення [2]. У нашій серії спостережень тяжкі ускладнення зустрічались відносно рідко, що може бути пов'язано як з невеликою кількістю пацієнтів, так і з застосуванням поетапної хірургічної тактики лікування.

Вітчизняні дослідження також підтверджують, що флотуюче стegno зазвичай виникає в пацієнтів з політравмою та характеризується значною різноманітністю клінічних форм і механізмів травмування [4–7]. За даними П.В. Танасієнка та співавт., у більшості випадків механізмом травми є прямий удар при високоенергетичному впливі, а найчастішими причинами є дорожньо-транспортні пригоди й падіння з висоти [5]. Отримані нами результати загалом узгоджуються із цими спостереженнями.

За період 2024–2025 років у травматологічному відділенні Запорізького військового госпіталю було проліковано 7 пацієнтів з іпсилатеральними переломами таза та стегнової кістки, що відповідає середній частоті приблизно 3–4 випадки на рік. За даними світової літератури, частота таких ушкоджень значною мірою залежить від рівня травматологічного центру та кількості

пацієнтів з політравмою. У більшості клінічних серій вона становить від 1 до 8 випадків на рік [1, 2], тоді як у великих спеціалізованих травматологічних центрах може перевищувати 10 випадків на рік. Отримані результати узгоджуються з даними літератури й підтверджують рідкісний характер цього виду травми.

Особливістю сучасних військових конфліктів є значне збільшення кількості вибухових і вогнепальних ушкоджень, що формують складні варіанти іпсилатеральних переломів навколо кульшового суглоба. На відміну від цивільної травми, такі ушкодження характеризуються значним руйнуванням м'язних тканин, високим ризиком інфекційних ускладнень і складністю реконструктивного лікування [2]. У нашому дослідженні частина випадків була пов'язана з бойовими вогнепальними пораненнями, що відображає специфіку надання травматологічної допомоги в умовах сучасного збройного конфлікту.

У літературі немає єдиної думки щодо оптимальної послідовності оперативного лікування при флотуючому стегні. Частина авторів рекомендує первинну стабілізацію тазового кільця, інші — остеосинтез стегнової кістки [4–7]. За даними різних досліджень, частота інфекційних ускладнень становить 7–10 %, незрощення — 7–12 %, а неврологічних ушкоджень — близько 15–18 %. У поданій серії пацієнтів інфекційні ускладнення й незрощення переломів не спостерігались, тоді як неврологічний дефіцит відзначено лише в 14,3 % випадків, що загалом відповідає даним літератури.

Отже, флотуюче стegno залишається складною клінічною проблемою сучасної травматології. Поєднання переломів таза та стегнової кістки потребує індивідуалізованого підходу до лікування й ретельного планування хірургічної тактики. Поетапна стабілізація переломів з первинним остеосинтезом стегнової кістки може бути ефективною стратегією лікування, що дозволяє досягти задовільних клінічних результатів. Обмеженням даного дослідження є невелика кількість клінічних спостережень, що зумовлено рідкісністю іпсилатеральних переломів таза та стегнової кістки. Крім того, ретроспективний характер дослідження й обмежене тривале спостереження за частиною пацієнтів не дозволяють повною мірою оцінити віддалені функціональні результати лікування.

Висновки

Іпсилатеральні переломи кісток таза та стегнової кістки (флотуюче стegno) є рідкісним, але тяжким варіантом травми пояса нижньої кінцівки, що найчастіше виникає в пацієнтів молодого працездатного віку та часто супроводжується політравмою. У більшості випадків механізмом виникнення флотуючого стегна є високоенергетична травма, зокрема дорожньо-транспортні пригоди, падіння з висоти, обвал конструкцій або бойові ушкодження, що зумовлює високу частоту супутніх травм та ускладнює лікувальну тактику. Поетапна хірургічна тактика, що передбачає первинну стабілізацію перелому стегнової кістки з подальшою фіксацією переломів тазового кільця або вертлюгової западини, є ефективним

підходом до лікування пацієнтів із флотуючим стегном. Раннє оперативне лікування та мультидисциплінарний підхід до ведення постраждалих з політравмою дозволяють зменшити частоту післяопераційних ускладнень і покращити функціональні результати лікування. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення алгоритмів діагностики й хірургічного лікування пацієнтів з іпсилатеральними переломами таза та стегнової кістки, зокрема в умовах сучасної бойової травми.

Конфлікт інтересів. Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів і власної фінансової зацікавленості при підготовці даної статті.

Список літератури

1. Wong MYZ, Ghobrial M, Han WM, Alsousou J, Carrothers A, Hull P, et al. The floating hip injury: a descriptive study and case-control analysis. *Hip Int.* 2024;34(1):122-133.
2. Zhou X, Liu Y, Zhang A, Wang C, Zhao X, Dong J, et al. Are all cases of floating hip the same? Further understanding of floating hip. *BMC Musculoskelet Disord.* 2024;25:988.
3. Medina-Castellanos A, Reséndiz A, Pozos E, Gómez T, Guerrero N, Nieto L, et al. Cadera flotante. *Acta Ortop Mex.* 2006;20(2):42-46.
4. Танасієнко П.В., Гур'єв С.О., Ковалишин І.В. Характеристика флотуючого стегна у постраждалих з політравмою. *Terra Orthopaedica.* 2024;(3):26-31.
5. Танасієнко П.В., Гур'єв С.О., Ковалишин І.В. Травмогенез флотуючого стегна у пацієнтів з політравмою. *Одеський медичний журнал.* 2024. № 1. С. 24-27.
6. Танасієнко П.В., Гур'єв С.О., Ковалишин І.В. Порівняльна характеристика методів лікування флотуючих переломів стегна у постраждалих з політравмою. *Сучасна медицина, фармація та психологічне здоров'я.* 2024. Т. 2. № 16. С. 51-55.
7. Танасієнко П.В., Єсипенко В.С. Іпсилатеральні пошкодження нижньої кінцівки у пацієнтів з політравмою. *Вісник Вінницького національного медичного університету.* 2024. Т. 28. № 2.

Отримано/Received 13.05.2026

Рецензовано/Revised 17.06.2026

Прийнято до друку/Accepted 23.06.2026

Information about author

Ivan Trufanov, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Traumatology and Orthopaedics of Zaporizhzhia Medical and Pharmaceutical University, Orthopaedic surgeon, Zaporizhzhia Military Hospital, Lt; e-mail: trufanovivan367@gmail.com, tel.: +38 (050) 560-20-70, <https://orcid.org/0000-0003-1628-1268>

Conflicts of interests. Author declares the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

I.I. Trufanov

Zaporizhzhia Medical and Pharmaceutical University, Zaporizhzhia Military Hospital, Zaporizhzhia, Ukraine

Ipsilateral pelvic and femoral fractures (floating hip) in combat trauma: clinical experience from a military hospital

Abstract. Background. Ipsilateral pelvic and femoral fractures, known as floating hip, represent one of the most severe forms of combined musculoskeletal injury and are frequently associated with polytrauma, massive blood loss, and a high risk of complications. In modern warfare, the incidence of high-energy trauma caused by explosive and firearm mechanisms has increased, leading to new clinical patterns of combined injuries around the hip joint. The purpose was to analyze the clinical characteristics and treatment outcomes of patients with ipsilateral pelvic and femoral fractures (floating hip) in combat and high-energy trauma. **Materials and methods.** The study was conducted at the trauma department of Military Unit A3309 (Zaporizhzhia, Ukraine). Between 2024 and 2025, seven patients with ipsilateral pelvic and femoral fractures were treated surgically. The cohort included six men (85.7 %) and one woman (14.3 %). All injuries were

caused by high-energy mechanisms, including combat-related firearm trauma. A staged surgical approach was used, consisting of primary fixation of the femoral fracture followed by stabilization of the pelvic ring or acetabulum. **Results.** Complete fracture union was achieved in all patients. No cases of infection or nonunion were observed. Neurological deficit and limb shortening occurred in one case each (14.3 %). The findings were comparable to those reported in the international literature on the frequency of complications in floating hip. **Conclusions.** Ipsilateral pelvic and femoral fractures in combat trauma represent a rare but severe form of combined musculoskeletal trauma. A staged stabilization of fractures with primary femoral fixation appears to be an effective treatment approach in these patients.

Keywords: floating hip; pelvic fractures; femoral fractures; combat trauma; polytrauma; osteosynthesis

Козін О.А.¹, Нестеренко М.М.², Павленко С.М.¹¹Полтавський державний медичний університет, м. Полтава, Україна²Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», м. Полтава, Україна

Комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану системи фіксації перелому проксимального відділу стегнової кістки

Резюме. Актуальність. Дослідження біомеханічних властивостей проксимального відділу стегнової кістки є важливим етапом у розробці ефективних методик хірургічного лікування переломів даної ділянки скелета. У більшості робіт з комп'ютерного моделювання гвинтового остеосинтезу шийково-діафізарний кут або приймається як усереднена геометрична константа, або взагалі не розглядається як самостійний фактор, хоча саме він визначає нахил шийки, довжину плеча навантаження, напрям передачі сил через зону перелому. **Мета:** провести комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану системи фіксації перелому проксимального відділу стегнової кістки з урахуванням різних шийково-діафізарних кутів та конструктивних схем остеосинтезу. **Матеріали та методи.** Аналіз сучасних наукових джерел був спрямований на визначення основних вимог до комп'ютерної моделі проксимального відділу стегнової кістки, зокрема щодо індивідуальних геометричних параметрів кістки та її щільності, варіантів виконання віртуальної остеотомії і розташування фіксаторів, а також напрямків і величин прикладених навантажень. Модель перелому формували шляхом віртуальної остеотомії шийки стегнової кістки в межах внутрішньосуглобового ушкодження з несприятливою до зсуву орієнтацією площини перелому типу Pauwels II–III. Після завершення геометричного моделювання та складання вузла виконували підготовку розрахункової моделі в SolidWorks Simulation. Для цього для кожної деталі визначали матеріальні характеристики, а між елементами задавали контактні взаємодії. **Результати.** Встановлені основні недоліки та переваги поширених комп'ютерних моделей проксимального відділу стегнової кістки за умови її ситуативного ушкодження. При порівнянні роботи канюльованих гвинтів за різних шийково-діафізарних кутів спочатку методично виправданим було використання стандартизованих матеріальних властивостей кортикальної та губчастої кістки. На наступному етапі модель можна було ускладнити, перейшовши до CT-based material mapping, якщо було потрібно оцінити ще й вплив остеопенії або індивідуальної неоднорідності кісткової тканини. Для моделювання системи фіксації перелому шийки стегна канюльованими гвинтами з урахуванням різних шийково-діафізарних кутів перевагу надали використанню дворівневої схеми навантаження. На першому етапі доцільно застосувати 2100 Н як базове навантаження одноопорного стояння, що дозволяє коректно порівнювати результати з літературними даними. На другому етапі для поглибленого аналізу доцільно вводити або фази ходи з різними кратностями маси тіла, або більш складну м'язово-суглобову схему навантаження. **Висновки.** Сучасне планування хірургічного лікування переломів проксимального відділу стегнової кістки повинно базуватися на даних комп'ютерного дослідження з подальшим вибором індивідуальної тактики оперативного втручання та ефективною фіксацією.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання; проксимальний відділ стегнової кістки; шийково-діафізарний кут; переломи; остеосинтез

Вступ

Ефективне лікування переломів проксимального відділу стегнової кістки (особливо шийки) залишається однією з найскладніших проблем сучасної травматології та ортопедії, оскільки навіть за анатомічної репозиції та внутрішньої фіксації вони часто супроводжуються незрошенням, втратою стабільності, варусним колапсом і аваскулярним некрозом головки стегнової кістки [1, 2].

Найбільш складними є внутрішньосуглобові та вертикально орієнтовані переломи, для яких характерне поєднання стискальних, зсувних і згинальних навантажень у зоні перелому, а отже, підвищені вимоги до жорсткості та просторової ефективності системи остеосинтезу. Попри широке застосування канюльованих гвинтів завдяки їх малотравматичності, технологічній простоті та здатності забезпечувати динамічну компресію, частота механічних ускладнень після такої фіксації залишається суттєвою, а оптимальна конфігурація гвинтів і досі є предметом досліджень [3, 4].

Однією з причин суперечливості наявних підходів є те, що ефективність фіксації перелому шийки стегна визначається не лише типом імплантата, а й індивідуальною геометрією проксимального відділу стегнової кістки, насамперед шийково-діафізарним кутом (ШДК). У сучасних дослідженнях показано, що цей кут є однією з найважливіших морфометричних характеристик проксимального відділу стегнової кістки, однак його вимірювання залежить від методики, положення кінцівки та просторової орієнтації кістки; при 2D-вимірюваннях відхилення від «істинного» 3D-значення можуть бути клінічно значущими [5, 6].

Водночас у більшості робіт з комп'ютерного моделювання гвинтового остеосинтезу ШДК або приймається як усереднена геометрична константа, або взагалі не розглядається як самостійний фактор, хоча саме він визначає нахил шийки, довжину плеча навантаження, напрям передавання сил через зону перелому. За таких умов залишається недостатньо вивченим, як варіації шийково-діафізарного кута — від варусних до вальгусних значень — впливають на напружено-деформований стан системи «кістка — фіксатор», міжфрагментарні переміщення та раціональну схему розташування канюльованих гвинтів. Саме тому актуальним є проведення комп'ютерного моделювання фіксації перелому шийки стегнової кістки з урахуванням різних шийково-діафізарних кутів для обґрунтування найбільш ефективної системи остеосинтезу.

Шийково-діафізарний кут, або кут інклінації шийки стегнової кістки, є однією з базових морфометричних характеристик проксимального відділу стегнової кістки, яка має безпосереднє значення для діагностики деформацій типу соха вага та соха valga, оцінювання ризику переломів, планування остеотомій і вибору способу внутрішньої фіксації. У сучасній літературі цей показник також позначають як neck-shaft angle (NSA) або caput-collum-diaphyseal angle (CCD). При цьому ав-

тори наголошують, що, попри широку клінічну практику використання ШДК, методика його визначення досі не є повністю уніфікованою, оскільки на результат впливають спосіб побудови осі шийки, вибір осі діафіза та просторове положення кінцівки під час візуалізації [7].

Особливу увагу в дослідженнях приділено похибкам вимірювання ШДК у двовимірних зображеннях. У роботі Á.T. Schlégl та співавт. показано, що середня різниця між 2D- та 3D-визначенням ШДК у дітей становила 5,11–5,58°, а більш ніж у 31 % випадків відхилення перевищувало 10°, що змусило авторів рекомендувати 3D-візуалізацію для хірургічного планування та в усіх сумнівних випадках. С.К. Boese та співавт. також підкреслили, що проєкційні похибки, зумовлені ротацією кульшового суглоба, можуть призводити до помилкового збільшення або зменшення проєкційного NSA, тому для коректної оцінки проксимальної геометрії стегнової кістки необхідні або стандартизовані рентгенограми, або методики, стійкіші до ротаційних відхилень. Отже, вже на етапі визначення вихідної геометрії стає очевидним, що ШДК не можна розглядати як другорядний параметр, оскільки навіть невеликі його зміни або похибки вимірювання впливають на просторову орієнтацію шийки, положення імплантата та напрям передавання навантаження [8, 9].

Клінічна значущість ШДК підтверджується й роботами, у яких цей показник аналізується як фактор ризику переломів проксимального відділу стегнової кістки. Зокрема, D.A. Gumuchdjian та співавт. встановили, що у пацієнтів віком понад 80 років більший CCD асоціювався з підвищеним ризиком перелому шийки стегнової кістки, що свідчить про тісний зв'язок між морфологією проксимального відділу стегна та характером травматичного ушкодження. Це положення є важливим для подальшого біомеханічного аналізу, оскільки воно підтверджує, що геометрія стегнової кістки не лише відображає індивідуальні анатомічні особливості, а й формує умови виникнення перелому та подальшої роботи системи «кістка — фіксатор» [10].

У контексті лікування переломів шийки стегнової кістки особливе значення має не лише тип фіксатора, а й якість репозиції та просторове взаємне положення уламків. Y. Wang та співавт. показали, що навіть у випадках, коли післяопераційна репозиція за рентгенограмами оцінювалася як добра, збільшення просторового зміщення головки стегнової кістки супроводжувалося зростанням напружень, переміщень та еквівалентних деформацій у проксимальному відділі стегнової кістки, а також корелювало з ризиком остеонекрозу головки. Ці результати мають принципове значення для комп'ютерного моделювання, оскільки вони доводять, що механічна поведінка системи остеосинтезу залежить не лише від самого імплантата, а й від геометричних параметрів проксимального відділу стегна, серед яких ШДК є одним із ключових [11].

Незважаючи на появу нових систем фіксації, канюльовані гвинти залишаються одним із найбільш поширених способів остеосинтезу переломів шийки стегнової кістки завдяки малотравматичності, технічній простоті та можливості забезпечення динамічної компресії. Водночас ефективність такої фіксації значною мірою визначається конфігурацією гвинтів. У клінічному дослідженні J.-J. Yang та співавт. встановлено, що при використанні трьох паралельних канюльованих гвинтів ризик незрощення був при трикутній конфігурації вищим, ніж при інвертовано-трикутній, а додатковими негативними факторами були зміщений перелом і неякісна репозиція. Таким чином, ще на клінічному рівні було підтверджено, що просторове розміщення гвинтів істотно впливає на стабільність фіксації, а отже, будь-яке дослідження системи кріплення без урахування геометрії шийки та діафіза стегна буде неповним [12].

Подальше вивчення цих проблем відбувалося переважно у роботах із застосуванням методу скінченних елементів. D. Jiang та співавт. на основі індивідуалізованих КТ-моделей порівняли п'ять стратегій гвинтової фіксації вертикальних переломів шийки стегнової кістки і показали, що α -конфігурація забезпечує найменші міжфрагментарні переміщення та найнижчі пікові напруження в імплантах, тоді як buttress-конструкція має найбільшу жорсткість, але супроводжується вищими напруженнями. Важливо, що у цій роботі автори враховували індивідуальну анатомічну мінливість, а наведені значення NSA у восьми моделях варіювали у межах від $121,76^\circ$ до $137,55^\circ$, тобто охоплювали варіанти, близькі до варусної, умовно нормальної та вальгусної геометрії. Однак сам ШДК не був виділений як незалежний фактор дослідження; він залишався лише однією з фонових анатомічних характеристик, на тлі яких порівнювалися схеми розташування гвинтів. Саме це свідчить про наявність наукової прогалини: хоча варіабельність ШДК у моделях існує, її власний вплив на напружено-деформований стан системи остеосинтезу все ще недостатньо вивчений [13].

Важливі результати щодо вдосконалення саме гвинтових схем фіксації отримано в роботі L. Tianye та співавт., у якій для переломів Pauwels III порівнювали традиційну тригвинтову фіксацію, F-подібну конфігурацію канюльованих гвинтів, а також їх поєднання з медіальною пластиною. Автори встановили, що F-подібне розташування гвинтів зменшує зсувні та крутні складові навантаження, а додавання медіальної пластини ще більше знижує переміщення головки стегнової кістки та напруження в ділянці *calcar femorale*, формуючи сприятливіший механічний стан для зрощення. Ці висновки є особливо цінними для майбутнього моделювання з урахуванням різних ШДК, оскільки саме варусна або вальгусна геометрія може змінювати напрям силового потоку через *calcar*, відстань до латеральної кортикальної стінки та кут входження нижнього опорного гвинта. Тут слід наголосити, що останнє положення впливає з узагальнення наведених у літературі біо-

механічних закономірностей і потребує спеціальної перевірки на окремих моделях із варійованим ШДК [13, 14].

Окремий напрям сучасних досліджень стосується не лише конфігурації в коронарній площині, а й аксіального положення канюльованих гвинтів. D.-K. Kwak та співавт. у скінченно-елементному аналізі моделей переломів Pauwels II показали, що при фіксації трьома канюльованими гвинтами переміщення гвинтів у більш переднє положення в аксіальній площині, збільшення кута їх нахилу та максимізація міжгвинтової відстані знижують концентрації напружень як у гвинтах, так і в навколишній кістці. Показово, що ця модель будувалася для стегнової кістки з ШДК 125° , тобто для умовно середньої анатомічної конфігурації. Отже, наведені авторами результати мають важливе практичне значення, проте не дозволяють оцінити, чи зберігатимуться встановлені закономірності за різних варіантів геометрії проксимального відділу стегнової кістки (варусної або вальгусної), коли змінюються вісь шийки, плече навантаження та просторові умови проведення гвинтів. Саме ця обставина додатково обґрунтовує необхідність дослідження впливу різних шийково-діафізарних кутів на ефективність гвинтового остеосинтезу [15].

Показовим є й те, що навіть у роботах, присвячених іншим системам фіксації, автори зазвичай використовують одну «усереднену» геометрію проксимального відділу стегнової кістки. Наприклад, у дослідженні C.-H. Jung та співавт. скінченно-елементна модель була побудована для стегнової кістки з *caput-collum-diaphysis angle* $128,5^\circ$, який автори вважали близьким до середнього показника популяції; вони аналізували вплив уже не самого кута, а положення імплантата та його наближення до субхондральної кістки. Це ще раз демонструє загальну тенденцію сучасних досліджень: геометрія стегнової кістки приймається як вихідна умова моделі, але практично не досліджується як незалежна змінна, хоча саме вона визначає просторову орієнтацію шийки, величину плеча згину та характер розподілу навантажень у системі фіксації [15, 16].

Отже, аналіз опублікованих робіт показує, що сучасна наука вже накопичила значний обсяг даних щодо морфометрії проксимального відділу стегнової кістки, похибок визначення та клінічної значущості ШДК, а також біомеханічної ефективності різних конфігурацій канюльованих гвинтів. Водночас більшість наявних досліджень або розглядає ШДК лише як діагностичний чи популяційний параметр, або використовує його як фонову геометричну характеристику при побудові моделей.

Питання ж про те, як саме різні значення ШДК — варусні, умовно нормальні та вальгусні — впливають на напружено-деформований стан системи остеосинтезу, міжфрагментарні переміщення, концентрацію напружень у гвинтах і кістці, а також на вибір раціональної просторової конфігурації канюльованих гвинтів, залишається недостатньо вивченим. Саме тому досліджен-

ня, присвячені комп'ютерному моделюванню системи фіксації перелому шийки стегна канюльованими гвинтами з урахуванням різних шийково-діафізарних кутів, є актуальними, науково обґрунтованими та мають як теоретичне, так і прикладне значення для травматології та ортопедії.

Мета дослідження полягає у створенні комп'ютерної моделі напружено-деформованого стану системи фіксації перелому шийки стегнової кістки з урахуванням різних шийково-діафізарних кутів та конструктивних схем остеосинтезу.

Матеріали та методи

Аналіз сучасних наукових джерел був спрямований на визначення основних вимог до комп'ютерної моделі проксимального відділу стегнової кістки, зокрема щодо індивідуальних геометричних параметрів кістки та її щільності, варіантів виконання віртуальної остеотомії і розташування фіксаторів, а також напрямків і величин прикладених навантажень.

Для дослідження впливу ШДК на стабільність остеосинтезу перелому шийки стегнової кістки в основу роботи покладено комп'ютерне тривимірне моделювання системи «проксимальний відділ стегнової кістки — перелом — канюльовані гвинти». Для побудови геометрично коректної моделі використовували КТ-дані з подальшою 3D-реконструкцією проксимального відділу стегнової кістки. Мультиспірально комп'ютерну томографію сегмента виконували на 64-зрізовому томографі Revolution EVO фірми GE Healthcare Japan Corporation (Японія) та за допомогою апарата NeUViz16 Essence Multislice CT scanner фірми Neusoft Medical Systems (Китай).

На першому етапі формувалась базова тривимірна модель проксимального відділу стегнової кістки, у якій вісь шийки визначається як лінія, що сполучає центр головки та центр шийки, а вісь діафіза — як поздовжня вісь стегнової кістки. На цій основі задавались кілька варіантів геометрії, що відображають варусний, умовно нормальний та вальгусний тип будови проксимального відділу стегна. Такий підхід дозволяв дослідити не усереднену, а змінну анатомічну конфігурацію, зважаючи на істотні коливання показників шийково-діафізарного кута в реальних КТ-моделях пацієнтів. Використання серії моделей із різним шийково-діафізарним кутом давало змогу оцінити, як зміна нахилу шийки впливає на плече навантаження, напрям силового потоку через зону перелому та умови роботи гвинтової системи фіксації.

Модель перелому формували шляхом віртуальної остеотомії шийки стегнової кістки в межах внутрішньосуглобового ушкодження з несприятливою до зсуву орієнтацією площини перелому. У скінченно-елементних дослідженнях нестабільних переломів шийки стегна найчастіше використовуються моделі переломів типу Pauwels II—III, оскільки саме для них характерні підвищені зсувні навантаження, високий ризик втрати репозиції та механічної неспроможності фіксації. Такий підхід дозволяв оцінити не тільки загальну жор-

сткість конструкції, а й міжфрагментарний зсув, розкриття зони перелому та локальні концентрації напружень.

Для остеосинтезу в моделі використовувалась система канюльованих гвинтів, розташованих відповідно до осі шийки стегнової кістки. Як базовий варіант приймалась типова схема — три паралельні гвинти в інвертовано-трикутній конфігурації, оскільки саме така схема широко застосовується в клінічній практиці і розглядається як стандарт для порівняння. Водночас наявні дослідження свідчать, що сама лише стандартна тригвинтова схема не завжди забезпечує належну стабільність, особливо при вертикальних переломах. За даними D. Jiang та співавт., серед п'яти порівнюваних стратегій фіксації найменші міжфрагментарні переміщення та найнижчі напруження в імплантах продемонструвала α -конфігурація, тоді як традиційні трикутні схеми виявилися менш ефективними. Тому в роботі поряд із базовою схемою передбачався модифікований варіант гвинтової фіксації з антивикручувальним елементом, який обмежує зворотне зміщення гвинтів, зменшує ризик їх ротаційної нестабільності та перерозподіляє навантаження в зоні входу головок у кістку [13].

Необхідність у таких конструктивних елементах підтверджується сучасними роботами, присвяченими підвищенню ротаційної та зсувної стійкості системи фіксації. У клінічно-експериментальних роботах показано, що поєднання трьох канюльованих гвинтів із медіальним опорним гвинтом поліпшує опір крученню та асоціюється з нижчими частотами повторного втручання і некрозу головки стегнової кістки порівняно зі стандартною тригвинтовою схемою. Подібну інженерну логіку демонструють сучасні системи типу Femoral Neck System, у яких застосовується окремий anti-rotation screw. За даними Y. Cha та співавт., додавання четвертого гвинта до базової конструкції фіксації сприяло зменшенню ширини міжфрагментарного розкриття, величини ковзання уламків і пікової міжфрагментарної компресії, водночас збільшуючи частку площі зони перелому, яка перебувала під дією стискальних напружень [17]. Отже, введення в модель додаткового антивикручувального або блокувального елемента було біомеханічно виправданим і розглядалось як один із напрямів удосконалення традиційного гвинтового остеосинтезу.

Скінченно-елементна модель формувалась на основі медичних зображень із використанням спеціалізованого програмного забезпечення для сегментації, побудови геометрії та подальшого чисельного аналізу. Подібна послідовність уже використана в низці сучасних досліджень, у яких реконструкція виконувалася за КТ-даними в середовищах Mimics, 3-Matic, SolidWorks та ABAQUS.

Граничні умови задавали відповідно до одноопорної фази ходьби або інших фізіологічних режимів навантаження. Як і в роботі D.-K. Kwak та співавт., до головки стегнової кістки прикладали силу реакції кульшового суглоба величиною 2100 Н, а до ділянки великого верт-

люга — силу відвідних м'язів величиною 700 Н. При цьому дистальний кінець стегнової кістки жорстко фіксували у просторі [15].

Основними критеріями оцінювання ефективності системи фіксації мають бути еквівалентні напруження за Мізесом у кістці та гвинтах, сумарні переміщення проксимального фрагмента, міжфрагментарне розкриття, зсув і локальні напруження в ділянці головок та кінчиків гвинтів. Саме ці параметри в сучасних дослідженнях найчастіше використовуються для порівняння різних способів фіксації. Тому в межах цього дослідження особливу увагу приділяли саме тому, як зміна ШДК впливає на наведені критерії та чи буде вона змінювати раціональне положення гвинтів у кістці.

Результати

Під час комп'ютерного моделювання системи фіксації перелому шийки стегнової кістки канюльованими гвинтами принциповим був правильний вибір зовнішнього навантаження, оскільки саме воно визначає характер розподілу напружень у проксимальному відділі стегнової кістки, величину міжфрагментарних

переміщень та ризик перевантаження імплантів. Аналіз наданих публікацій показав, що в дослідженнях переломів шийки стегна найчастіше застосовують схему одноопорного стояння або фази опори під час ходьби, коли дистальний кінець стегнової кістки жорстко фіксують, а навантаження прикладають до центру головки стегнової кістки. Найбільш поширеним було значення 2100 Н, що відповідає приблизно 300 % маси тіла, із нахилом в корональній та сагітальній площинах. Саме такий підхід використали S. Lin та співавт., які приклали силу 2100 Н під кутом 13° латерально у фронтальній площині та 8° назад у сагітальній площині. Аналогічне за величиною навантаження застосовували J. Li та співавт., які моделювали одноопорне стояння при відведенні 10° та нахилі назад 9°. Подібну схему використали і X. Kuang та співавт., прикладаючи 2100 Н до центру головки стегнової кістки з орієнтацією 10° назовні у фронтальній площині та 9° назад у сагітальній площині. Таким чином, саме діапазон близько 2100 Н можна розглядати як базовий стандарт для порівняльного аналізу різних конструкцій остеосинтезу шийки стегна [18–20].

Таблиця 1. Порівняння навантажень на головку стегнової кістки в опублікованих роботах

Автори	Тип моделі	Навантаження на головку	Напрямок/схема прикладання	Коментар для використання
Lin та співавт., 2021	Pauwels III, PCS/F-technique/DHS + DS	2100 Н	13° латерально у корональній площині, 8° назад у сагітальній; сила прикладена до центру головки	Один із найтиповіших режимів для порівняння фіксаторів при вертикальних переломах
Li та співавт., 2019	CCS, CCS + 1/3 TP, CCS + MABP	2100 Н	Відведення 10°, нахил назад 9°, вертикальна сила до центру головки	Добре підходить для моделей, у яких оцінюють зсув уздовж площини перелому та ефект медіальної опори
Kuang та співавт., 2023	FNS, FNS-low, FNS + CS	2100 Н	10° назовні у фронтальній площині, 9° назад у сагітальній; сила в центр головки	Поширена схема для моделювання одноопорного стояння/нормальної ходьби
Lu та співавт., 2020	DhCCS/OCCS	600 Н	Квазістатичне навантаження зверху на головку; низ моделі зафіксований	Доцільне для попередніх або спрощених порівнянь, але не як єдиний режим для функціонального прогнозу
Wang та співавт., 2019	Пацієнт-специфічні моделі після фіксації	1/3 BW; 2,4 BW; 4 BW; 7 BW	Чотири фази ходи: двоопорне стояння, одноопорне, heel-off, toe-off	Найбільш інформативно для пошуку критичної фази навантаження; максимуми досягаються при toe-off
Cha та співавт., 2025	FNS ± додатковий гвинт	Нормальна ходьба та підйом сходами	Навантаження на півсферичну поверхню головки під кутом 45° і ретроверсією 25°, з урахуванням м'язових сил	Найбільш фізіологічний підхід; доцільний для фінальної перевірки стабільності конструкції
Sohn та співавт., 2025	FNS для різних типів переломів	1950 Н	Навантаження в центр головки; відведення 7°; вектор 3° латерально і 15° назад	Компроміс між спрощеною та фізіологічною схемами, придатний для моделей на синтетичній кістці

Водночас у частині робіт застосовують спрощені або спеціалізовані режими навантаження. Так, Н. Lu та співавт. при моделюванні двох типів канюльованих гвинтів для перелому Pauwels III використовували квазістатичне навантаження 600 Н, прикладене до верхівки головки стегнової кістки, що більше відповідає попередньому порівняльному аналізу жорсткості конструкцій, ніж повному відтворенню фізіологічного навантаження під час ходьби. Тому таке навантаження доцільніше застосовувати як початковий етап чисельної валідації або для спрощених тестів на відносну стабільність, а не як єдину розрахункову схему для остаточного вибору системи фіксації [21].

Інший підхід подано в роботі Y. Wang та співавт., у якій навантаження розглядалося не як одне фіксоване значення, а як послідовність фаз ходи: двоножне стояння — 1/3 маси тіла, одноножне стояння — 2,4 маси тіла, відрив п'яти — 4 маси тіла, відрив пальців — 7 мас тіла. Автори показали, що найбільші напруження, переміщення та еквівалентні деформації виникають у фазі toe-off, тобто при найбільшому навантаженні.

Такий підхід є особливо цінним, якщо дослідження має на меті не лише порівняння конструкцій, а й виявлення критичного режиму, за якого може виникати викручування гвинтів, варусний колапс або локальне продавлювання кісткової тканини [11].

Більш фізіологічно деталізовані постановки задачі використовують у роботах, у яких до моделі вводять не лише силу, прикладену до головки стегнової кістки, а й м'язові компоненти. У дослідженні Y. Cha та співавт. моделі навантажували відповідно до режимів звичайної ходьби та підйому сходами, причому навантаження передавалося на півсферичну поверхню головки стегнової кістки під нахилом 45° та ретроверсією 25°, а також враховували сили відповідних м'язів, tensor fascia latae, tractus iliotibialis, vastus medialis і vastus lateralis. Саме такий підхід найближчий до реальної біомеханіки кульшового суглоба, однак він значно ускладнює модель і потребує більшої кількості вихідних даних [17].

Отже, для моделювання системи фіксації перелому шийки стегна канюльованими гвинтами з урахуванням різних шийково-діафізарних кутів доцільно

Таблиця 2. Порівняння прийнятих у літературі властивостей кістки

Автори	Тип моделі кістки	Кортикальна кістка	Губчаста кістка	Коментар
Lin та співавт., 2021	Однорідна, ізотропна, лінійно-пружна	$E = 16\,800 \text{ МПа}; \nu = 0,3$	$E = 840 \text{ МПа}; \nu = 0,2$	Один із найпоширеніших наборів параметрів у FE-моделях шийки стегна
Kuang та співавт., 2023	Однорідна, ізотропна, лінійно-пружна	$E = 16\,800 \text{ МПа}; \nu = 0,3$	$E = 840 \text{ МПа}; \nu = 0,2$	Практично той самий набір, що й у Lin та співавт.; зручно для прямого порівняння моделей
Li та співавт., 2019	Однорідна, ізотропна, рівномірна лінійно-пружна	$E = 16\,350 \text{ МПа}; \nu = 0,26$	$E = 137 \text{ МПа}; \nu = 0,3$	Більш контрастне розділення жорсткості кортикального і губчастого шарів
Sohn та співавт., 2025	У моделюванні використано синтетичну композитну модель кістки	$E = 7200 \text{ МПа}; \nu = 0,35$	$E = 135 \text{ МПа}; \nu = 0,225$	Параметри відповідають не природній кістці, а четвертому поколінню композитної моделі
Wang та співавт., 2019	Матеріальні властивості кісткової тканини визначали за даними комп'ютерної томографії	Матеріальні властивості кісткової тканини задавали на основі КТ-даних: густину обчислювали за співвідношенням $\rho = 131 + 1,067 \cdot \text{HU}$, а модуль пружності Юнга — за формулою $E = -331 + 4,56 \cdot \rho$	Те саме співвідношення за сірим рівнем КТ	Персоналізований підхід; у доступному фрагменті значення ν для кістки відображено неповно, тому його слід наводити обережно
Cha та співавт., 2025	Матеріальні властивості кісткової тканини визначали за ланцюжком перетворень: значення HU → густина зольного залишку → уявна густина → модуль Юнга	1800 груп матеріальних властивостей; $\nu = 0,3$ для кістки	1800 груп матеріальних властивостей; $\nu = 0,3$ для кістки	Найбільш деталізований підхід із просторово неоднорідними властивостями кістки

використовувати дворівневу схему навантаження. На першому етапі застосували 2100 Н як базове навантаження одноопорного стояння, оскільки саме ця схема найчастіше використовується у порівнюваних скінченно-елементних роботах і дозволяє коректно зіставляти результати з літературними даними. На другому етапі для поглибленого аналізу доцільно вводити або фази ходи з різними кратностями маси тіла, або більш складну м'язово-суглобову схему навантаження, якщо потрібно оцінити поведінку конструкції в умовах, наближених до реальної функції нижньої кінцівки.

Властивості кістки, які приймають автори при моделюванні

Аналіз наданих робіт показує, що в літературі використовуються два основні підходи до задання властивостей кісткової тканини. Перший — спрощений, коли кортикальну і губчасту кістку описують як однорідні, ізотропні та лінійно-пружні матеріали з фіксованими модулями пружності та коефіцієнтами Пуассона. Другий — персоналізований, коли властивості кістки визначають за КТ-щільністю.

Для моделювання ситуаційної задачі щодо порівняння роботи канюльованих гвинтів за різних шийково-діафізарних кутів спочатку методично виправданим було використання стандартизованих матеріальних властивостей кортикальної та губчастої кістки. Це дозволило зосередити аналіз саме на впливі геометрії проксимального відділу стегна і конфігурації гвинтів, не змішуючи цей ефект із варіаціями мінеральної щільності кістки. Уже на наступному етапі модель можна було ускладнити, перейшовши до CT-based material mapping, якщо було потрібно оцінити ще й вплив остеопенії або індивідуальної неоднорідності кісткової тканини [11, 17–22].

Побудова геометричної та розрахункової моделі за даними комп'ютерної томографії

Побудову моделі для дослідження системи фіксації перелому шийки стегнової кістки виконували на основі комп'ютерної томографії, оскільки саме КТ дає змогу отримати просторово коректну геометрію проксимального відділу стегнової кістки та врахувати індивідуальні анатомічні особливості, зокрема ШДК. У сучасних роботах, присвячених скінченно-елементному аналізу переломів шийки стегна, вихідні томографічні дані найчастіше використовують як основу для формування тривимірної моделі кістки, після чого її переносять у CAD-середовище для побудови перелому, імплантів та подальшого розрахунку [16, 19, 23]. З урахуванням поставленої мети в даному дослідженні прийнято, що всі основні етапи геометричного моделювання, побудови імплантів, складання вузла та розрахунку напружено-деформованого стану виконуються в середовищі SolidWorks.

На першому етапі отримували КТ-зрізи проксимального відділу стегнової кістки у форматі DICOM. У літературі для таких задач використовували тонкошарові скани з високою роздільною здатністю, що забезпечувало достатню точність відтворення контурів головки, шийки та проксимальної частини діафіза [14, 23]. На основі сірих значень томографічного зображення формується просторове виділення кісткової тканини, після чого створюється поверхнева STL-модель проксимального відділу стегнової кістки. У попередніх дослідженнях цей етап зазвичай виконували в спеціалізованому медичному програмному забезпеченні, а далі модель переносили в CAD-середовище для подальшого опрацювання. У нашій постановці вихідна КТ-геометрія після реконструкції імпортується в SolidWorks як початкова просторово-поверхнева модель для подальшого твердотільного моделювання.

Після імпорту геометрії в SolidWorks виконувалось очищення моделі від дрібних артефактів, згладжування локальних нерівностей поверхні та перетворення імпортованої оболонки на твердотільну форму. Подібний підхід відповідає загальній методиці, застосованій у роботах, у яких після КТ-реконструкції модель згладжували, апроксимували поверхнями та використовували для побудови твердотільної геометрії. У SolidWorks на цій стадії формували базову параметричну модель стегнової кістки, яка придатна для подальших операцій розсікання, побудови допоміжних площин, визначення осей та складання з елементами фіксації. Важливо, що саме твердотільна модель була необхідною умовою для коректного застосування модуля SolidWorks Simulation.

Далі у SolidWorks визначались основні анатомічні осі моделі. Вісь шийки стегнової кістки проводили через центр головки та характерну середню точку шийки, а вісь діафіза — як поздовжню вісь проксимального відділу стегнової кістки. На підставі цих осей визначався ШДК, який у межах цього дослідження приймався як один із головних змінних параметрів. Це давало можливість у SolidWorks не лише відтворити вихідну анатомію, а й параметрично змінювати ШДК для формування серії моделей із варусною, умовно нормальною та вальгусною геометрією.

На наступному етапі у SolidWorks формувалась модель самого перелому шийки стегнової кістки. Для цього через шийку проводилась допоміжна площина, положення якої задавалось відповідно до прийнятої схеми ушкодження. У роботах з аналізу нестабільних переломів найчастіше використовували віртуальну остеотомію типу Pauwels III, де лінія перелому має великий нахил і створює несприятливий зсувний характер навантаження. Після побудови площини в SolidWorks виконувалась операція розсікання тіла кістки, внаслідок чого одержують два фрагменти — проксимальний та дистальний. За потреби між ними може бути заданий початковий міжфрагментарний проміжок, що дозволяло оцінювати не лише напруження, а й величину зближення, зсуву та розкриття у зоні перелому.

Побудова елементів остеосинтезу також здійснювалась в середовищі SolidWorks. Канюльовані гвинти моделювались за їхніми номінальними геометричними параметрами: зовнішнім діаметром, діаметром стрижня, довжиною, ділянкою різби, розмірами головки та канюльованого каналу. У низці опублікованих робіт різбову частину гвинтів для спрощення розрахунку замінювали гладким циліндром із середнім діаметром різби, оскільки основним предметом аналізу була не локальна мікрогеометрія різби, а загальна робота системи «кістка — фіксатор» [14, 23]. Такий підхід був прийнятий доцільним і в цьому дослідженні, оскільки він істотно спрощував побудову сітки та підвищував стійкість розрахунку без втрати можливості порівнювати різні конфігурації розташування гвинтів. За необхідності додаткові антивикручувальні елементи або стопорні компоненти також моделювались у вигляді окремих деталей SolidWorks і включались до загальної збірки.

Після створення геометрії гвинтів у SolidWorks формувалась збірка системи остеосинтезу. Гвинти орієнтували відносно осі шийки стегнової кістки та розміщували відповідно до обраної схеми фіксації. У роботах із моделювання переломів шийки стегна канюльовані гвинти зазвичай розташовували паралельно до осі шийки, намагаючись максимально використати поперечний переріз шийки та підвести кінчики гвинтів до субхондральної ділянки головки, не порушуючи суглобову поверхню. У межах нашої моделі в SolidWorks це положення приймається як конструктивний орієнтир для коректного позиціонування гвинтів. Окремо може бути реалізовано кілька варіантів їхнього розташування — стандартна інвертовано-трикутна схема, модифікована схема з нижнім опорним гвинтом, а також варіанти з додатковими антиротативними елементами.

Після завершення геометричного моделювання та складання вузла виконували підготовку розрахункової моделі в SolidWorks Simulation. Для цього кожній деталі призначали матеріальні характеристики, а між елементами задавали контактні взаємодії. Залежно від прийнятої постановки задачі кортикальна та губчаста кістка могли моделюватися як ізотропні лінійно-пружні матеріали або, у разі ускладнення моделі, як неоднорідне середовище, параметри якого пов'язані з КТ-щільністю. Після цього в SolidWorks Simulation формувалась кінцево-елементна сітка, причому в зонах перелому, контакту гвинтів із кісткою та поблизу субхондральної ділянки доцільно використовувати локальне згущення сітки.

Граничні умови та навантаження також задавались в середовищі SolidWorks Simulation. Дистальний відділ стегнової кістки фіксували, а до поверхні головки прикладали силу, що імітує одноопорне стояння або фазу опори під час ходьби. За результатами розрахунку визначали розподіл еквівалентних напружень у кістці та гвинтах, сумарні переміщення проксимального фрагмента, величину міжфрагментарного зсуву, розкриття перелому, а також локальні зони перевантаження у ділянці входу гвинтів і під їхніми головками. Саме ці по-

казники є найбільш інформативними для оцінювання ризику викручування гвинтів, втрати репозиції та продавлювання кісткової тканини головки стегнової кістки під дією навантаження.

Таким чином, запропонована методика дає можливість у єдиній розрахунковій постановці проаналізувати взаємозв'язок між геометриєю проксимального відділу стегнової кістки та роботою системи гвинтового остеосинтезу. Практичне значення такого підходу полягало у визначенні раціональної схеми розташування канюльованих гвинтів і доцільності використання додаткових антивикручувальних елементів для різних варіантів ШДК. Очікується, що це дозволить знизити ризик викручування гвинтів, продавлювання кісткової тканини в ділянці головки стегнової кістки, втрати репозиції та вторинної нестабільності остеосинтезу.

Висновки

Сучасне планування хірургічного лікування переломів проксимального відділу стегнової кістки повинно базуватися на даних комп'ютерного дослідження з подальшим вибором індивідуальної тактики оперативного втручання й ефективної фіксації.

Комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану системи фіксації перелому проксимального відділу стегнової кістки з урахуванням різних шийково-діафізарних кутів та конструктивних схем остеосинтезу є ефективним засобом прогнозування можливих механогенних ускладнень.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів та власної фінансової зацікавленості при підготовці даної статті.

Інформація про фінансування. Робота виконана в рамках науково-дослідної роботи кафедри хірургії № 3 «Вікові аспекти етапного надання допомоги ортопедо-травматологічним хворим з коморбідною патологією» 2022–2026 рр. (номер держреєстрації 0122U002528).

Внесок авторів. Козін О.А. — концепція та дизайн, збір та узагальнення даних, аналіз та інтерпретація результатів, написання рукопису, редагування рукопису, остаточне затвердження рукопису; Нестеренко М.М. — концепція та дизайн, збір та узагальнення даних, аналіз та інтерпретація результатів, написання рукопису; Павленко С.М. — аналіз та інтерпретація результатів, написання рукопису, редагування рукопису, остаточне затвердження рукопису.

Список літератури

1. Kalashnikov A, Lazarenko Y, Kalashnikov O. Proximal femoral fractures: social significance and surgical treatment (review of literature sources). *Trauma*. 2023;24(1):79–85. doi: 10.22141/1608-1706.1.24.2023.936.
2. Wiseley BR, Shin ED, Kuhn GR, et al. Patient satisfaction following non-operative treatment of geriatric hip fractures: a case-control study. *Geriatr Orthop Surg Rehabil*. 2024;15:21514593241273312. doi: 10.1177/21514593241273312.

3. Rajnish RK, Srivastava A, Rathod PM, et al. Does the femoral neck system provide better outcomes compared to cannulated screws fixation for the management of femoral neck fracture in young adults? A systematic review of literature and meta-analysis. *J Orthop.* 2022;32:52-9. doi: 10.1016/j.jor.2022.05.007.
4. Stoffel K, Michelitsch C, Arora R, et al. Clinical performance of the Femoral Neck System within 1 year in 125 patients with acute femoral neck fractures, a prospective observational case series. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2023;143(7):4155-64. doi: 10.1007/s00402-022-04686-w.
5. Haddad B, Hamdan M, Al Nawaiseh M, et al. Femoral neck shaft angle measurement on plain radiography: is standing or supine radiograph a reliable template for the contralateral femur? *BMC Musculoskelet Disord.* 2022 Dec 14;23(1):1092. doi: 10.1186/s12891-022-06071-5.
6. Abd Wahab EH, Downey C, Murphy B, et al. Can femoral neck-shaft angle predict timing of contralateral second hip fracture? A 7-year retrospective cohort study at a tertiary referral centre for trauma. *Musculoskelet Surg.* 2025 Jul 15. [Epub ahead of print]. doi: 10.1007/s12306-025-00908-7.
7. Ranzeetha D, Challa P, Lakkireddy V, et al. A study on the femoral neck-shaft angle in an adult sample from Andhra Pradesh: osteological and radiological measurements. *Cureus.* 2025 Apr 11;17(4):e82100. doi: 10.7759/cureus.82100.
8. Schlögl ÁT, Nyakas V, Kovács D, et al. Neck-shaft angle measurement in children: accuracy of the conventional radiography-based (2D) methods compared to 3D reconstructions. *Sci Rep.* 2022;12:16494. doi: 10.1038/s41598-022-20832-1.
9. Boese CK, Frink M, Jostmeier J, et al. The modified femoral neck-shaft angle: age- and sex-dependent reference values and reliability analysis. *BioMed Res Int.* 2016;2016:8645027. doi: 10.1155/2016/8645027.
10. Gumuchdjian DA, Waltenspil M, Dietrich M, et al. Hip axis length and femoral neck-shaft angle as risk factors for proximal femur fractures in octogenarians to centenarians. *J Clin Med.* 2024;13(14):4071. doi: 10.3390/jcm13144071.
11. Wang Y, Ma JX, Yin T, et al. Correlation between reduction quality of femoral neck fracture and femoral head necrosis based on biomechanics. *Orthop Surg.* 2019;11(2):318-24. doi: 10.1111/os.12458.
12. Yang JJ, Lin LC, Chao KH, et al. Risk factors for non-union in patients with intracapsular femoral neck fractures treated with three cannulated screws placed in either a triangle or an inverted triangle configuration. *J Bone Joint Surg Am.* 2013;95(1):61-9. doi: 10.2106/JBJS.K.01081.
13. Jiang D, Zhan S, Wang L, et al. Biomechanical comparison of five cannulated screw fixation strategies for young vertical femoral neck fractures. *J Orthop Res.* 2021;39(8):1669-80. doi: 10.1002/jor.24881.
14. Tianye L, Peng Y, Jingli X, et al. Finite element analysis of different internal fixation methods for the treatment of Pauwels type III femoral neck fracture. *Biomed Pharmacother.* 2019;112:108658. doi: 10.1016/j.biopha.2019.108658.
15. Kwak DK, Lee Y, Lee SJ, et al. What is the appropriate axial position in cannulated screw fixation for femoral neck fractures? A finite element analysis. *BMC Musculoskelet Disord.* 2025;26:430. doi: 10.1186/s12891-025-08681-1.
16. Jung CH, Cha Y, Yoon HS, et al. Mechanical effects of surgical variations in the femoral neck system on Pauwels type III femoral neck fracture: a finite element analysis. *Bone Joint Res.* 2022;11(2):102-11. doi: 10.1302/2046-3758.112.BJR-2021-0282.R1.
17. Cha Y, Park S, Jung CH, et al. Additional screw added to the femoral neck system could enhance the stability of Pauwel type III femoral neck fractures: a finite element analysis. *Clin Orthop Surg.* 2025;17(2):204-15. doi: 10.4055/cios24194.
18. Lin S, Shang J, Xing B, et al. Modified F configuration in the treatment of Pauwels type III femoral neck fracture: a finite element analysis. *BMC Musculoskelet Disord.* 2021;22:758. doi: 10.1186/s12891-021-04638-2.
19. Li J, Yin P, Zhang L, et al. Medial anatomical buttress plate in treating displaced femoral neck fracture: a finite element analysis. *Injury.* 2019;50(11):1895-900. doi: 10.1016/j.injury.2019.08.024.
20. Kuang X, Jian G, Xie D, et al. Choose the appropriate implantation position of the Femoral Neck System in the femoral neck: a finite-element analysis. *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2023;49(4):1845-53. doi: 10.1007/s00068-023-02253-5.
21. Lu H, Shen H, Zhou S, et al. Biomechanical analysis of the computer-assisted internal fixation of a femoral neck fracture. *Genes Dis.* 2020;7(3):448-55. doi: 10.1016/j.gendis.2019.04.006.
22. Sohn HS, Jeong SL, Jung GH. Biomechanical finite element analysis of a femoral neck system fixation construct for femur neck fractures and clinical implications. *Journal of Musculoskeletal Trauma.* 2025;38(3):133-142. doi: 10.12671/jmt.2025.00108.
23. Samsami S, Augat P, Rouhi G. Stability of femoral neck fracture fixation: a finite element analysis. *Proc Inst Mech Eng H.* 2019;233(9):892-900. doi: 10.1177/0954411919856138.

Отримано/Received 12.04.2026

Рецензовано/Revised 04.06.2026

Прийнято до друку/Accepted 29.06.2026

Information about authors

Oleksandr A. Kozin, PhD-student, Department of Surgery 3, Poltava State Medical University, Poltava, Ukraine; e-mail: san.cozin3@gmail.com; phone +380 (50) 232-24-81
 Mykola M. Nesterenko, PhD (Tech), Associate Professor, Associate Professor of the Department of industrial mechanical engineering and mechatronics National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava, Ukraine; https://orcid.org/0000-0002-4073-1233
 Svitlana M. Pavlenko, PhD in Medicine, Associate Professor, Department of Surgery 3, Poltava State Medical University, Poltava, Ukraine; e-mail: mamasvetlananik@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-8340-020X

Conflicts of interests. Authors declare the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

Information about funding. The work was carried out within the framework of the research project of the Department of Surgery 3 "Age-related aspects of staged care for orthopedic and trauma patients with comorbidities" for 2022–2026 (state registration number 0122U002528).

Authors' contribution. O.A. Kozin — concept and design, data collection and generalization, analysis and interpretation of results, manuscript writing, editing, and final approval; M.M. Nesterenko — concept and design, data collection and generalization, analysis and interpretation of results, manuscript writing; S.M. Pavlenko — analysis and interpretation of results, manuscript writing, editing, and final approval.

O.A. Kozin¹, M.M. Nesterenko², S.M. Pavlenko¹

¹Poltava State Medical University, Poltava, Ukraine

²National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava, Ukraine

Computer modeling of the stress-strain state of the proximal femoral fracture fixation system

Abstract. Background. The study on the biomechanical properties of the proximal femur is an important stage in developing effective methods of surgical treatment for fractures of this part of the skeleton. Most works on computer modeling of screw osteosynthesis consider the caput-collum-diaphyseal (CCD) angle as an averaged geometric constant or not consider it as an independent factor at all, although it determines the inclination of the neck, the length of the load arm, and the direction of force transmission through the fracture zone. The purpose was to perform the computer modeling of the stress-strain state of the proximal femoral fracture fixation system taking into account different CCD angles and structural schemes of osteosynthesis. **Materials and methods.** Analysis of data from modern scientific sources was aimed at identifying the main requirements to the computer model of the proximal femur, namely individual geometric parameters of the bone and its density, variability of virtual osteotomy and location of fixators, as well as directions and values of loads. The fracture model was formed by virtual osteotomy of the femoral neck within the intra-articular injury with an unfavorable fracture plane orientation of Pauwels type II–III fracture predisposing to displacement. After completing geometric modeling and assembly of the unit, the computational model was prepared in SolidWorks Simulation. To do this, material characteristics were assigned to each part,

and contact interactions between the elements were defined. **Results.** The main disadvantages and advantages of common computer models of the proximal femur under the condition of its situational damage were established. When comparing the performance of cannulated screws at different CCD angles, it was methodologically justified to use standardized material properties of cortical and cancellous bone at first. At the next stage, the model could be complicated by moving to CT-based material mapping, if it was also necessary to assess the influence of osteopenia or individual bone heterogeneity. To model the femoral neck fracture fixation system with cannulated screws, taking into account different CCD angles, preference was given to a two-level loading scheme. At the first stage, it is advisable to apply 2100 H as the basic load of single-support standing, which will allow for correct comparison of the results with the literature data. At the second stage, for in-depth analysis, it is advisable to introduce either gait phases with different multiplicity of body weight, or a more complex muscle-joint loading scheme. **Conclusions.** Modern planning of surgical treatment for proximal femoral fractures should be based on computerized imaging data with subsequent selection of individual surgical tactics and selection of effective fixation.

Keywords: computer modeling; proximal femur; caput-collum-diaphyseal angle; fractures; osteosynthesis

Тимошенко С.В.

ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», м. Київ, Україна

Результати хірургічного лікування ризартрозу

Резюме. Актуальність. Велика кількість запропонованих способів хірургічного лікування ризартрозу потребує окреслення ефективності базових методик та їх диференційованого застосування. **Мета:** кількісно оцінити ефективність різних методик хірургічного лікування артрозу зап'ястно-п'ясткового суглоба великого пальця кисті. **Матеріали та методи.** Проведено одноцентрове ретроспективне дослідження результатів хірургічного лікування ризартрозу у 55 пацієнтів за трьома базовими методиками. Перша методика — трапезектомія з пластикою зв'язкового апарату суглоба з використанням смуги сухожилка променевого згинача (LRTI-процедура — 34 пацієнти), друга — трапезектомія із застосуванням спеціалізованої системи двох гудзикових фіксаторів та надміцної нитки — 14 пацієнтів, третя — артрорез зап'ястно-п'ясткового суглоба великого пальця — 7 пацієнтів. Результати оцінювали через 12 місяців і більше. Ступінь відновлення опозиції великого пальця визначали у балах за шкалою Капанджі, а функціональний стан кінцівки — за опитувальником DASH до і після хірургічного втручання. **Результати.** Хірургічне лікування ризартрозу є ефективним і забезпечує зменшення недієздатності верхньої кінцівки на 29,5 (13,6–39,0) бала за опитувальником DASH (медіана; IQR 9,1). За показниками ефективності щодо динаміки зменшення недієздатності кінцівки всі три методики статистично не відрізнялись між собою. Клініко-рентгенологічний анкілоз після артрорезу цього суглоба забезпечує стабільний і сильний захват, проте показники опозиції великого пальця знижуються: медіана зміни за шкалою Капанджі становила –0,5 бала (медіана: від –3 до –2; IQR 1,5). Обидві методики з трапезектомією забезпечують поліпшення опозиції великого пальця: медіана показника за шкалою Капанджі становила 9 балів (медіана: 7–10; IQR 1). Статистично значущих відмінностей між цими методиками не виявлено, тоді як порівняно з артрорезом зап'ястно-п'ясткового суглоба великого пальця результати обох методик були вірогідно кращими ($p < 0,002$). **Висновки.** Усі досліджені методики є ефективними щодо зменшення функціональної недієздатності. Трапезектомія (з LRTI або гудзиковою фіксацією) забезпечує кращі показники опозиції, тоді як артрорез формує стабільний силовий захват ціною обмеження рухів.

Ключові слова: деформуючий артроз; кистьовий суглоб; ризартроз; трапезектомія; артрорез; артропластика

Вступ

Деформуючий артроз зап'ястно-п'ясткового суглоба великого пальця кисті (ризартроз) — поширене захворювання, яке охоплює від 6 до 40 % людської популяції віком від 50 до 80 років [1]. Попри відносно високу ефективність комплексного консервативного лікування, яке включає модифікацію навантаження, ортезування, застосування нестероїдних протизапальних препаратів, фізіотерапію, хондропротекторну терапію та лікувальну фізкультуру, до 19 % пацієнтів не досягають суттєвого клінічного поліпшення і потребують хірургічного лікування [2].

Результати ендопротезування зап'ястно-п'ясткового суглоба все ще містять значну кількість (2,6–19,9 %)

ранніх та віддалених хірургічних ускладнень у вигляді нестабільності, інфекцій, а в 3–5 % випадків необхідні ревізійні хірургічні втручання [3, 4].

У сучасному хірургічному арсеналі базовою, найбільш поширеною методикою є трапезектомія зі стабілізацією основи першої п'ясткової кістки смугою сухожилка променевого згинача кисті та інтерпозицією цього сухожилка в ложе видаленої кістки трапеції. Саме цю методику обрали 93 % опитаних хірургів [5].

Набуває популярності модифікація цієї операції із використанням після трапезектомії для стабілізації суглоба надміцної нитки та двох малих гудзикових фіксаторів [6].

© «Травма» / «Trauma» («Trauma»), 2026

© Видавець Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2026

Для кореспонденції: Тимошенко Сергій Вікторович, к.мед.н., провідний науковий співробітник відділення мікрохірургії та реконструктивної хірургії верхньої кінцівки, ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», вул. Бульварно-Кудрявська, 27, м. Київ, 01054, Україна; e-mail: setym@ukr.net

For correspondence: Serhii Tymoshenko, PhD, Leading Research Fellow, Department of Microsurgery and Reconstructive-Recovery Surgery of Upper Limb, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Bulvarno-Kudriavska st., 27, Kyiv, 01054, Ukraine; e-mail: setym@ukr.net

Full list of author information is available at the end of the article.

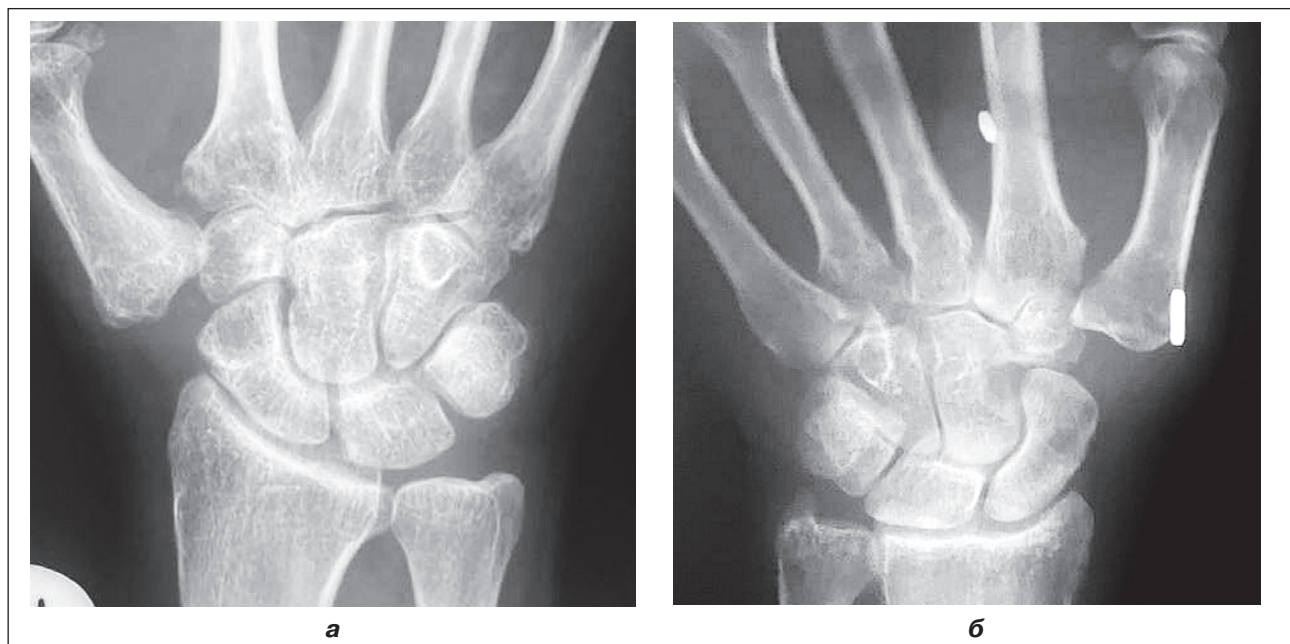


Рисунок 1. Фотовідбитки рентгенограм у прямій проєкції у пацієнтів, оперованих з приводу ризартрозу: а — за методикою трапезектомії з пластиною зв'язкового апарату суглоба з використанням смуги сухожилка променевого згинача; б — з використанням Arthrex CMC minithight rope system

У сучасних публікаціях окреслюється роль і місце для виконання артродезу цього суглоба, особливо при ризартрозі у пацієнтів з надвисокими вимогами до сили захвату у зв'язку із професійними навантаженнями (муляри, каменярі тощо) [7].

Низка публікацій порівнює описані методики з зазначенням тих чи інших переваг і засвідчує, що кількісні показники їх ефективності неоднорідні, потребують окреслення та уточнення результатів, а єдиної парадигми їх застосування остаточно не визначено [5, 6, 8]. Це зумовлює мету нашого дослідження.

Мета: кількісно оцінити ефективність різних методик хірургічного лікування артрозу зап'ястно-п'ясткового суглоба великого пальця кисті, уточнити їх переваги та недоліки, окреслити особливості їх застосування.

Матеріали та методи

Проведено одноцентрове ретроспективне клінічне дослідження. Кількісно відстежено результати хірургічного лікування 55 пацієнтів з ризартрозом.

Критерії включення: дорослі пацієнти з симптоматичним ризартрозом 2–4-го ст. за Eaton-Littler, не-ефективне попереднє консервативне лікування. Демографічний розподіл пацієнтів за групами поданий у табл. 1.

Результати оцінювали через рік і більше після втручання шляхом визначення балів опозиції великого пальця кисті за шкалою Капанджі [9] та суб'єктивних показників неієздатності верхньої кінцівки за бальним опитувальником DASH [10] у прямому українському перекладі.

Оцінювалась ефективність трьох різних методик хірургічного лікування ризартрозу. Перша методика — трапезектомія з пластиною зв'язкового апарату суглоба з використанням смуги сухожилка променевого згинача (LRTI-процедура, рис. 1а) — 34 пацієнти; 14 пацієнтів оперовані з використанням Arthrex CMC minithight rope system (набір з надміцною ниткою і двома гудзиковими фіксаторами) (рис. 1б).

Ще у семи пацієнтів виконано артродез зап'ястно-п'ясткового суглоба великого пальця кисті (рис. 2).

Таблиця 1. Кількість, вік та стать пацієнтів, оперованих за різними хірургічними методиками

Хірургічна методика	Кількість пацієнтів	Вік, років; медіана (діапазон); IQR	Стать, чоловіки/жінки
Трапезектомія з тендопластиком зв'язок	34	67 (39–77); 11	4/30
Трапезектомія з застосуванням гудзикових фіксаторів та надміцної нитки	14	65 (44–73); 13	0/14
Артродез зап'ястно-п'ясткового суглоба великого пальця кисті	7	54 (39–61); 10	7/0
Усього	55	64 (39–77); 13	11/44

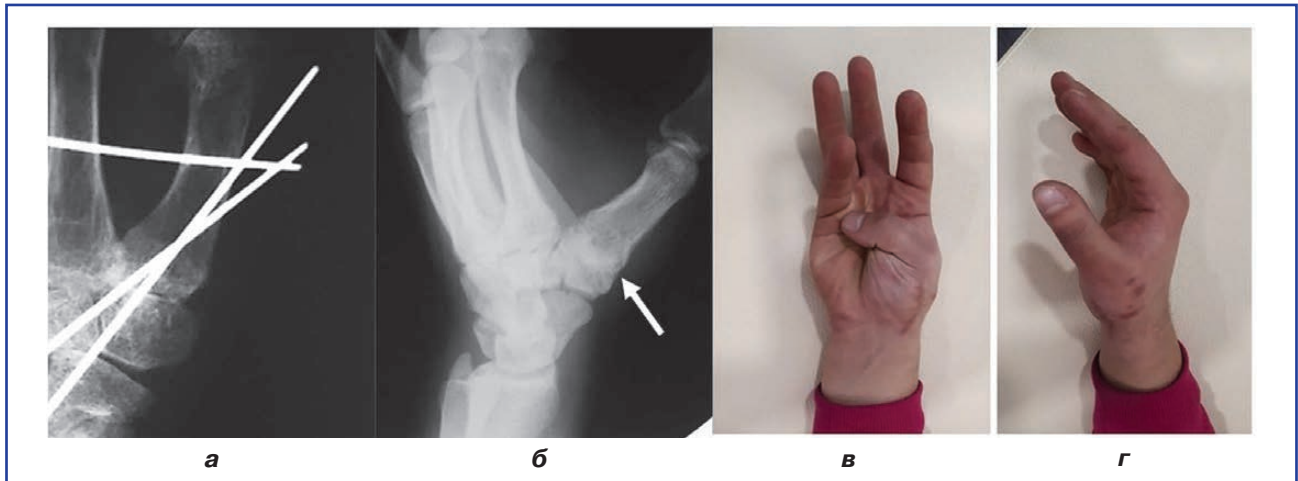


Рисунок 2. Фотовідбитки рентгенограм пацієнта: а — з артродезом зап'ястно-п'ясткового суглоба великого пальця кисті; б — анкілозом цього суглоба; в, г — фотографії кисті цього пацієнта через рік після операції

У післяопераційному періоді іммобілізація великого пальця кисті за першою методикою тривала 4 тижні, за другою — 2 тижні, при артродезі — 8 тижнів. Після цього призначалось відповідне реабілітаційне лікування.

Результати оцінювались за реєстрацією показників у терміни 1 рік і більше, на контрольному огляді або шляхом онлайн-опитування з фотовідбитками, які засвідчують ступінь відновлення опозиції великого пальця.

Результати

У всіх пацієнтів спостерігалось стійке клінічне і суб'єктивне зменшення проявів ризартрозу. Інфекційних ускладнень, грубих зміщень, втрат фіксації не було. У разі артродезу клініко-рентгенологічні ознаки анкілозу цього суглоба фіксувались у терміни 8–10 тижнів після операції.

Показники оцінки недієздатності верхньої кінцівки за опитувальником DASH та їх динаміка за результатами хірургічного лікування ризартрозу за трьома різними хірургічними методиками подані в табл. 2.

Згідно з отриманими даними, вихідні та кінцеві показники недієздатності верхньої кінцівки за результатами трьох хірургічних методик суттєво не відрізнялись. Статистичної різниці між ефективністю методик згідно з показниками динаміки зменшення недієздатності верхньої кінцівки також не було виявлено.

Основним позитивним ефектом після хірургічного лікування було те, що пацієнти відмічали суттєве зменшення або зникнення больового синдрому в зап'ястку, збільшення функціональності кисті. Однак при післяопераційному обстеженні та опитуванні деякі пацієнти після трапезектомії за першою методикою відмічали певну слабкість основних захватів за участю великого пальця. Вони не могли повернутись до того рівня побутової чи виробничої активності, яка була до початку захворювання. На рентгенограмах відмічалась помітна міграція першої п'ясткової кістки проксимально, були

клінічні ознаки нестабільності в зап'ястно-п'ястковому суглобі великого пальця кисті.

При використанні методики з надмічною ниткою і двома гудзиковими фіксаторами суттєвої міграції п'ясткової кістки та ознак нестабільності не було, проте пацієнти відмічали деяку скутість у зап'ястно-п'ястковому суглобі, особливо при відведенні та ре-тропозиції великого пальця. У переважної більшості пацієнтів показники протиставлення великого пальця при резекційних артропластиках цього суглоба суттєво зростали (табл. 3).

Згідно з отриманими даними у групі артродезу зап'ястно-п'ясткового суглоба великого пальця кисті показники опозиції зменшились, попри цілком помітне зменшення недієздатності верхньої кінцівки. Проте навіть при проведенні артродезу функція опозиції в окремих пацієнтів відновилась до 10 балів (рис. 2в, г).

Обговорення

Низка дослідників [5, 6] наполягає на певних перевагах тієї чи іншої методики артропластики з трапезектомією. Оскільки значущої різниці за ефективністю зниження недієздатності кінцівки між методиками не відмічалось, то, очевидно, у виборі способу хірургічного лікування слід опиратись на дещо інші параметри, а саме загальні терміни лікування (які при артродезі помітно більші), період іммобілізації (у методиці з надмічною ниткою та гудзиковими фіксаторами він найменший (2 тижні)), і узгоджувати це в кожному окремому випадку.

Цікаво, що за результатами аналізу виявляється певний парадокс між позитивною динамікою зменшення недієздатності верхньої кінцівки при артродезі та очевидним зменшенням функції опозиції великого пальця.

Це зменшення статистично значуще для пацієнтів з артродезом порівняно з поліпшенням опозиції в обох

групах з резекційними артропластиками. Це можна пояснити значним зменшенням больового синдрому та суттєвим збільшенням сили великого пальця, що дає змогу пацієнтам повернутися до звичних фізичних навантажень, відновити працездатність і, відповідно, поліпшити соціально-трудова показники, які оцінює опитувальник DASH. Тобто вибір операції артродезу зап'ястно-п'ясткового суглоба великого пальця цілком виправданий у пацієнтів, які мають підвищені вимоги щодо сили захватів за участі великого пальця (каменярі, слюсарі, муляри, монтажники тощо), що узгоджується з рекомендаціями дослідників цієї проблеми [2, 7].

Через наявність металофіксаторів друга і третя методики, згідно з даними літератури [5–7], мали б характеризуватися вищою частотою ускладнень (втрата фіксації, нестабільність, подразнення оточуючих тканин фіксатором тощо), однак у наших пацієнтів ускладнень, пов'язаних із наявністю імплантатів, не спостерігалось.

Отже, хоча за результатами методики суттєво не відрізняються, кожна з них має певні особливості, які можуть братись за основу диференційованого підходу при лікуванні. Так, у людей більш старшого віку, з невисокими вимогами до функції захватів кисті, можна рекомендувати більш технічно просто, не ресурсну щодо фіксаторів першу методику; у пацієнтів, які не мають значних виробничих навантажень на кисть та прагнуть більш комфортного швидкого одужання, — другу методику; у людей, які мають працювати фізично, — третю, з артродезом суглоба.

Обмеження дослідження. Застосовано не всі відомі методи обстеження функції кисті (сила захвату, лінійні і кутові показники опозиції), проте такий характер діагностики дозволяв визначити ефективність лікування дистанційно шляхом опитування та оцінки надісланої дистанційно фотографії оперованої кисті у положенні максимально можливої опозиції великого пальця відповідно до методики Капанджі.

Таблиця 2. Показники недієздатності верхньої кінцівки та їх динаміка при хірургічному лікуванні ризартрозу за трьома хірургічними методиками, медіана (діапазон); IQR

Хірургічна методика	Бали за опитувальником DASH до операції	Бали за опитувальником DASH після операції	Динаміка балів за опитувальником DASH*
Трапезектомія з пластиною зв'язок сухожилка	44,4 (34,1–54,5); 6,8	17,1 (6,8–29,5); 6,9	29,5 (15,9–38,7); 9,1
Трапезектомія з застосуванням гудзикових фіксаторів та надміцної нитки	42,1 (38,6–52,3); 9,1	15,9 (6,8–29,5); 11,4	28,4 (13,6–38,7); 9,1
Артродез зап'ястно-п'ясткового суглоба великого пальця кисті	47,7 (38,6–52,3); 11,4	15,9 (9,1–25,0); 7,2	31,8 (20,4–39,0); 14,2
Усього	43,2 (34,1–54,5); 6,8	15,9 (6,8–29,5); 6,9	29,5 (13,6–39,0); 9,1

Примітка: * — за використання непараметричних критеріїв Краскела — Уолліса не виявлено статистично значущої різниці між показниками динаміки зменшення недієздатності за опитувальником DASH при застосуванні різних хірургічних методик ($p > 0,05$).

Таблиця 3. Показники опозиції великого пальця кисті до і після операції за трьома хірургічними методиками, медіана (діапазон); IQR

Методики операцій	Бали за опитувальником Капанджі до операції	Бали за опитувальником Капанджі після операції	Динаміка балів за опитувальником Капанджі*
Трапезектомія з пластиною зв'язок сухожилка	8 (6–10); 2	9 (7–10); 1	2 (0–3); 1
Трапезектомія з застосуванням гудзикових фіксаторів та надміцної нитки	8 (6–10); 3	9 (7–10); 1	1 (0–3); 1
Артродез зап'ястно-п'ясткового суглоба великого пальця кисті	8 (7–9); 0,5	7 (6–10); 1	–0,5 (–3...–2); 1,5
Усього	8 (6–10); 2	9 (6–10); 1	1 (–3...3); 2

Примітки: * — виявлено статистично значущу різницю збільшення балів опозиції великого пальця за опитувальником Капанджі між трьома методиками лікування (критерії Краскела — Уолліса); попарний аналіз показав нижчі результати у групі методики 3 порівняно з методиками 1 ($p = 0,0018$) та 2 ($p = 0,0039$), тоді як між методиками 1 і 2 різниця не виявлена ($p = 0,92$).

Висновки

1. Хірургічне лікування ризартрозу є ефективним і забезпечує зменшення недієздатності верхньої кінцівки на 29,5 бала за опитувальником DASH (медіана; діапазон 13,6–39,0; IQR 9,1).

2. За показниками ефективності зменшення недієздатності кінцівки всі три методики — трапезектомія з пластиною зв'язок смугою сухожилка, трапезектомія з застосуванням гудзикових фіксаторів і надміцної нитки та артродез зап'ястно-п'ясткового суглоба великого пальця кисті — статистично не відрізняються між собою.

3. Методика артродезу, попри ефективне зменшення недієздатності верхньої кінцівки, може супроводжуватися погіршенням функції опозиції великого пальця за шкалою Капанджі, що проявляється негативною динамікою показника: медіана становила –0,5 бала (діапазон –3...–2; IQR 1,5).

4. Обидві методики з трапезектомією забезпечують поліпшення показників опозиції великого пальця за шкалою Капанджі: медіана позитивної динаміки становила 9 балів (діапазон 7–10; IQR 1). Статистично значущих відмінностей між цими методиками не виявлено, однак результати вірогідно відрізнялися від результатів після артродезу зап'ястно-п'ясткового суглоба великого пальця ($p < 0,002$).

Конфлікт інтересів. Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів та власної фінансової зацікавленості при підготовці даної статті.

Список літератури

1. Van der Oest MJW, Duraku LS, Andrinopoulou ER, et al. The prevalence of radiographic thumb base osteoarthritis: a meta-analysis. *Osteoarthritis Cartilage*. 2021 Jun;29(6):785–792. doi: 10.1016/j.joca.2021.03.004.
2. Tymoshenko SV. Principles and Outcomes of Conservative Treatment for Thumb Carpometacarpal Osteoarthritis.

tis. Terra Orthopaedica. 2025;(127):37–42. Ukrainian. doi: 10.37647/2786-7595-2025-127-4-37-42.

3. Reyniers P, Verrewaere D, Houben A, Verstreken F. Short-term Complication Rate in Single- Versus Dual-Mobility Thumb Carpometacarpal Joint Arthroplasty. *Hand (NY)*. 2025 Sep 28;15589447251371091. doi: 10.1177/15589447251371091.

4. Holme TJ, Karbowski M, Clements J, Sharma R, Craik J, Ellahee N. Thumb CMCJ prosthetic total joint replacement: a systematic review. *EFORT Open Rev*. 2021 May 4;6(5):316–330. doi: 10.1302/2058-5241.6.200152.

5. Yuan F, Aliu O, Chung KC, Mahmoudi E. Evidence-Based Practice in the Surgical Treatment of Thumb Carpometacarpal Joint Arthritis. *J Hand Surg Am*. 2017 Feb;42(2):104–112.e1. doi: 10.1016/j.jhssa.2016.11.029.

6. Shonuga O, Nicholson K, Abboudi J, et al. Thumb-Basal Joint Arthroplasty Outcomes and Metacarpal Subsidence: A Prospective Cohort Analysis of Trapeziectomy with Suture Button Suspensionplasty Versus Ligament Reconstruction with Tendon Interposition. *Hand (N Y)*. 2023 Jan;18(1):98–104. doi: 10.1177/1558944721994227.

7. London DA, Stern PJ. Carpometacarpal Arthrodesis: Indications and Techniques. *Hand Clin*. 2022 May;38(2):231–240. doi: 10.1016/j.hcl.2021.11.003.

8. Komura S, Hirakawa A, Hirose H, Akiyama H. Comparison of Surgical Outcomes for Arthrodesis and Arthroplasty for Thumb Carpometacarpal Osteoarthritis in Female Workers. *J Hand Microsurg*. 2024 May 14;16(2):100033. doi: 10.1055/s-0043-1768480.

9. Kapandji A. Clinical test of apposition and counter-apposition of the thumb. *Ann Chir Main*. 1986;5(1):67–73. French. doi: 10.1016/s0753-9053(86)80053-9.

10. Beaton DE, Wright JG, Katz JN; Upper Extremity Collaborative Group. Development of the QuickDASH: comparison of three item-reduction approaches. *J Bone Joint Surg Am*. 2005 May;87(5):1038–1046. doi: 10.2106/JBJS.D.02060.

Отримано/Received 12.04.2026

Рецензовано/Revised 10.05.2026

Прийнято до друку/Accepted 20.05.2026

Information about author

Serhii Tymoshenko, PhD, Leading Research Fellow, Department of Microsurgery and Reconstructive-Recovery Surgery of Upper Limb, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Bulvarno-Kudriavska st., 27, Kyiv, 01054, Ukraine; e-mail: setym@ukr.net; https://orcid.org/0000-0001-6384-4153

Conflicts of interests. Author declares the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

S.V. Tymoshenko

Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine

Outcomes of rhizarthrosis surgical treatment

Abstract. Background. The wide variety of surgical methods proposed for the treatment of rhizarthrosis necessitates a comparative evaluation of the effectiveness of basic techniques and their differentiated use. Objective: to quantitatively assess the effectiveness of different surgical techniques for osteoarthritis of the thumb carpometacarpal (CMC) joint. **Materials and methods.** A single-center retrospective study included 55 patients with rhizarthrosis who underwent surgical treatment using three basic techniques: trapeziectomy with ligament reconstruction and tendon interposition (LRTI procedure) using a strip of the flexor carpi radialis tendon — 34 patients; trapeziectomy using a suspension system with two mini endo-button fixators and high-strength suture material — 14 patients; arthrodesis of the thumb CMC joint — 7 patients. Outcomes were evaluated 12 months postoperatively or later. Thumb opposition was assessed using the Kapandji score, and upper limb function using the DASH questionnaire before and after surgery. **Results.** Surgical treatment of rhizarthrosis

was effective, reducing upper limb disability by 29.5 (13.6–39.0) points on the DASH score (median; interquartile range (IQR) 9.1). No statistically significant differences were found among the three techniques regarding improvement in limb disability. Clinical and radiographic fusion after arthrodesis provided a stable and strong grip; however, thumb opposition decreased: median of change was –0.5 (–3 to –2; IQR 1.5) Kapandji points. Both trapeziectomy techniques significantly improved opposition of the thumb: median was 9 (7–10; IQR 1), with no statistically significant difference between them, but with a significant advantage over arthrodesis of the CMC joint of the thumb ($p < 0.002$). **Conclusions.** All studied surgical techniques effectively reduce functional disability. Trapeziectomy (LRTI or with endo-button fixators) provides superior thumb opposition, whereas arthrodesis ensures a stable power grip at the cost of reduced mobility. **Keywords:** osteoarthritis; carpometacarpal joint; rhizarthrosis; trapeziectomy; arthrodesis; arthroplasty

Ibrahim Barsoum Anis, Wael Samir Abd El Mageed, Sherif Mostafa El Sayed,
Zeiad Mohamed Zakaria, Mohamed El Sayed Awad
Ain Shams University, Cairo, Egypt

Effect of trochlear overstuffing and understuffing on functional outcomes after total knee arthroplasty

Abstract. Background. Total knee arthroplasty (TKA) remains the gold standard treatment for advanced knee osteoarthritis. However, patellofemoral complications continue to affect postoperative outcomes. Alterations in anterior condylar and trochlear thickness during bone resection and prosthesis implantation may influence patellofemoral joint biomechanics and functional results. This study aimed to quantitatively assess changes in trochlear thickness using computed tomography (CT) and evaluate their relationship with short-term functional outcomes following TKA. **Materials and methods.** This prospective cohort study included 87 patients (aged 40–80 years) with advanced knee osteoarthritis undergoing primary TKA. All participants underwent clinical evaluation using Knee Society Score (KSS), patellofemoral score (PFS), and range of motion, along with CT-based measurement of trochlear thickness preoperatively and postoperatively. **Results.** Significant improvements were observed in all clinical and functional outcomes following TKA. PFS improved from 13.00 ± 1.60 to 24.89 ± 1.73 ($P < 0.001$), knee flexion increased from $90.57 \pm 11.19^\circ$ to $106.67 \pm 5.89^\circ$ ($P < 0.001$), and KSS improved from 50.17 ± 5.65 to 88.24 ± 3.19 ($P < 0.001$). A significant negative correlation was identified between postoperative trochlear thickness and knee flexion ($r = -0.33$, $P = 0.002$), indicating that increased thickness was associated with reduced flexion. Patients with decreased trochlear thickness demonstrated significantly greater postoperative flexion compared to those with increased thickness ($P < 0.001$). A borderline difference in PFS was observed between groups ($P = 0.05$), while no significant association was found between trochlear thickness and KSS. These findings suggest that changes in trochlear thickness selectively influence knee flexion rather than overall functional scores. **Conclusions.** Trochlear thickness was not associated with global functional outcomes but demonstrated a modest relationship with postoperative knee flexion. Careful restoration of anterior femoral anatomy may influence specific functional outcomes after TKA. Further studies are required to determine the long-term clinical relevance of these findings.

Keywords: total knee arthroplasty; Knee Society Score; trochlear thickness; patellofemoral score

Introduction

Total knee arthroplasty (TKA) is the gold standard treatment for advanced knee osteoarthritis, providing significant pain relief and functional improvement. However, up to 15–25 % of patients remain dissatisfied, with patellofemoral complications accounting for a substantial proportion of suboptimal outcomes. These complications are often multifactorial, involving implant positioning, component sizing, soft tissue balance, and restoration of anterior femoral anatomy [1, 2].

Among these factors, alterations in trochlear (TT) and anterior condylar thickness during femoral preparation have gained increasing attention. Both patellofemoral overstuffing (increased thickness) and understuffing (decreased

thickness) may disrupt patellofemoral biomechanics, potentially affecting quadriceps efficiency, joint contact forces, and knee flexion. Despite biomechanical and experimental evidence suggesting the importance of patellofemoral thickness, clinical studies evaluating its impact on functional outcomes remain limited and inconclusive [3, 4].

Most previous studies have focused on patellar thickness or composite patellofemoral thickness, with relatively few investigations specifically assessing TT using objective imaging modalities. Furthermore, the relationship between radiologically measured TT and short-term functional outcomes after TKA has not been clearly established [5–7].

The purpose of the present study was to quantitatively evaluate changes in trochlear thickness using computed

tomography (CT) and to investigate their association with postoperative functional outcomes, including Knee Society Score (KSS), patellofemoral score (PFS), and knee range of motion (ROM).

This study provides novel clinical insight by correlating CT-based measurements of TT with functional outcomes in a prospective cohort, thereby contributing to a better understanding of patellofemoral mechanics in TKA.

Materials and methods

This prospective cohort study was carried out at Ain Shams University hospitals over a period of 2 years, starting in September 2022 and ended in September 2024. Eighty-seven patients were recruited, aged 40 to 80 years, both sexes, with advanced knee osteoarthritis in which TKA is indicated.

All patients provided written informed consent prior to participation. The study was approved by the Ethical Committee of Ain Shams University hospitals (approval code: MD 205/2022).

Patients with revision TKA, a history of osteotomy around the knee, post-traumatic knee arthritis, or inflammatory knee arthritis were excluded.

Each patient underwent a comprehensive preoperative assessment, including detailed history taking, general and local clinical examination, preoperative KSS and PFS evaluation, as well as radiological examination using standard imaging protocols.

Preoperative pain management

It aims to reduce the severity of postoperative pain by addressing it before surgery. This approach may include the preoperative administration of acetaminophen (paracetamol) to reduce postoperative pain; nonsteroidal anti-inflammatory drugs, such as ibuprofen or celecoxib, to decrease inflammation and pain; gabapentin or pregabalin to reduce neuropathic pain and enhance the effects of other pain medications; and regional anesthesia, such as a nerve block, to numb the surgical site.

Surgical technique

Orthopedic surgeons with extensive experience conducted each operation. The medial parapatellar approach was employed to perform the knee arthroplasties, which involved the cementing prostheses. All patients received posterior stabilized prostheses with implant casts (ACS® MB system). This prosthesis enabled anterior referencing to facilitate the most extensive anterior resection as near to the cortex as possible without causing notching. The coronal alignment was established at a 90-degree angle to the mechanical axis of the femur. In order to prevent the femur from being notched, the sagittal alignment was designed to be parallel to the anatomical axis of the distal femur. Rotation was established according to the surgical trans-epicondylar axis, with secondary reference to the anteroposterior (Whiteside's line) axis when it was present. The appropriate implant size was subsequently determined.

We adjusted the size of the femoral component to be as close as possible to the lateral posterior condyles in

varus osteoarthritis, and the medial posterior condyles in valgus osteoarthritis. Subsequently, anterior referencing was implemented to ascertain the appropriate implant size. Next, an angel wing was employed to check that there is no notching at the anterior cortex of the femur. The sizing objective is to guarantee that the prosthesis is aligned flush with the anterior femoral cortex, thereby ensuring a seamless fit. This entails the selection of the optimal prosthesis to accomplish maximal anterior resection near the cortex without notching. In order to prevent the clunk syndrome, parapatellar synovectomy was conducted on all non-resurfacing patellae. A case was subjected to systematic cauterization. TT was assessed intraoperatively and verified using an angel wing to prevent notching.

Intraoperative pain management, including regional anesthesia, continuation of nerve blocks, or epidural anesthesia, local anesthetics directly injected into the knee joint, and intravenous medications such as opioids (e.g., fentanyl, morphine) for immediate pain control, was used to control pain during surgery and reduce postoperative pain.

Postoperative management

Postoperative CT scans assessed trochlear thickness of the patellofemoral joint (PFJ) as the distance between the deepest point of the femoral component trochlea and a line tangential to the anterior femoral cortex on sagittal cuts. Pain management followed ASA guidelines, starting with intravenous opioids, acetaminophen, non-steroidal anti-inflammatory drugs, and cryotherapy in the immediate phase, progressing to oral medications, physiotherapy, and adjuncts such as TENS and heat therapy through recovery phases to reduce opioid use and support rehabilitation.

All patients received 2 g of cefazolin within 60 minutes of incision and continued antibiotics for 48 hours for infection prophylaxis. Apixaban was given for two weeks postoperatively for VTE prevention per NICE and AAOS guidelines. Physiotherapy and rehabilitation followed AAOS and NICE evidence-based postoperative care protocols.

Follow-up

Functional status was assessed preoperatively, and treatment outcomes were evaluated at six months follow-up using KSS, PFS and ROM.

Sample size calculation

Assuming a medium effect size difference ($d_z = 0.5$), the estimated sample size will be 76 patients with TKA to detect a statistically significant difference between the preoperative and postoperative KSS at 6 months, using the G power program for sample size calculation. The power is set at 99 %, and the α error is set at 5 %. We required a minimum of 88 TKA procedures, assuming a drop-out rate of approximately 15 %.

Statistical analysis

Statistical analysis was performed using SPSS version 26 (IBM Corp., Armonk, NY, USA). Continuous variables

were expressed as mean ± standard deviation (SD), while categorical variables were presented as frequencies and percentages.

The normality of data distribution was assessed using the Shapiro-Wilk test. For comparisons between preoperative and postoperative measurements (KSS, PFS, ROM, and TT), a paired Student’s t-test was used, as these variables were measured in the same group of patients.

For comparisons between independent groups (patients with increased versus decreased trochlear thickness), an independent Student’s t-test was applied.

Correlations between continuous variables (e.g., postoperative TT and functional outcomes) were evaluated using the Pearson correlation coefficient (r).

In addition to p-values, 95% confidence intervals (CIs) were calculated for key outcome differences to provide an estimate of the precision of the results.

A two-tailed P value of < 0.05 was considered statistically significant.

Results

The study included 87 patients with a mean age of 60.59 ± 5.21 years. Most of the patients were females (71.3 %), while males represented 28.7 %. The mean body weight was 88.67 ± 9.13 kg and the mean height was 160.67 ± 8.63 cm, giving an average body mass index of 34.40 ± 3.13 kg/m² (Table 1).

Table 1. Characteristics the studied patients (n = 87)

Parameters		Numeric data
Age (years)		60.59 ± 5.21
Sex	Male	25 (28.7 %)
	Female	62 (71.3 %)
Weight (kg)		88.67 ± 9.13
Height (cm)		160.67 ± 8.63
BMI (kg/m²)		34.40 ± 3.13

There was a significant improvement in all clinical and functional outcomes after surgery. PFS showed a marked increase postoperatively (P < 0.001). The knee flexion range improved from 90.57 ± 11.19° before surgery to 106.67 ± 5.89° after it (P < 0.001). Also, KSS increased significantly from 50.17 ± 5.65 to 88.24 ± 3.19 (P < 0.001).

On the other hand, there was no significant change in TT after surgery (P > 0.05) (Table 2). No significant correlation was found between postoperative TT and either KSS or PFS (P > 0.05). However, a significant negative correlation was noted between postoperative TT and the knee flexion range (r = -0.33, P = 0.002), meaning that patients with less trochlear thickness had more flexion range.

Table 2. Comparison between preoperative and postoperative PFS, flexion range, KSS, and TT, mean ± SD

Parameters	Preoperatively	Postoperatively	P value
PFS score	13.00 ± 1.60	24.89 ± 1.73	< 0.001*
Flexion range	90.57 ± 11.19	106.67 ± 5.89	< 0.001*
KSS	50.17 ± 5.65	88.24 ± 3.19	< 0.001*
TT	8.67 ± 1.84	8.82 ± 1.08	0.46

Note: * – highly significant P value (P < 0.001)

Table 3. Correlation between postoperative TT and outcomes, relation between change in TT and postoperative KSS, flexion range, PFS

KSS after 6 months	r	-0.01
	P value	0.92
Flexion range	r	-0.33
	P value	0.002
PFS	r	-0.01
	P value	0.96
Change in TT		
KSS after 6 months	Decreased	Increased
	87.65 ± 3.55	88.90 ± 2.62
P value	0.06	
Flexion range	109.24 ± 4.71	103.78 ± 5.79
P value	< 0.001	
PFS	24.54 ± 1.79	25.27 ± 1.60
P value	0.05	

When dividing the patients into two groups according to the change in TT, those with decreased TT had higher mean flexion ($109.24 \pm 4.71^\circ$) compared to those with increased TT ($103.78 \pm 5.79^\circ$, $P < 0.001$). There was a slight difference in PFS between the two groups (24.54 ± 1.79 vs. 25.27 ± 1.60 , $P = 0.05$), but KSS showed no significant difference (87.65 ± 3.55 vs. 88.90 ± 2.62 , $P > 0.05$) (Table 3).

Discussion

Insufficient restoration of anterior condylar anatomy may have implications for the functional outcomes of patients undergoing TKA [8]. In particular, the precise restoration of patellofemoral anatomy with fixed prosthesis designs can be difficult, as both anterior femoral resection and patellar resurfacing can contribute to a disparity between the host and the prosthesis [9, 10].

The present study evaluated the relationship between changes in TT and functional outcomes following total knee arthroplasty using CT-based measurements. The principal findings were that trochlear thickness was not significantly associated with KSS or PFS, but showed a modest negative correlation with postoperative knee flexion. Specifically, increased TT was associated with reduced flexion, while decreased thickness was associated with slightly lower PFS.

These findings are clinically relevant, as they suggest that small variations in TT may selectively influence knee flexion rather than overall functional scores. This highlights the importance of anterior femoral reconstruction in optimizing postoperative ROM, which is a key determinant of patient satisfaction after TKA.

In this study, the main focus was on the influence of changes in trochlear thickness and its impact on the functional outcome after TKA. Our findings indicated that there was no significant correlation between alterations in TT and postoperative KSS. However, after surgery, an increase in trochlear thickness was associated with a decrease in flexion ROM, while a decrease in TT was associated with a mild decrease in PFS. The mean TT was 8.67 mm preoperatively and 8.82 mm postoperatively, showing no significant change overall. Although flexion ROM and PFS after surgery were not clinically significant, a weak correlation was observed between changes in trochlear thickness and patient satisfaction scores.

Our results are consistent with previous biomechanical and clinical studies that have demonstrated the adverse effects of patellofemoral overstuffing.

Previous studies have highlighted a tendency towards increased trochlear thickness [11–14], which can result in overstuffing in the PFJ. The latter can occur due to minimal anterior femoral bone resection compared to prosthesis replacement, possibly leading to adverse outcomes. Concerns about ROM impact have discouraged surgeons from overstuffing the PFJ [14, 15].

Conversely, understuffing of the PFJ, where more anterior femoral bone is resected than substituted by the prosthesis [16], can lead to decreased TT and potential complications such as quadriceps weakness, patellar maltracking, and anterior knee pain [13, 14].

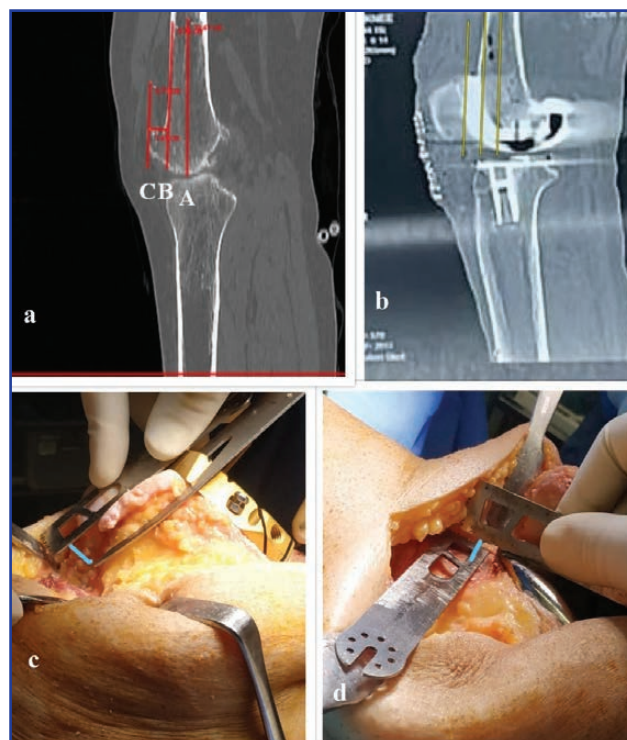


Figure 1: a — preoperative CT scan sagittal cut with the measure of the TT; b — postoperative CT scan sagittal cut with the measure of the TT; c — intraoperative check by angle wing to avoid notching; d. Intraoperative picture after definite prosthesis. Line A expresses the anatomical axis of femur, line B is tangential to the anterior cortex of femur and parallel to line A, line C represents the deepest part of the trochlea

In our study, 41 cases experienced an increase in trochlear thickness. This group showed a statistically significant decrease in postoperative flexion ROM but no significant changes in KSS or PFS. Kawahara et al. [17] emphasized the necessity of upsizing the femoral component in specific cases and the importance of avoiding flexion instability with PCL-substituted designs. However, increasing femoral component size may increase PF forces, leading to PF complications or limited flexion. The trochlear canal is often displaced anteriorly in overstuffing [18], which may result in tension, soft tissue restriction, limited knee flexion, and anterior knee pain [19].

The remaining 46 patients who had a decrease in trochlear thickness showed a slight but statistically significant decrease in postoperative PFS, probably due to the effect on the quadriceps lever arm, with no significant change in KSS or ROM. D'Lima [20] and Patel [21] also reported that excessive anterior femoral resection can lead to PFJ understuffing, reducing the quadriceps lever arm and contributing to patellofemoral pain.

Overall, there was no significant change in mean TT, with only a 0.2 mm difference between preoperative and postoperative measurements. Thus, in our study, native trochlear thickness was preserved within normal ranges.

Shalhoub et al. [22] noted that trochlear resection thickness depends on femoral implant size and positioning. They

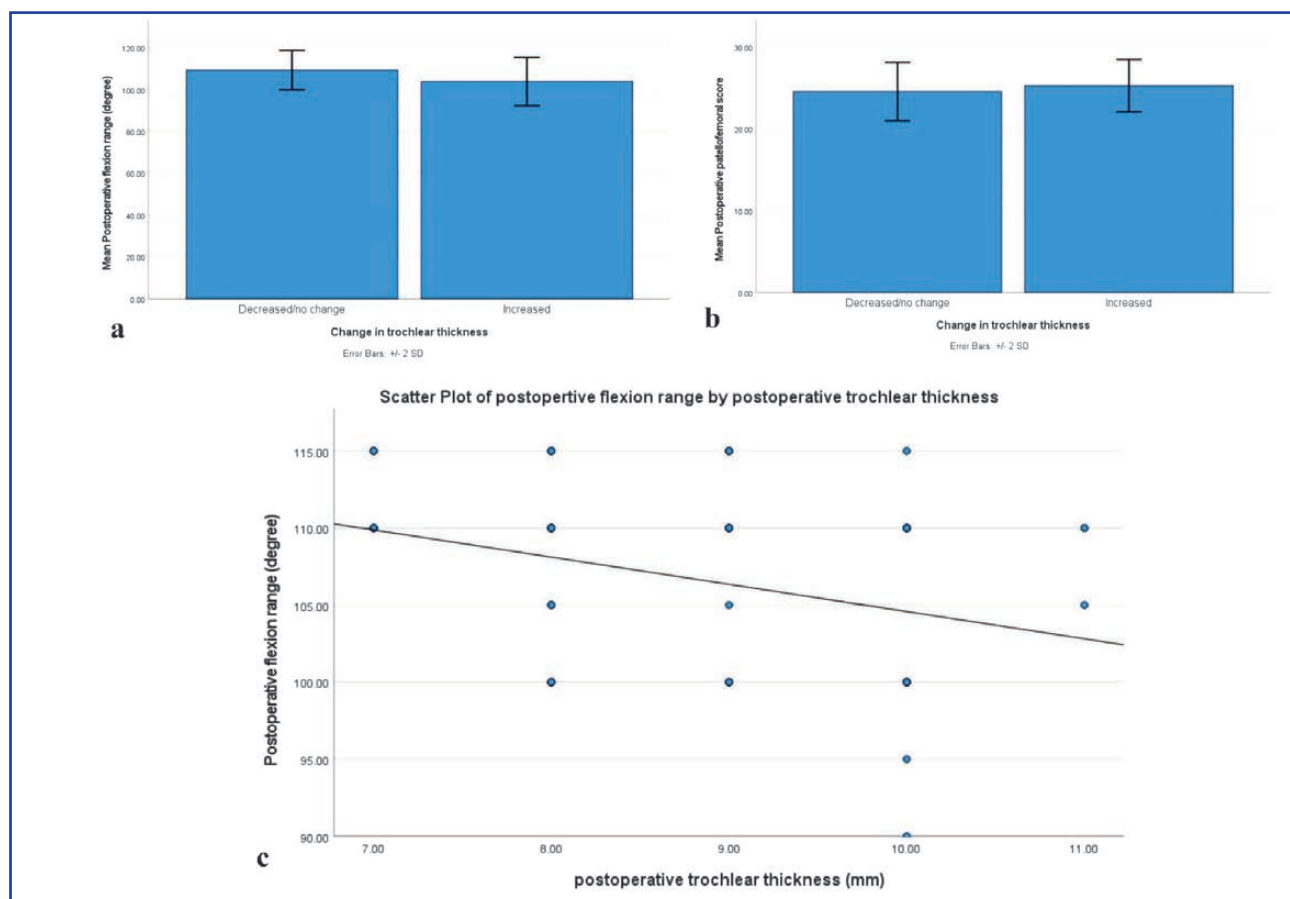


Figure 2: a – relation between TT and postoperative ROM (flexion); b – relation between TT and postoperative PFS; c – correlation between TT after surgery and postoperative outcomes

recommended a “posterior up” technique to maintain flexion space while adjusting trochlear resection by femoral size. They found that maintaining TT within ± 2 mm of the native value minimally affects the extensor mechanism, while deviations of ± 4 mm significantly alter function and soft tissue tension. Therefore, surgeons should aim to remove an amount of natural bone equal to the thickness of the prosthetic trochlea.

It is clear that the PFJ has not received enough attention until recent years. Greater focus on soft tissue tension, anterior offset, and extensor mechanism function may help avoid postoperative pain or dysfunction caused by overstuffing or understuffing.

Our study also confirmed that adjusting trochlear resection thickness by femoral sizing affects outcomes. Maintaining flexion space while preserving extensor apparatus balance is essential.

Although our follow-up period was limited to six months, this interval was chosen to allow for early functional and radiological evaluation while avoiding bias from late postoperative factors such as muscle weakness, component wear, or patient comorbidities. Longer follow-up studies are recommended to confirm the persistence of these findings and to determine if small variations in TT might have delayed effects on PFJ function and patient satisfaction.

Clinical relevance

The findings of this study have direct implications for surgical practice in total knee arthroplasty. Although overall functional scores such as KSS and PFS were not significantly affected by changes in trochlear thickness, the observed association with knee flexion suggests that even small variations in anterior femoral reconstruction may influence postoperative ROM.

From a clinical perspective, this highlights the importance of avoiding excessive patellofemoral overstuffing, which may limit flexion due to increased anterior offset and soft tissue tension, as well as understuffing, which may compromise extensor mechanism efficiency. Therefore, careful intraoperative assessment of anterior femoral resection and implant sizing is essential to maintain TT within a physiological range.

These findings support the concept that restoration of native anterior femoral anatomy should be considered an important technical goal during TKA, particularly when postoperative flexion is a priority for functional recovery. However, given the modest strength of the observed associations, TT should be interpreted as one of several factors influencing outcomes rather than an isolated determinant.

Limitations of this study include the relatively short follow-up period, the use of CT scans rather than mag-

netic resonance imaging (which could better assess cartilage thickness), and reliance on a single prosthesis design. Additionally, patient-reported outcome scores may have ceiling effects. Future studies with longer follow-up and larger sample sizes are recommended to validate these findings.

Conclusions

In this study, changes in trochlear thickness were not significantly associated with postoperative KSS or PFS. However, a modest negative correlation was observed between postoperative TT and knee flexion range, suggesting that increased thickness may be associated with reduced flexion.

Patients with decreased TT demonstrated greater postoperative flexion, while those with increased thickness had lower flexion values. A slight difference in PFS was observed between groups, although it was of borderline statistical significance.

These findings suggest that variations in TT may influence certain functional outcomes, particularly knee flexion. However, given the observational design and short-term follow-up, no definitive causal relationship can be established.

Prospects for further research. Further studies with larger sample sizes and longer follow-up are needed to confirm the long-term clinical impact of TT on functional outcomes after TKA. Future research should also evaluate the influence of different implant designs and surgical techniques on patellofemoral biomechanics. In addition, advanced imaging and biomechanical analyses may provide deeper insight into the dynamic relationship between TT and knee function. Finally, comparative studies are required to determine whether targeted intraoperative optimization of trochlear thickness can improve clinical outcomes.

References

1. Urbain A, Putman S, Migaud H, Pasquier G, Girard J, Dartus J. Long-term results (after a mean 11.3 years, and up to 22 years, of follow-up) of the Legacy Constrained Condylar Knee (LCKK™) in primary total knee arthroplasty. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*. 2024 May 1;110(3):103795. doi: 10.1016/j.otsr.2023.103795
2. Vanitcharoenkul E, Unnanuntana A. Midterm functional recovery of Total knee arthroplasty patients compared between the ATTUNE knee system and the press fit condylar (PFC) SIGMA knee system. *BMC Musculoskeletal Disorders*. 2021 Jul 13;22(1):620. doi: 10.1186/s12891-021-04464-6.
3. Choi YJ, Ra HJ. Patient Satisfaction after Total Knee Arthroplasty. *Knee Surg Relat Res*. 2016 Mar;28(1):1-15. doi: 10.5792/ksrr.2016.28.1.1.
4. Park JH, Bin SI, Kim JM, Lee BS, Lee CR, Kim JM, Cho Y. Comparison of patellar tracking according to different angles of external rotation of femoral component in varus knee of Asians. *Journal of Orthopaedic Surgery*. 2017 Nov 17;25(3):2309499017739498. doi: 10.1177/2309499017739498.
5. Yang G, Dai Y, Dong C, Niu Y, Kang H, Wang F. Two-type classification system for femoral trochlear dysplasia in recurrent patellar instability based on three-dimensional morphology. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2023 May;31(5):1790-7. doi: 10.1007/s00167-022-07077-1.
6. Barber P, Lack SD, Bartholomew C, Curran AJ, Lowe CM, Morrissey D, Neal BS. Patient experience of the diagnosis and management of patellofemoral pain: A qualitative exploration. *Musculoskeletal Science and Practice*. 2022 Feb 1;57:102473. doi: 10.1016/j.msksp.2021.102473.
7. Park JC, Kim YN. Effects of knee extension exercise using blood flow restriction on the thickness and balance ability of tendons. *The Journal of Korean Physical Therapy*. 2018 Apr 30;30(2):41-6. doi: 10.18857/jkpt.2018.30.2.41.
8. Pawar RD, Shih JA, Balaji L, Grossestreuer AV, Patel PV, Hansen CK, et al. Variation in SOFA (Sequential Organ Failure Assessment) score performance in different infectious states. *Journal of Intensive Care Medicine*. 2021 Oct;36(10):1217-22. doi: 10.1177/0885066620944879.
9. Evans L, Rhodes A, Alhazzani W, Antonelli M, Cooper-Smith CM, French C, et al. Surviving sepsis campaign: international guidelines for management of sepsis and septic shock 2021. *Critical care medicine*. 2021 Nov 1;49(11):e1063-143. doi: 10.1097/CCM.0000000000005337.
10. Levy MM, Evans LE, Rhodes A. The surviving sepsis campaign bundle: 2018 update. *Intensive Care Medicine*. 2018 Jun;44(6):925-8. doi: 10.1007/s00134-018-5085-0.
11. Baptiste L, Carrillon R, Javelier S, Guyotat J, Desgranges FP, Lehot JJ, Lukaszewicz AC. Pulse pressure variations and plethysmographic variability index measured at ear are able to predict fluid responsiveness in the sitting position for neurosurgery. *Journal of Neurosurgical Anesthesiology*. 2020 Jul 1;32(3):263-7. doi: 10.1097/ANA.0000000000000587.
12. Soliman R. Prediction of fluid status and survival by electrical cardiometry in septic patients with acute circulatory failure. *The Egyptian Journal of Critical Care Medicine*. 2017 Aug;5(2):65-8. doi: 10.1016/j.ejccm.2017.03.001.
13. Dejour D, Ntigiopoulos PG, Saffarini M. Evidence of trochlear dysplasia in femoral component designs. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2014 Nov;22(11):2599-607. doi: 10.1007/s00167-012-2268-z.
14. Kandhari VK, Desai MM, Bava SS, Wade RN. Digging Deeper into the Patello-Femoral Joint: Patello-Femoral Composite — A New Dimension for Overstuffing of Patello-Femoral Joint. *J Clin Diagn Res*. 2017 Mar;11(3):RC04-RC07. doi: 10.7860/JCDR/2017/23192.9546.
15. Abolghasemian M, Samiezadeh S, Sternheim A, Bougherara H, Barnes CL, Backstein DJ. Effect of patellar thickness on knee flexion in total knee arthroplasty: a biomechanical and experimental study. *The Journal of Arthroplasty*. 2014 Jan 1;29(1):80-4. doi: 10.1016/j.arth.2013.04.026.
16. Hamilton WG, Ammeen DJ, Parks NL, Goyal N, Engh GA, Engh CA Jr. Patellar cut and composite thickness: the influence on postoperative motion and complications in total knee arthroplasty. *The Journal of Arthroplasty*. 2017 Jun 1;32(6):1803-7. doi: 10.1016/j.arth.2016.12.033.
17. Kawahara S, Matsuda S, Fukagawa S, Mitsuyasu H, Nakahara H, Higaki H, et al. Upsizing the femoral component increases patellofemoral contact force in total knee replacement. *J Bone Joint Surg Br*. 2012 Jan 1;94(1):56-61. doi: 10.1302/0301-620X.94B1.27514.

18. Mihalko W, Fishkin Z, Krakow K. Patellofemoral overstuff and its relationship to flexion after total knee arthroplasty. *Clinical Orthopaedics and Related Research* (1976–2007). 2006 Aug 1;449:283–7. doi: 10.1097/01.blo.0000218756.89439.06.

19. Amis AA, Firer P, Mountney J, Senavongse W, Thomas NP. Anatomy and biomechanics of the medial patellofemoral ligament. *The Knee*. 2003 Sep 1;10(3):215–20. doi: 10.1016/S0968-0160(03)00006-1.

20. D'Lima DD, Poole C, Chadha H, Hermida JC, Mahar A, Colwell CW Jr. Quadriceps moment arm and quad-

riceps forces after total knee arthroplasty. *Clin Orthop Relat Res*. 2001 Nov;392:213–20. doi: 10.1097/00003086-200111000-00026.

21. Patel J, Ries MD, Bozic KJ. Extensor mechanism complications after total knee arthroplasty. *Instructional Course Lectures*. 2008 Jan 1;57:283–94.

22. Shalhoub S, Fitzwater F, Clary C, Maletsky L. Patellofemoral thickness influences patellar kinematics and extensor efficiency. *ORS 2016. Annual Meeting Poster No. 0034*.

Received 10.03.2026

Revised 12.04.2026

Accepted 16.07.2026

Information about authors

Ibrahim Barsoum Anis, Department of Orthopaedic Surgery, Faculty of Medicine, Ain Shams University, Cairo, Egypt; e-mail: Mostafa-Ramadan@med.asu.edu.eg

Wael Samir Abd El Mageed, Department of Orthopaedic Surgery, Faculty of Medicine, Ain Shams University, Cairo, Egypt

Sherif Mostafa El Sayed, Department of Orthopaedic Surgery, Faculty of Medicine, Ain Shams University, Cairo, Egypt

Zeiad Mohamed Zakaria, Department of Orthopaedic Surgery, Faculty of Medicine, Ain Shams University, Cairo, Egypt

Mohamed El Sayed Awad, Department of Orthopaedic Surgery, Faculty of Medicine, Ain Shams University, Cairo, Egypt

Conflicts of interests. Authors declare the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

Information about funding. No funding.

Authors' contribution. Ibrahim Barsoum Anis, Wael Samir Abd El Mageed — conceived and supervised the study, responsible for data collection; Mohamed El Sayed Awad — conceived and supervised the study, analyzed and interpreted the data; Zeiad Mohamed Zakaria, Sherif Mostafa El Sayed — responsible for data collection, analyzed and interpreted the data. All authors provided comments on the manuscript at various stages of development, read and approved the final manuscript.

Ibrahim Barsoum Anis, Wael Samir Abd El Mageed, Sherif Mostafa El Sayed, Zeiad Mohamed Zakaria, Mohamed El Sayed Awad

Ain Shams University, Cairo, Egypt

Вплив надлишкової та недостатньої товщини борозни блока стегнової кістки на функціональні результати після тотального ендопротезування колінного суглоба

Резюме. Актуальність. Тотальне ендопротезування колінного суглоба (ТЕКС) залишається золотим стандартом лікування прогресуючого остеоартриту колінного суглоба. Однак ускладнення з боку пателофеморальної ділянки продовжують впливати на післяопераційні результати. Зміна товщини переднього виростка й борозни блока стегнової кістки (ББСК) під час резекції кістки та імплантації протеза може впливати на біомеханіку пателофеморального суглоба й функціональні результати. **Мета:** кількісно оцінити зміни товщини ББСК за допомогою комп'ютерної томографії та їх зв'язок із короткостроковими функціональними результатами після ТЕКС. **Матеріали та методи.** Це проспективне когортне дослідження включало 87 пацієнтів віком 40–80 років із прогресуючим остеоартритом колінного суглоба, які перенесли первинне ТЕКС. Усім хворим до та після операції проводили клінічне обстеження з використанням шкали Товариства хірургії колінного суглоба (KSS), пателофеморальної шкали (PFS) та оцінкою амплітуди рухів, а також визначали товщину ББСК за даними комп'ютерної томографії. **Результати.** Спостерігалось статистично значуще поліпшення всіх клінічних та функціональних результатів після ТЕКС. Показники PFS зросли з $13,00 \pm 1,60$ до $24,89 \pm 1,73$ ($P < 0,001$), амплітуда згинання в колінному суглобі — з $90,57 \pm 11,19^\circ$ до $106,67 \pm 5,89^\circ$

($P < 0,001$), а значення KSS — з $50,17 \pm 5,65$ до $88,24 \pm 3,19$ ($P < 0,001$). Виявлено статистично значущу негативну кореляцію післяопераційної товщини ББСК зі згинанням у колінному суглобі ($r = -0,33$, $P = 0,002$). Це свідчить про те, що збільшення товщини було пов'язане зі зменшенням амплітуди згинання. У пацієнтів зі зменшеною товщиною ББСК після операційне згинання було статистично значуще вищим, ніж в осіб зі збільшеною товщиною ($P < 0,001$). Між групами виявлено гранично значущу різницю за показником PFS ($P = 0,05$), тоді як статистично значущого зв'язку товщини ББСК і даних KSS не виявлено. Отримані результати вказують на те, що зміна товщини ББСК вибірково впливає на згинання в колінному суглобі, а не на загальні функціональні показники. **Висновки.** Товщина ББСК не була пов'язана із загальними функціональними результатами, однак продемонструвала помірну кореляцію з післяопераційним згинанням у колінному суглобі. Точне відновлення анатомії переднього відділу стегнової кістки може впливати на специфічні функціональні результати після ТЕКС. Для визначення довгострокової клінічної значущості цих результатів необхідні подальші дослідження.

Ключові слова: тотальне ендопротезування колінного суглоба; шкала Товариства хірургії колінного суглоба; товщина борозни блока стегнової кістки; пателофеморальна шкала

Страфун С.С.¹, Богдан С.В.¹, Страфун О.С.¹, Сергієнко Р.О.²¹ДУ «Національний інститут травматології та ортопедії НАМН України», м. Київ, Україна²Національний університет фізичного виховання і спорту України, м. Київ, Україна

Результати шва сухожилків ротаторної манжети плеча у хворих з різними стадіями ротаторної артропатії плечового суглоба (ретроспективне дослідження)

Резюме. Актуальність. Існує велика кількість хворих, у яких ми спостерігаємо незадовільні результати шва сухожилків ротаторної манжети плеча (РМП), незважаючи на правильно проведене хірургічне лікування, адекватну реабілітацію та відсутність повторної травми в анамнезі. **Мета роботи:** дослідити результати шва сухожилків ротаторної манжети плеча у хворих з ротаторною артропатією плечового суглоба різних стадій. **Матеріали та методи.** У 174 (100 %) хворих з ротаторною артропатією різного ступеня виконано шов сухожилків РМП як відкритим способом — 67 (38,5 %) хворих, так і за допомогою артроскопічної техніки — 107 (61,5 %) хворих. У нашому дослідженні всіх хворих було розділено на групи залежно від стадії ротаторної артропатії за Хамада. Оцінку функції плечового суглоба ми проводили за шкалами Constant Shoulder Score та ВАШ до оперативного втручання, через 6 та 12 міс. після операції. **Результати.** Найкращі середні результати за Constant Shoulder Score через 6 міс. після операції серед усіх хворих було отримано в групі з 1-ю стадією ротаторної артропатії — $36,9 \pm 19,1$ бала, дещо гірші середні результати отримано в групі з 2-ю стадією ротаторної артропатії — $41,4 \pm 12,1$. У групах з 3-ю та 4-ю стадіями ротаторної артропатії результати майже не відрізнялись від передопераційних. **Висновки.** Ми не рекомендуємо виконувати шов сухожилків ротаторної манжети у хворих з 2–4-ю стадіями ротаторної артропатії.

Ключові слова: ротаторна манжета плеча; ротаторна артропатія; сухожилок надостового м'яза; плечовий суглоб

Вступ

Можливості сучасної артроскопії суттєво змінили підходи до лікування розривів сухожилків ротаторної манжети плеча (РМП) та дозволили отримувати кращі результати хірургічного лікування цієї групи хворих; окрім того, вони змістили акценти в хірургії плечового суглоба (ПС) [1, 7].

Проте існує велика кількість хворих, у яких ми спостерігаємо незадовільні результати хірургічного лікування даної нозології, незважаючи на правильно проведене хірургічне лікування, адекватну реабілітацію та відсутність повторної травми в анамнезі. Це так звані невідновні розриви сухожилків РМП, кількість яких, за деякими даними, сягає 30 % у загальній структурі

розривів сухожилків РМП [1–4]. У цієї групи хворих має місце або значна ретракція сухожилків, або жирово-дегенерация м'язового черевця. Також важливе місце у прогнозуванні результату хірургічного відновлення сухожилків РМП займають величина розриву (чим більший розрив, тим швидше настає і ретракція сухожилка, і жирово-дегенерация м'яза) та час з моменту травми [1, 5–7].

Дуже часто під час виконання шва сухожилків РМП ортопеди нехтують супутніми захворюваннями у пацієнта та наявністю інших ушкоджень ПС (відрив суглобової губи лопатки, вторинний адгезивний капсуліт, омартроз тощо). Не останнє місце серед супутньої патології ПС, яка суттєво впливає на результат хірургіч-

ного відновлення сухожилків РМП, займає ротаторна артродістазія ПС [1, 5, 8].

Мета роботи: дослідити результати шва сухожилків ротаторної манжети плеча у хворих з ротаторною артродістазією плечового суглоба різних стадій.

Матеріали та методи

З 2008 по 2025 рік на базі клініки реконструктивно-відновної хірургії верхньої кінцівки Державної установи «Інститут травматології та ортопедії НАМН України» (м. Київ) було проведено лікування 391 хворого з ротаторною артродістазією ПС різних стадій. З них у 174 (100 %) випадках було виконано шов сухожилків РМП як відкритим способом — 67 (38,5 %) хворих, так і за допомогою артроскопічної техніки — 107 (61,5 %) хворих. Іншим хворим було виконано різноманітні втручання (відновлення верхньої капсули ПС, різноманітні транспозиції сухожилків та реверсивне протезування), залежно від стадії ротаторної артродістазії.

У нашому дослідженні всіх хворих було розділено на групи залежно від стадії ротаторної артродістазії за Хамада [1, 9]. Хворих з 4-ю стадією на підгрупи ми не розділяли у зв'язку з невеликою кількістю хворих та майже однаковими результатами в усіх них. Хворим з 5-ю стадією ротаторної артродістазії шов РМП не виконували. Загальні характеристики груп наведено в табл. 1.

Усі хворі під час госпіталізації були всебічно обстежені, включно з проведенням спеціальних тестів, рентгенографією та МРТ ПС, зокрема оцінювали жирову дегенерацію м'язів РМП в T1-режимі.

Також в T1-режимі кількісно оцінювали глобальний індекс жирової дегенерації (GFDI). GFDI розраховували як середнє значення балів за шкалою Гутальє (від 0 до 4), що присвоюються надостному, підостному та підлопатковому м'язам, які виявляються за допомогою МРТ. Вищий GFDI вказує на більш тяжку жирову інфільтрацію та пов'язаний з гіршим прогнозом, включно з підвищеним ризиком повторного розриву та зни-

женням функціональних результатів після операції на ротаторній манжеті [1, 10].

Оцінку функції ПС було проведено за шкалами Constant Shoulder Score та ВАШ до оперативного втручання, через 6 та 12 міс. після операції.

Критеріями включення до дослідження ми вважали: наявність ротаторної артродістазії ПС, відсутність кісткових ушкоджень проксимального епіметафіза плечової кістки чи лопатки, яку ми визначали як клінічно, так і за допомогою додаткових методів дослідження (рентгенографія, МРТ), виконання стандартного протоколу оперативного втручання та програми післяопераційної реабілітації, огляди пацієнта після оперативного втручання через 6 та 12 міс.

Усім хворим оперативне втручання проводилось стандартним способом одним хірургом: положення «пляжного крісла», при артроскопічному варіанті операції застосовували стандартні артроскопічні доступи до ПС. Інтраопераційна діагностика проводилась за допомогою артроскопа діаметром 4,5 мм з нахилом оптики 30°. При відкритих оперативних втручаннях виконували мініспліт-доступ до сухожилків РМП (рис. 1).

Усім хворим виконувалися: дебрідмент ПС, тенотомія чи тенодез сухожилка довгої голівки біцепса, дворядний чи черезкістковий шов сухожилків РМП (рис. 2).

Усім хворим в операційній накладалася м'яка (при артроскопічному шві) або гіпсова (при відкритому шві) іммобілізаційна пов'язка з пристроєм відведення 25 градусів на 6 тижнів. У післяопераційний період призначалися знеболювальні 3 рази на добу та протизапальні препарати 1 раз на добу в середньотерапевтичних дозах.

Хворий самостійно заповнював форму зі шкалою Constant Shoulder Score та ВАШ. Тест з динамометром хворий виконував до появи больових відчуттів. Контроль правильності виконання всіх тестів Constant Shoulder Score покладался на одного лікаря, який був асистентом під час оперативного втручання.

Таблиця 1. Основні характеристики груп дослідження

Характеристика	1-ша стадія (n = 79)	2-га стадія (n = 61)	3-тя стадія (n = 16)	4-та стадія (n = 18)
Відкритий спосіб, n (%)	25 (14,4)	20 (11,5)	14 (8)	10 (5,8)
Артроскопічний, n (%)	54 (31)	41 (23,6)	2 (1,1)	8 (4,6)
Стать: ч/ж (%)	23 (13,2)/56 (32,2)	25 (14,4)/36 (20,1)	5 (2,9)/11 (6,3)	10 (5,8)/8 (4,6)
Вік, років	54,1 ± 12,1	57,7 ± 11,3	51,1 ± 14,9	60,7 ± 10,9
Середня кількість ушкоджених сухожилків РМП	2,1 ± 1,9	2,4 ± 0,5	2,2 ± 0,7	2,1 ± 0,4
Глобальний індекс жирової дегенерації	2,1 ± 0,5	2,3 ± 1,1	2 ± 1,3	2,2 ± 1,8
Термін від початку захворювання до операції (міс.)	5,2 ± 3,9	5,7 ± 4,4	6,9 ± 4,9	8,7 ± 1,4
Середня оцінка за ВАШ до операції, балів	5,7 ± 3,1	5,6 ± 2,8	5,0 ± 2,2	6,1 ± 2
Середня оцінка за Constant Shoulder Score до операції, балів	49,7 ± 23,4	47,8 ± 20,1	46,3 ± 19,7	47,4 ± 23,1

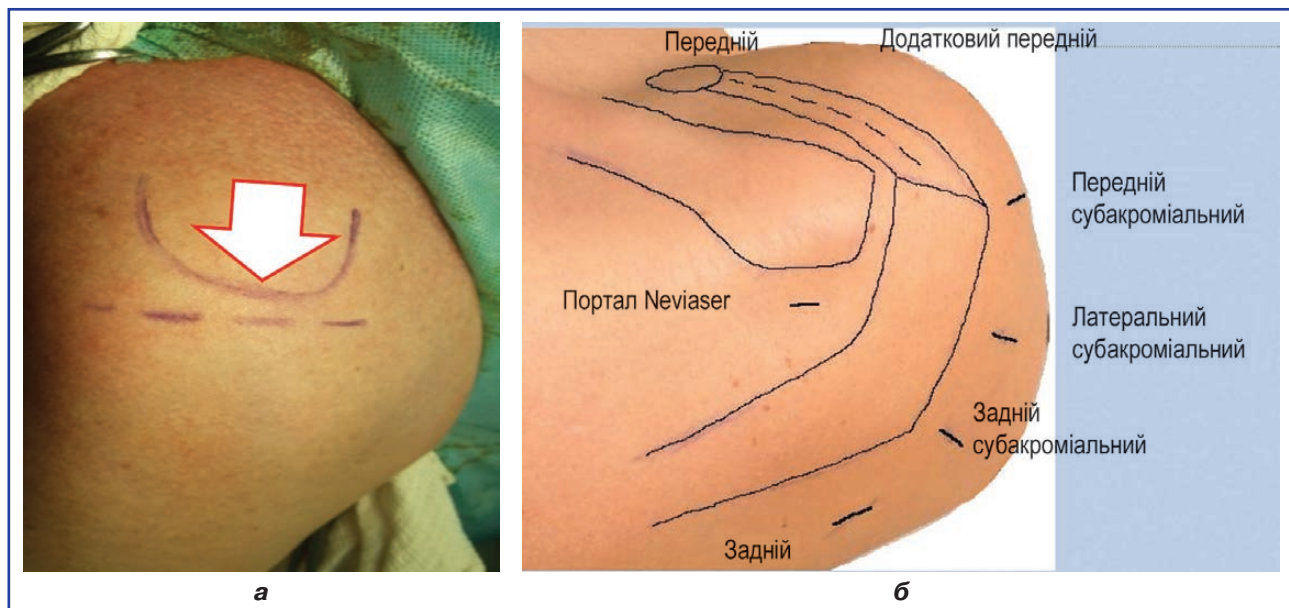


Рисунок 1. Доступи до плечового суглоба: а) мініспліт; б) артроскопічні доступи

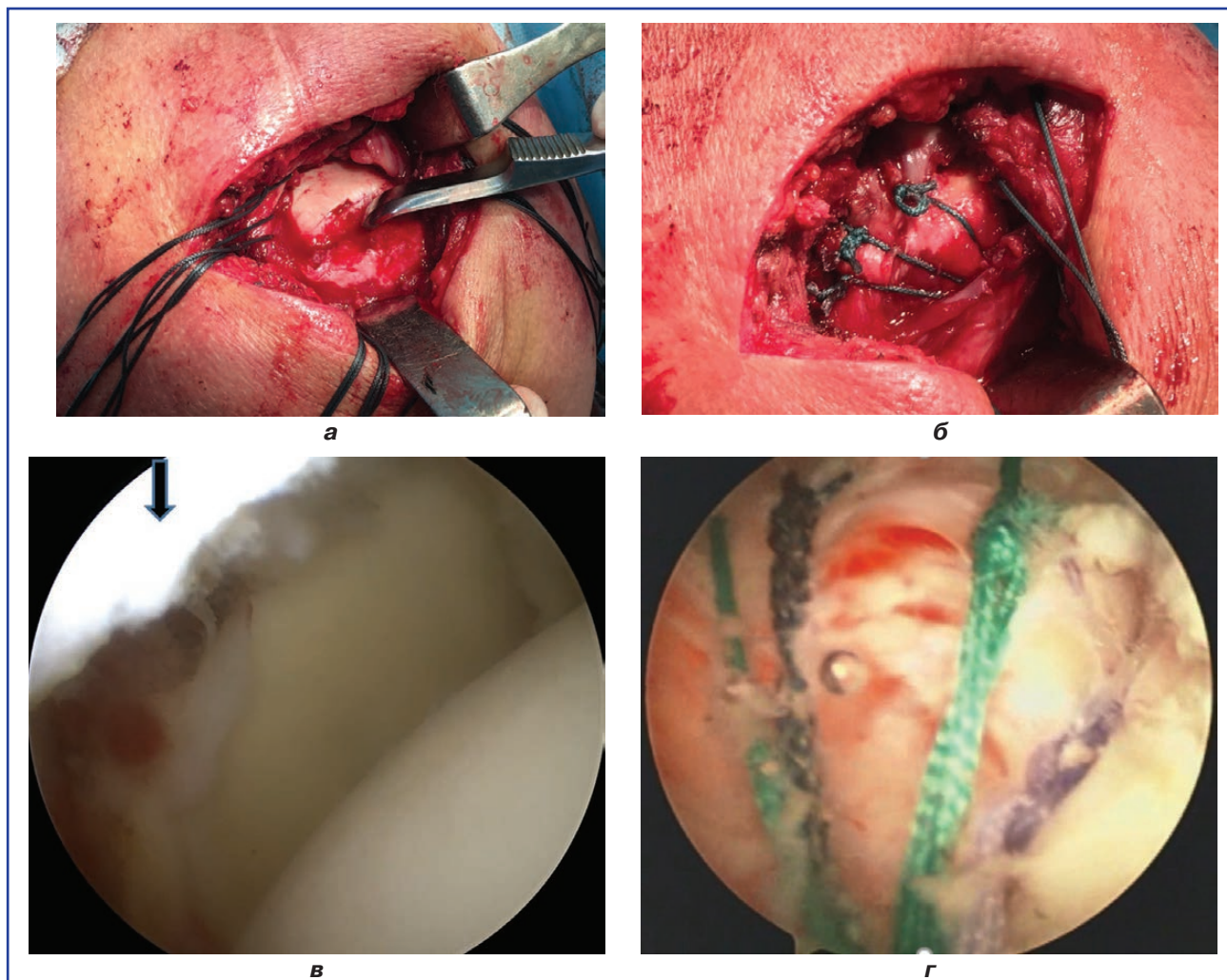


Рисунок 2. Варіанти хірургічного втручання: а) вигляд голівки плеча після виконання мініспліт-доступу; б) після виконання трансосального шва сухожилків РМП; в) артроскопія плечового суглоба, вигляд через задньолатеральний портал (ретраговані сухожилки показано стрілкою); г) вигляд сухожилків РМП після їх рефіксації

Статистичний аналіз. Статистична обробка даних проводилася за допомогою пакета Statistica 12.0 by StatSoft, Inc. of USA (ліцензія № ALXR712D833252FAN3). Для відображення загальної характеристики вихідних параметрів застосовувалися методи описової статистики із зазначенням середнього значення і стандартного відхилення.

Результати

У табл. 2 показано середні результати шва сухожилків РМП у хворих з ротаторною артропатією за Constant Shoulder Score через 6 та 12 міс. після операції.

Як бачимо з табл. 2, найкращі середні результати за Constant Shoulder Score через 6 міс. після операції серед усіх хворих було отримано в групі з 1-ю стадією ротаторної артропатії — $36,9 \pm 19,1$ бала, дещо гірші середні результати отримано в групі з 2-ю стадією ротаторної артропатії — $41,4 \pm 12,1$. У групах з 3-ю та 4-ю стадіями ротаторної артропатії результати майже не відрізнялись від передопераційних. При статистичній обробці даних порівняння груп 1 та 2: $p = 0,024$; груп 1 та 3: $p = 0,057$, груп 1 та 4: $p = 0,03$. Аналогічна ситуація була і при оцінці результатів лікування хворих через 12 міс. після операції. Найкращі результати отримано в групі з 1-ю стадією ротаторної артропатії — $20,2 \pm 11,3$ бала, ці результати оцінюються як добрі. У групі з 2-ю стадією ротаторної артропатії результати лікування мали тенденцію до поліпшення, але були суттєво гіршими, ніж у групі 1 ($p = 0,058$), і оцінювалися як задовільні. У групах хворих з 3-ю та 4-ю стадіями ротаторної артропатії результати в більшості випадків відповідали доопераційним показникам і розцінювалися як незадовільні.

За ВАШ було отримано наступні результати (табл. 3).

Схожу картину спостерігали і при оцінці хворих за ВАШ. Найменший рівень больового синдрому було отримано в групі 1. Хворі з 2–4-ю стадіями мали високий рівень больового синдрому як через 6, так і через 12 міс. після операції.

Обговорення

Отримавши вищезначені результати шва сухожилків РМП у хворих з ротаторною артропатією, можна дійти висновку, що таке оперативне втручання не завжди приводить до поліпшення функції ПС. На 3-й та 4-й стадіях за Хамада середні результати оперативного втручання лишаються без змін, навіть через рік реабілітаційного лікування. Результати шва сухожилків РМП при 2-й стадії ротаторної артропатії, хоча і призводять до поліпшення функції ПС, але суттєво поступаються результатам шва сухожилків РМП, виконаним при 1-й стадії ротаторної артропатії. У зв'язку з цим правильне встановлення діагнозу є дуже важливим.

Враховуючи той факт, що для правильної оцінки величини субакроміального простору необхідне виконання рентгенографії ПС в проекції, яка була описана Хамада, а саме рентгенівський промінь повинен проходити перпендикулярно до фронтальної площини лопатки та зверху вниз під кутом 20° (рис. 3), можна дійти висновку, що практично всі рентгенограми (окрім тих, де чітко видно ацетабуляризацію акроміона та колапс голівки) не підходять для визначення стадії ротаторної артропатії [2, 11]. У цих випадках ми рекомендуємо використовувати МРТ-класифікацію ротаторної артропатії, яка дає можливість практикуючому лікарю правильно зорієнтуватися у встановленні діагнозу й, відповідно, у виборі тактики лікування хворих кожної стадії.

Фактично наша класифікація є поєднанням класифікації Хамада та класифікації Гутальє [15] і враховує лише грубі зміни в ПС, що суттєво зменшує ймовірність похибки. Так, наприклад, при оцінці акроміально-плечового індексу (АПІ) — відстані між нижньою поверхнею акроміона та голівкою плечової кістки — відстань у 5 мм ми розцінюємо як ротаторну артропатію 2-ї ст. за Хамада, а 6 мм — як ротаторну артропатію 1-ї ст. При цьому похибка в 1 мм дуже ймовірна і залежить від досвідченості дослідника, якості

Таблиця 2. Середні результати шва сухожилків РМП за Constant Shoulder Score у хворих всіх груп у різні терміни спостереження, бали

Терміни обстеження хворих	Група 1 (n = 79)	Група 2 (n = 61)	Група 3 (n = 16)	Група 4 (n = 18)
До операції	$49,7 \pm 23,4$	$47,8 \pm 20,1$	$46,3 \pm 19,7$	$47,4 \pm 23,1$
Через 6 міс. після операції	$36,9 \pm 19,1$	$41,4 \pm 12,1$	$44,9 \pm 14,3$	$46,8 \pm 9,2$
Через 12 міс. після операції	$20,2 \pm 11,3$	$30,1 \pm 10,4$	$44,6 \pm 11,4$	$44,8 \pm 5,2$

Таблиця 3. Середні показники за ВАШ у хворих з ротаторною артропатією після шва сухожилків РМП у різні терміни спостереження, бали

Терміни обстеження хворих	Група 1 (n = 79)	Група 2 (n = 61)	Група 3 (n = 16)	Група 4 (n = 18)
До операції	$5,7 \pm 3,1$	$5,6 \pm 2,8$	$5,0 \pm 2,2$	$6,1 \pm 2$
Через 6 міс. після операції	$2,7 \pm 1,9$	$4,4 \pm 3,1$	$5,1 \pm 2,9$	$5,2 \pm 1,8$
Через 12 міс. після операції	$1,7 \pm 1,3$	$4,5 \pm 1,3$	$4,9 \pm 1,9$	$4,4 \pm 2,4$

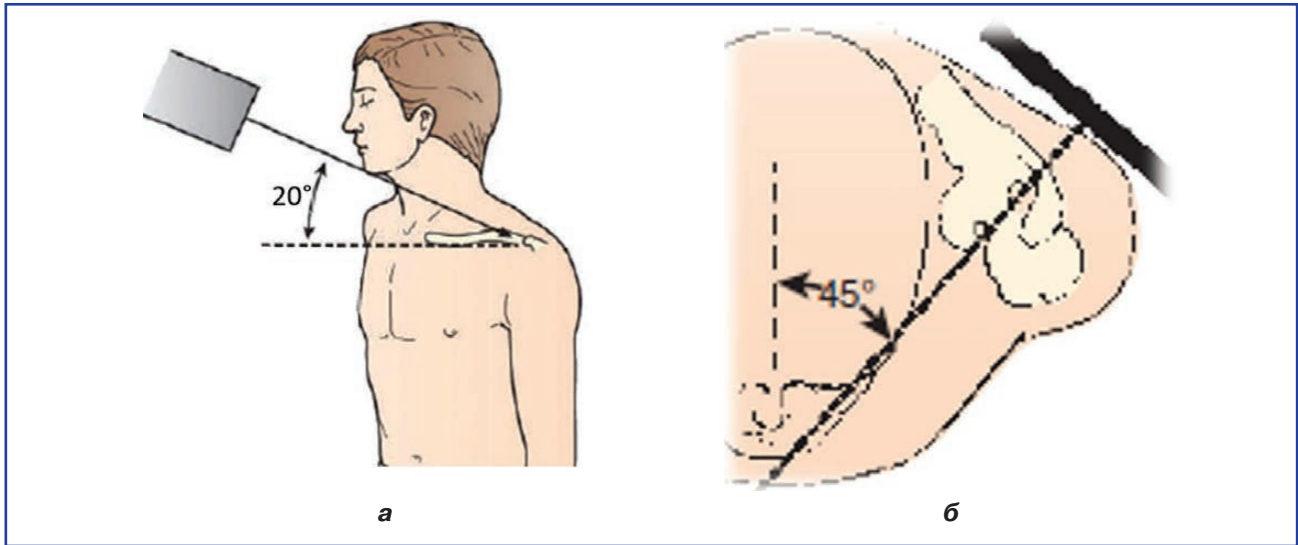


Рисунок 3. Напрямок проходження рентгенівського променя в різних площинах [1]

та правильності виконання рентгенограми. У нашій класифікації величина АП ігнорується, а основним фактором є наявність ацетабуляризації акроміона, за якої хворого відносять до 4-ї ст. ротаторної артропатії з відповідною тактикою хірургічного лікування. Подвійна оцінка ступеня жирової дегенерації за Гутальє спочатку для надостового м'яза, а потім і для інших м'язів з визначенням індексу GFDI також суттєво зменшує ризик похибки [15].

Аналізуючи англomовну літературу, ми дійшли висновку, що наші західні колеги мало звертають увагу на АП та жирову дегенерацію надостового м'яза та суттєво розширили показання до реверсивного протезування [1, 8, 11]. І лише у молодих пацієнтів вони намагаються відновлювати сухожилки РМП або виконувати процедуру відновлення верхньої капсули чи різноманітні транспозиції м'язів у положення м'язів РМП. Такі хірургічні втручання суттєво зменшують больовий синдром або купірують його та поліпшують функцію ПС.

Деякі автори вказують на необхідність спроби відновлення сухожилків РМП навіть при заздалегідь відомому незадовільному результаті. Вони вказують, що хоча б часткове відновлення сухожилків РМП поліпшує функцію ПС та зменшує больовий синдром, а функціональний результат позитивно корелює з величиною покриття великого горбка [12–14]. Таке твердження суперечить нашим уявленням про відновлення функції ПС, оскільки при частковому відновленні сухожилків РМП функція ПС зростає незначно, а больовий синдром зменшується несуттєво.

Сильними сторонами нашого дослідження є велика кількість хворих з ротаторною артропатією, яким виконувався шов РМП, майже однорідні групи хворих, що дало можливість провести адекватну статистичну обробку даних. Слабкими сторонами нашого дослідження є оцінка результатів в термі-

ни до 12 міс. після операції, тобто короткострокові результати, а також відсутність об'єктивних даних (тобто МРТ-дослідження) щодо зрощення сухожилків РМП з кісткою в терміни більше 12 міс. Ці слабкі сторони і є перспективними напрямками наших подальших досліджень.

Висновки

1. Найкращі середні результати за шкалою Constant Shoulder Score через 6 міс. після операції серед всіх хворих було отримано в групі з 1-ю стадією ротаторної артропатії — $36,9 \pm 19,1$ бала, дещо гірші середні результати отримано в групі з 2-ю стадією ротаторної артропатії — $41,4 \pm 12,1$.

2. У групах хворих з 3-ю та 4-ю стадіями ротаторної артропатії результати в більшості випадків відповідали доопераційним показникам і розцінювалися як незадовільні.

3. Найменший рівень больового синдрому за ВАШ було отримано в групі з ротаторною артропатією 1-ї ст. Хворі з 2–4-ю стадіями ротаторної артропатії мали високий рівень больового синдрому як через 6, так і через 12 міс. після операції.

Перспективи подальших досліджень. Перспективним напрямком нашого дослідження ми вважаємо вивчення інших впливових патологічних змін плечового суглоба для доповнення нашої класифікації, хоча в цьому випадку вона може стати більш громіздкою та незрозумілою для практикуючих ортопедів.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів та власної фінансової зацікавленості при підготовці даної статті.

Внесок авторів. Страфун С.С. — концепція і дизайн дослідження; Богдан С.В. — збирання й обробка матеріалів, аналіз отриманих даних, написання тексту; Страфун О.С., Сергієнко Р.О. — системний аналіз отриманих даних.

Список літератури

1. Rockwood and Matsen's *The Shoulder* sixth edition. Ch.A. Rockwood, F.A. Masten. Elsevier, 2022. 1386 p.
2. Clifford AL, Hurley E, Oke Anakwenze, Klifto CS. Rotator Cuff Arthropathy: A Comprehensive Review. *Journal of Hand Surgery Global online*. 2024 Feb 1. doi: 10.1016/j.jhsg.2023.12.014.
3. Pasqualini I, Brinkman JC, Tokish JM et al. Surgical Management of Massive Irreparable Cuff Tears: Superior Capsule Reconstruction and Rotator Cable Reconstruction. *Curr Rev Musculoskelet Med*. 2024 Apr;17(4):101-109. doi: 10.1007/s12178-024-09887-x.
4. Farazdaghi A, Paschos NK, Kelly JD. Comparison between partial and full coverage repair in massive rotator cuff tears. A minimum five year follow-up. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2021;107(4):102911. doi: 10.1016/j.otsr.2021.102911.
5. Rho JY, Kwon YS, Choi S. Current Concepts and Recent Trends in Arthroscopic Treatment of Large to Massive Rotator Cuff Tears: A Review. *Clin. Shoulder Elb*. 2019;22:50-57.
6. Di Benedetto P, Mancuso F, Tosolini L, Buttiroini MM, Beltrame A, Causero A. Treatment options for massive rotator cuff tears: A narrative review. *Acta Biomed*. 2021;92:e2021026.
7. Kirsch JM, Patel M, Hill BW, McPartland C, Namdari S, Lazarus MD. Preoperative single assessment numeric evaluation score predicts poor outcomes after reverse shoulder arthroplasty for massive rotator cuff tears without arthritis. *Orthopedics*. 2022;45(4):215-220. doi: 10.3928/01477447-20220225-07.
8. Liu B, Kim JU, Kim YK, Jeong HJ, Oh JH. Clinical outcome of reverse shoulder arthroplasty and rotator cuff repair in patients of massive rotator cuff tear without osteoarthritis: comparison using propensity score matching. *J Shoulder Elbow Surg*. 2022;31(10):2096-2105. doi: 10.1016/j.jse.2022.02.040.
9. Shah NS, Suriel Peguero E, Umeda Y, Crawford ZT, Grawe BM. Long-term outcomes of massive rotator cuff tear repair: a systematic review. *HSS J*. 2022;18(1):130-137. doi: 10.1177/15563316211008137.
10. Mizuki Y, Tamai M, Takahiro Senju, Kenji Takagishi. Arthroscopic Extreme Medialized Repair for Massive Rotator Cuff Tear: Resection of Cartilage and Subchondral Bone Over the Top of the Humeral Head. *Arthroscopy Techniques*. 2022 Jun 1;11(6):e965-70. doi: 10.1016/j.eats.2022.01.017.
11. Furuhashi R, Matsumura N, Oki S, et al. Risk factors of radiographic severity of massive rotator cuff tear. *Sci Rep*. 2022 Aug 9;12(1):13567. doi: 10.1038/s41598-022-17624-y.
12. Sun K, Li Y. Study of arthroscopic superior capsule reconstruction in the treatment of irreparable rotator cuff tears. *Front Surg*. 2023 Jan 6;9:895571. doi: 10.3389/fsurg.2022.895571.
13. Eppler MB, Bolia IK, Tibone JE, et al. Superior Capsular Reconstruction of the Shoulder. *Arthroscopy*. 2021 Jun;37(6):1708-1710. doi: 10.1016/j.arthro.2021.04.001.
14. Hsu CH, Chiu CH, Weng CJ et al. Arthroscopic Superior Capsule Reconstruction Using Autologous Fascia Lata and Biceps Tendon Augmentation. *A. Arthrosc Tech*. 2021 May 3;10(6):e1411-e1415. doi: 10.1016/j.eats.2021.02.004.
15. Strafun SS, Bohdan SV, Strafun OS et al. MRI classification of rotator cuff arthropathy. *Orthopaedics Traumatology and Prosthetics*. 2026;1:27-32. doi: 10.15674/0030-59872026127-32.

Отримано/Received 30.04.2026

Рецензовано/Revised 11.06.2026

Прийнято до друку/Accepted 21.07.2026

Information about authors

Sergiy Strafun, MD, DSc, PhD, Professor, Corresponding Member of NAMSU, Head of the Department of Microsurgery and Reconstructive-Recovery Surgery of Upper Limb, Deputy Director for Science of Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: strafun6202@national-university.info, phone: +380 (50) 355-26-39; <https://orcid.org/0000-0001-8178-9290>

S.V. Bohdan, PhD in Medicine, orthopedic-traumatologist, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: sergey-mena@ukr.net, www.sergey-mena@ukr.net; phone: +380 (67) 9010406; <https://orcid.org/0000-0001-6681-9615>

Oleksandr S. Strafun, MD, DSc, PhD, Senior Research Fellow, Department of Microsurgery and Reconstructive-Recovery Surgery of Upper Limb, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: o_strafun@ukr.net; phone: +380 (68) 100-28-55; <https://orcid.org/0000-0003-2726-5589>

R.O. Sergienko, MD, DSc, PhD, Professor, National University of Ukraine on Physical Education and Sport, Kyiv, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-0497-3518>

Conflicts of interests. Authors declare the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

Authors' contribution. S.S. Strafun — concept and design of the study; S.V. Bohdan — collection and processing of materials, analysis of the data obtained, writing the text; O.S. Strafun, R.O. Sergienko — systematic analysis of the data obtained.

S.S. Strafun¹, S.V. Bohdan¹, O.S. Strafun¹, R.O. Sergienko²

¹SI "Institute of Traumatology and Orthopedics of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine

²National University of Ukraine on Physical Education and Sport, Kyiv, Ukraine

Results of rotator cuff tendon repair in patients with different stages of rotator cuff arthropathy (retrospective study)

Abstract. Background. There are a large number of patients with unsatisfactory results of rotator cuff tendon repair (RCTR), despite the correctly performed surgical treatment, adequate rehabilitation and the absence of repeated trauma in past medical history. The purpose of the work is to investigate the results of RCTR in patients with rotator cuff arthropathy of various degrees. **Materials and methods.** In 174 (100 %) patients with rotator cuff arthropathy of varying severity, RCTR was performed both by the open method — 67 (38.5 %) patients and using arthroscopic technique — 107 (61.5 %) cases. In our study, all participants were divided into groups depending on the stage of rotator cuff arthropathy according to Hamada. The function of the shoulder was assessed using the Constant Shoulder

Score and visual analog scale before surgery, 6 and 12 months after it. **Results.** The best average results on the Constant Shoulder Score 6 months after surgery among all patients were obtained in the group with the first stage of rotator cuff arthropathy — 36.9 ± 19.1 points, findings were slightly worse in the group with the second stage of rotator cuff arthropathy — 41.4 ± 12.1 points. In the groups with the third and fourth stages of rotator cuff arthropathy, the results were almost the same as the preoperative ones. **Conclusions.** It is not recommended to perform RCTR in patients with stages 2–4 of rotator cuff arthropathy.

Keywords: rotator cuff; rotator cuff arthropathy; supraspinatus muscle tendon; shoulder joint

DOI: <https://doi.org/10.22141/1608-1706.4.27.2026.1104>

V.H. Hryn¹, O.S. Maksymenko¹, Ya.O. Brovarnyk¹, V.S. Drabovskiy¹, S.V. Davydenko², A.V. Piliuhin¹, Ya.A. Tarasenko¹, R.L. Ustenko¹, M.V. Hryn¹, H.N. Hoduadze¹, Ye.E. Chip¹, S.V. Kononenko¹, F. Paulsen³

¹Poltava State Medical University, Poltava, Ukraine

²I.I. Schmalhausen Institute of Zoology of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, Germany

Trabecular architectonic of the calcaneus: a pilot study

Abstract. Background. The calcaneus is a key structural component of the foot that plays a crucial role in weight bearing and load transmission. Its trabecular bone forms a complex three-dimensional architecture that ensures efficient distribution of mechanical stresses. Of particular interest is the neutral zone (Ward's triangle), an area of reduced trabecular density whose functional significance remains incompletely understood. Modern three-dimensional imaging techniques provide new opportunities for detailed analysis of the structural organization and morphometric characteristics of the trabecular bone of the calcaneus. Therefore, the aim is to investigate structural organization and morphometric features of the trabecular architecture of the calcaneus.

Materials and methods. The study used anatomical specimens of calcanei from adult humans (n = 5) obtained from the Department of Human Anatomy of Poltava State Medical University. The bones showed no signs of pathological changes or traumatic damage. **Results.** Two principal trabecular systems — compressive and tensile — were identified in the trabecular bone of the calcaneus, forming a biomechanically efficient framework for optimal load distribution. Between these systems, a central neutral zone (Ward's triangle) was observed as an area of reduced trabecular density with moderate variability in its geometric parameters. At the same time, the main morphometric characteristics of the most prominent trabeculae remained relatively stable among the examined specimens. Three-dimensional reconstruction performed using the Artec 3D Artec Micro scanner confirmed the adaptive orientation of trabeculae in accordance with functional loading patterns: dense, short trabeculae predominated in the calcaneal tuberosity, a more sparse trabecular arrangement was observed in the central region, and the anterior part exhibited a plate-like linear architecture. **Conclusions.** The trabecular architectonics of the calcaneus is represented by a complex system of compression and tensile trabeculae, oriented according to the directions of mechanical forces. The neutral zone (Ward's zone) is a three-dimensional morphological structure that plays a key role in load redistribution.

Keywords: bone; foot; calcaneus; Ward's triangle; Wolff's law; trabecular architectonics; cancellous bone; buttresses

Introduction

The morphological and structural complexity of the calcaneus is determined by the combination of a dense cortical shell and cancellous bone, which forms a complex trabecular architecture that defines the biomechanical properties of the bone [1–4].

The concept of the trabecular architecture of cancellous bone as a system of mechanical buttresses originated in the mid-nineteenth century [5, 6]. Among the first to formulate

this idea were Hermann von Meyer and Karl Culmann, who recognized the similarity between the orientation of trabeculae in the proximal femur and the stress trajectories observed in engineering structures. The analogy between bone architecture and architectural supporting elements, such as arches and buttresses, laid the foundation for the biomechanical interpretation of the internal organization of bone [5, 6].

This concept was further developed by Julius Wolff, who established the principle of functional adaptation

© «Травма» / «Trauma» («Травма»), 2026

© Видавець Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2026

Для кореспонденції: Максименко О.С., к.м.н., кафедра анатомії людини, Полтавський державний медичний університет, вул. Шевченка, 23, м. Полтава, 36011, Україна; e-mail: dr.aleksmaksymenko@gmail.com

For correspondence: Oleksandr Maksymenko, PhD, Department of Human Anatomy, Poltava State Medical University, Shevchenko st., 23, Poltava, 36011, Ukraine; e-mail: dr.aleksmaksymenko@gmail.com

Full list of authors information is available at the end of the article.

of bone tissue in response to mechanical loading, now known as Wolff's law. Within this framework, trabecular architecture was regarded as the result of adaptive bone remodeling according to the directions of compressive and tensile forces. These concepts were subsequently extended to the calcaneus, where intersecting compressive and tensile trabecular systems were described as forming a distinctive three-dimensional structural framework [7–9].

However, these classical models were based primarily on two-dimensional anatomical sections and macroscopic observations. The spatial continuity of trabecular bundles and their three-dimensional configuration were reconstructed only indirectly, without the possibility of comprehensive three-dimensional visualization.

Of particular scientific and clinical importance is the so-called neutral zone, or Ward's triangle, a region characterized by relatively low trabecular density. According to the literature, this area corresponds to the site where most fracture lines develop under axial loading. Despite the substantial mechanical loads transmitted through the posterior aspect of the calcaneus, the neutral zone exhibits reduced mineralization, which is essential for understanding its biomechanical behavior and predicting fracture patterns. At first glance, this phenomenon appears to contradict Wolff's law [8–12].

The investigation of the morphometric characteristics and internal trabecular architecture of the calcaneus remains highly relevant in contemporary anatomy, orthopedics, traumatology, and forensic medicine [13–15]. A comprehensive characterization of its morphology, dimensions, and trabecular organization contributes to more accurate assessment of anatomical variation, facilitates the development of effective fracture prevention strategies, improves orthopedic treatment approaches, and supports the creation of biomechanically accurate models of the foot.

The problem of elucidating the microarchitecture of the calcaneus remains unresolved. Despite numerous descriptive studies, the functional significance of Ward's triangle (neutral zone) has not yet been fully established. It remains unclear whether this region represents the result of adaptive remodeling in response to mechanical loading or merely an anatomical feature without a distinct functional role. To date, no definitive answer to this question has been provided. This uncertainty constituted the rationale for the present study, which was designed to provide a comprehensive analysis of the structural organization of the cancellous bone of the calcaneus.

Thus, the investigation of the morphology and trabecular architecture of the calcaneus represents a relevant and promising area of contemporary research. Such studies are essential for improving the diagnosis, treatment, and prevention of foot injuries, as well as for advancing our understanding of the evolutionary mechanisms underlying the development of the human foot.

The purpose was to conduct a pilot study on the structural organization and morphometric characteristics of the cancellous bone of the calcaneus.

Materials and methods

The study was performed on anatomical specimens of adult human calcanei ($n = 5$) obtained from the anatomical collection of the Department of Human Anatomy, Poltava State Medical University. Only specimens without evidence of pathological changes or traumatic injury were included.

To examine the internal bone structure, sagittal sections with a thickness of up to 3 mm were prepared. Morphometric analysis of the cancellous trabeculae was performed, and the dimensions of the neutral zone, including its height, width, and area, were measured. The area was calculated using the formula: $S = (a \times h)/2$. All measurements were obtained using a digital caliper.

Three-dimensional reconstruction was performed using the Artec Micro scanner and Artec Studio 17 software, while three-dimensional model processing and visualization were carried out in Blender 4.5 LTS.

Statistical analysis was performed using GraphPad Prism 8.0. Data normality was assessed with the D'Agostino-Pearson normality test. Descriptive data are presented as the median and interquartile range. Differences between variables were evaluated using the Friedman test, whereas correlations were assessed using Spearman's rank correlation coefficient. Principal component analysis was applied as an exploratory method to identify trends in the internal relationships among the measured parameters.

The main limitation of this study is the small sample size ($n = 5$), which restricts statistical power and precludes population-level generalization of the findings. Therefore, this investigation should be regarded as a pilot study providing a methodological foundation for future large-scale morphological and biomechanical research.

Results

Morphological characteristics of the trabecular architecture of the human calcaneus

The organization of cancellous bone trabeculae resembles the structural principles of engineering lattice systems, in which the interconnected arrangement of individual elements provides high mechanical strength while maintaining relatively low mass. Similarly, in bone tissue, trabeculae are oriented according to the directions of mechanical loading, thereby providing optimal resistance to compressive and tensile forces.

This principle is particularly evident in the calcaneus, where the point of force application is spatially separated from the point of support (Fig. 1).

Analysis of the sagittal sections revealed a well-organized trabecular architecture composed of intersecting trabecular systems that form load-transmission pathways during weight-bearing and locomotion. This structural organization is consistent with the classical concept that the internal architecture of bone is shaped according to the directions of mechanical stress, as described by Wolff's law [8, 9].

According to the literature, the trabecular architecture of the calcaneus consists of five principal trabecular groups — two compressive and three tensile systems — which together constitute an integrated load-transmission network [16–19].

Morphological analysis confirmed that two major trabecular systems originate from the superior surface of the calcaneus. One extends toward the posteroinferior region (the calcaneal tuberosity), whereas the other is directed toward the anteroinferior region, through which mechanical loads are transmitted to the adjacent bones of the foot. Between these two systems, the central portion of the calcaneus con-

tains an area of reduced trabecular density, referred to as the neutral zone, or Ward's triangle [15, 20, 21] (Fig. 2).

This phenomenon was first described by F.O. Ward in 1838 in the proximal femur [22]. It should be emphasized that the so-called Ward's triangle, or neutral zone, is essentially a projectional phenomenon. Its characteristic triangular appearance is observed only in sagittal sections of the calcaneus or on two-dimensional images. Examination of the intact three-dimensional trabecular architecture demonstrates that this region represents a complex irregular volumetric structure that cannot be adequately reduced to a simple geometric figure.

These observations call into question the appropriateness of the term "triangle" in its literal geometric sense and suggest that this region should instead be regarded as a three-dimensional morphological entity. Accordingly, in the remainder of this study, we recommend using the term "Ward's zone", as it avoids geometric associations while preserving the historical context of the term. Nevertheless, in certain specimens, the term "Ward's triangle" may still be more appropriate, as, in specific sections, this region of the cancellous bone clearly resembles a triangular configuration.

The trabecular system of the calcaneus may be interpreted within the framework of the buttress concept, whereby individual trabecular bundles function as internal supporting struts that transmit mechanical loads from the articular surfaces of the talus to the calcaneal tuberosity. This concept originated in the nineteenth century with the work of Hermann von Meyer and Karl Culmann, who compared the trabecular organization of bone with engineering structures. Subsequent studies by F. Pauwels and Sir John Charnley further substantiated the functional role of these trabecular struts in the transmission of mechanical loads [5, 7, 23, 24].

Applying the buttress concept to the analysis of the trabecular architecture of the calcaneus provides a new perspective on the distribution of fracture lines and offers a biomechanical interpretation of trabecular orientation. This concept has direct clinical relevance for preoperative planning of osteosynthesis, optimization of screw placement, and positioning of supporting plates to preserve the principal trabecular buttresses and ensure efficient load transfer through the implant.

Our findings indicate that the compressive trabecular systems function as the primary load-bearing buttresses, transmitting vertical loads from the talus to the calcaneal tuberosity, whereas the tensile trabecular systems form stabilizing anchoring structures that resist tensile and bending forces. Between these systems lies a region of reduced trabecular density, referred to as Ward's triangle, which corresponds to the area where the directions of compressive and tensile force transmission intersect (Fig. 3).

For the morphometric analysis of the cancellous bone within the neutral zone, the geometric parameters of Ward's triangle (height, base width, and area) were measured, together with the length and thickness of the four most prominent trabeculae. The obtained measurements were averaged for each specimen, allowing characterization of the trabecular architecture within this region.

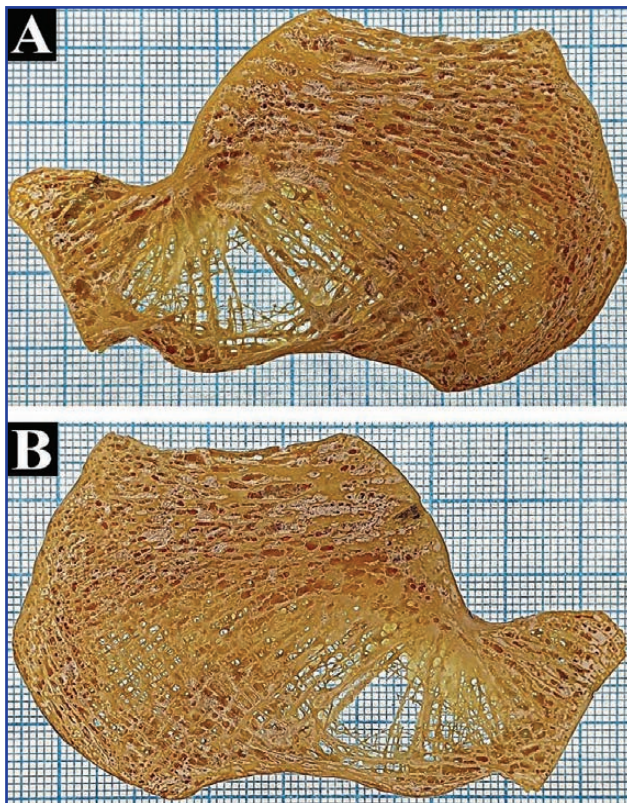


Figure 1. Trabecular architecture of the human calcaneus on a sagittal section

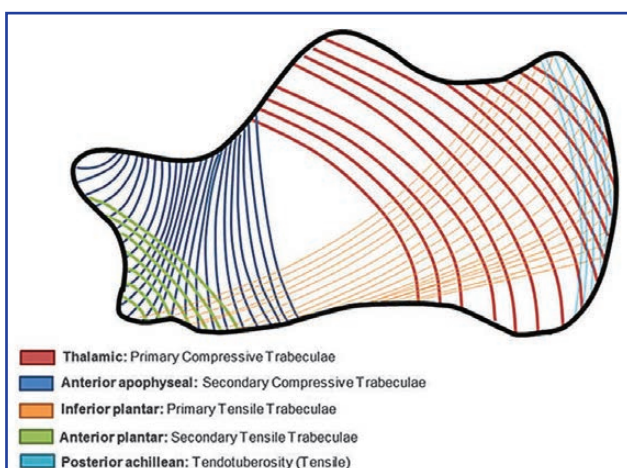


Figure 2. Schematic representation of the distribution of the principal trabecular systems of the human calcaneus (adapted from: Bajraliu M, Walley KC, Kwon JY. Rationale for the Hypodense Calcaneal Region of Ward's Neutral Triangle. Orthop J Harvard Med Sch. 2016;17:1-5)

Analysis of the morphometric parameters of the cancellous bone of the calcaneus ($n = 5$) demonstrated a certain degree of variability in the trabecular architecture among the examined specimens (Table 1).

No statistically significant differences in trabecular length were observed among the examined specimens (Friedman $\chi^2 = 5.6$; $p = 0.25$). Similarly, no significant differences were found in trabecular thickness (Friedman $\chi^2 = 2.97$; $p = 0.60$), indicating the relative stability of these parameters within the investigated sample. In contrast, the geometric characteristics of the neutral zone exhibited moderate variability, reflecting individual differences in the spatial organization of the trabecular network.

Overall, the trabecular architecture of the cancellous bone of the calcaneus is characterized by a combination of stable morphometric parameters and variable spatial features. The compressive and tensile trabecular systems form an efficient biomechanical framework that ensures optimal load distribution while maintaining a relatively low bone mass. These findings should be regarded as preliminary morphometric data derived from a pilot study, providing a foundation for future investigations involving larger sample sizes.

Three-dimensional digital reconstruction of sagittal sections of the human calcaneus

In addition to the morphological analysis of anatomical specimens, a three-dimensional digital reconstruction of sagittal sections of the calcaneus was performed using 3D scanning (Artec Micro) with subsequent processing in Artec Studio 17 and Blender 4.5 LTS. This approach enabled the generation of a high-resolution three-dimensional model for morphometric analysis and detailed assessment of the spatial organization of the trabecular architecture.

The 3D scanning procedure allowed accurate reconstruction of the bone surface morphology and facilitated the identification of the principal functional regions of the calcaneus, including the posterior region, the neutral zone, and the anterior region. This provided an anatomical basis for comparison with the buttress concept of trabecular organization (Fig. 4).

Visual analysis of the reconstructed three-dimensional model revealed pronounced regional heterogeneity of the trabecular surface morphology. In the posterior region (the calcaneal tuberosity), the trabeculae were short, thick, and densely arranged, forming a robust structural framework corresponding to the principal weight-bearing region of the foot. In the middle region, corresponding to the neutral zone, the

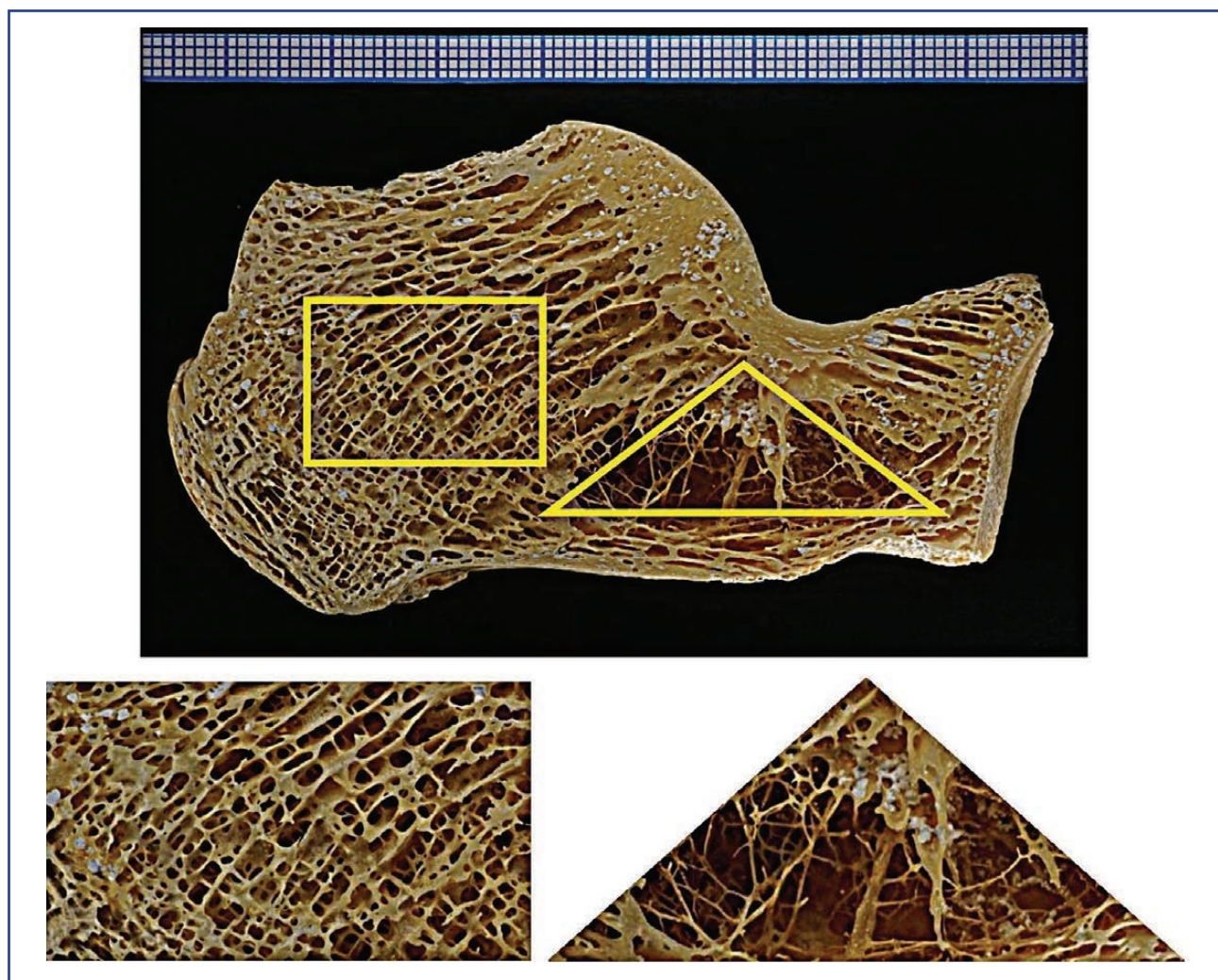


Figure 3. Trabecular architecture of the cancellous bone of the human calcaneus in different regions

trabeculae were sparse and predominantly oriented in oblique and vertical directions, with prominent intertrabecular spaces. This structural organization reflects its load-distribution and shock-absorbing functions and is consistent with adaptation to regions experiencing relatively low mechanical stress [25, 26].

In the anterior region, the trabeculae were elongated along the principal loading axes, forming a plate-like linear architecture characterized by alternating areas of higher and lower trabecular density.

The findings support the presence of an adaptive trabecular architecture within the calcaneus, characterized by robust tra-

beculae in the primary weight-bearing region, a well-defined neutral zone in the central portion, and preferentially oriented trabeculae extending toward the anterior region. Two principal trabecular systems were identified: one directed toward the calcaneal tuberosity and the other toward the anteroinferior region of the calcaneus. Between them, the central portion formed a region of reduced trabecular density, referred to as Ward's triangle, consistent with classical anatomical observations and contemporary three-dimensional models.

Thus, three-dimensional digital scanning enables quantitative assessment of the spatial organization of the trabecu-

Table 1. Morphometric parameters of the cancellous bone of the human calcaneus in the region of the neutral zone (Ward's triangle) (n = 5)

Specimen No.		Trabecular length, mm	Trabecular thickness, mm	Height of the neutral zone, mm	Width of the neutral zone, mm	Area of the neutral zone, mm ²
1		12.06	1.30	14.69	32.85	241.28
		9.29	0.92			
		7.67	0.59			
		10.81	0.46			
	Me (Q1-Q3 [CI])	10.05 (8.075–11.75 [6.94–12.98])	0.76 (0.49–1.21 [0.22–1.42])			
2		15.36	1.30	14.22	23.29	165.59
		10.96	0.42			
		8.50	1.38			
		15.95	1.90			
	Me (Q1-Q3 [CI])	13.16 (9.12–15.8 [7.0–18.38])	1.340 (0.64–1.77 [0.27–2.23])			
3		13.48	1.15	15.95	30.44	242.76
		11.05	0.38			
		10.29	1.51			
		10.27	0.42			
	Me (Q1-Q3 [CI])	10.67 (10.28–12.87 [8.86–13.68])	0.7850 (0.39–0.79 [0.02–1.75])			
4		10.96	1.24	13.18	17.10	112.69
		9.98	2.19			
		11.18	0.95			
		8.50	1.40			
	Me (Q1-Q3 [CI])	10.47 (8.87–11.13 [8.21–12.1])	1.320 (1.02–1.99 [0.6–2.29])			
5		13.04	4.39	14.96	21.89	163.74
		9.85	0.35			
		10.12	1.51			
		8.98	2.35			
	Me (Q1-Q3 [CI])	9.985 (9.2–12.31 [7.69–13.3])	1.930 (0.64–3.88 [0.56–4.86])			
M ± m		9.42 ± 0.49	–	–	–	–
Me (Q1-Q3 [CI])		–	1.27 (0.49–1.51 [0.87–1.74])	14.69 (13.7–15.46 [13.34–15.85])	23.29 (19.5–31.65 [1.11–33.12])	165.6 (138.2–242.0 [115.6–254.8])

lar architecture and its role in mechanical load transmission. This approach provides modern validation of the classical Culmann-Wolff concept of trabecular trajectories and further supports the buttress concept of the trabecular architecture of the calcaneus.

Discussion

The findings of the present study provide further insight into the morphology and morphometric characteristics of the human calcaneus, contributing to a better understanding of the structural and functional organization of its internal architecture and reinforcing the pivotal role of this bone in maintaining the mechanical stability of the foot.

Particular attention was paid to the trabecular architecture of the cancellous bone of the calcaneus. The spatial arrangement of the trabeculae demonstrates a high degree of adaptation to the compressive and tensile forces generated during standing, walking, and running. Identification of the neutral zone and characterization of its geometric parameters enabled detailed evaluation of a region with relatively low trabecular density that appears to play an important role in the redistribution of mechanical loads.

The reduced trabecular density within Ward's triangle (neutral zone) has previously been regarded as a paradoxical feature that seemingly contradicts Wolff's law. However, classical biomechanical studies have demonstrated that reducing bone mass in regions subjected to minimal mechanical loading represents an evolutionarily advantageous adaptation, allowing optimization of skeletal weight without compromising structural integrity [25, 26].

Three-dimensional reconstruction clearly visualizes this region of reduced trabecular density as an integral component of the trabecular architecture of the calcaneus, contributing to efficient load distribution while minimizing the amount of bone tissue required.

The present findings are consistent with the classical descriptions of the compressive and tensile trabecular systems [27–30] and support their interpretation as trabecular buttresses [31], which optimize mechanical load transmission and contribute to the overall structural integrity of the calcaneus.

Application of the buttress concept allows the trabecular architecture of the calcaneus to be interpreted as a system of interconnected supporting elements, in which the compressive trabecular systems bear the primary vertical loads, whereas the tensile trabecular systems resist deformation and contribute to structural stabilization. This framework provides a functional explanation for the presence of Ward's zone and has direct clinical implications for osteosynthesis planning. In particular, the placement of implants and supporting plates may be optimized to preserve the principal trabecular buttresses and thereby maintain the physiological pathways of mechanical load transmission.

Three-dimensional scanning confirmed the morphometric and radiographic findings by providing volumetric reconstructions that enabled clear delineation of the posterior, middle, and anterior regions of the calcaneus. Analysis of the digital models revealed characteristic patterns of trabecular organization, including a dense and robust structure within the calcaneal tuberosity, a region of reduced tra-

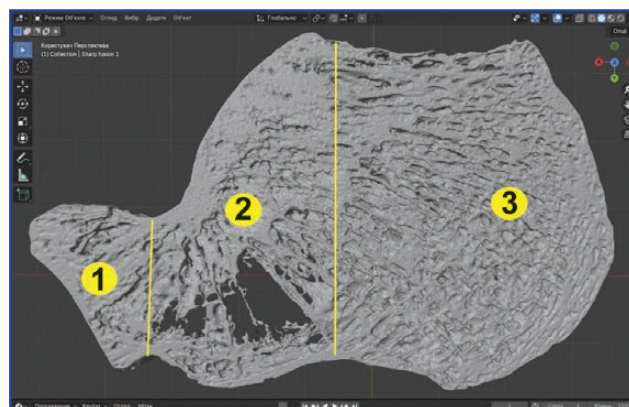


Figure 4. Three-dimensional digital model of a sagittal section of the human calcaneus with delineation of the principal functional regions: 1 — anterior region; 2 — middle region; 3 — posterior region

becular density corresponding to Ward's zone, and a well-organized trabecular architecture in the anterior region. These observations integrate morphometric and structural evidence into a unified concept of functional adaptation of the calcaneus to cyclic mechanical loading.

Previous studies by Meyer, Culmann, Wolff, Charnley, and Pauwels described the internal architecture of bone as a system of trabecular buttresses, or supporting struts, that optimally distribute mechanical loads. The findings of the present study are consistent with the classical Culmann-Wolff concept, demonstrating that the trabeculae of the calcaneus form a three-dimensional structural framework that effectively resists the mechanical forces generated during locomotion.

Conclusions

1. The trabecular architecture of the cancellous bone of the calcaneus is characterized by two principal trabecular systems — compressive and tensile — which together form a functional biomechanical framework that ensures efficient load distribution while maintaining a relatively low bone mass.

2. The central Ward's zone (traditionally referred to as Ward's triangle) is characterized by a reduced trabecular density located between the principal trabecular systems. Its geometric parameters (height, base width, and area) exhibited moderate variability among the examined specimens, whereas the length (Friedman $\chi^2 = 5.6$; $p = 0.25$) and thickness (Friedman $\chi^2 = 2.97$; $p = 0.60$) of the most prominent trabeculae remained relatively stable.

3. Three-dimensional digital reconstruction using Artec Micro confirmed the adaptive orientation of the trabecular architecture. Short, robust trabeculae within the calcaneal tuberosity corresponded to the principal weight-bearing region, whereas the sparse trabeculae of the central portion reflected its load-distribution and shock-absorbing functions. In contrast, the anterior region exhibited a characteristic plate-like linear trabecular architecture.

4. The findings of this pilot study provide a morphometric foundation for future investigations involving larger

sample sizes and high-resolution three-dimensional analytical techniques, thereby facilitating a more comprehensive understanding of the adaptive trabecular architecture of the calcaneus and its morphological variability.

References

1. Gupton M, Özdemir M, Terreberry RR. Anatomy, Bony Pelvis and Lower Limb: Calcaneus. In: StatPearls. Treasure Island, FL: StatPearls Publishing LLC; 2025.
2. Hall RL, Shereff MJ. Anatomy of the calcaneus. *Clinical orthopaedics and related research*. 1993;290:27-35.
3. Hryn V, Ryabushko M, Bilash V, Svintsytska N, Ustenko R, Piliuhin A, et al. Structural characteristics of the calcaneus and their clinical relevance in orthopaedics and rehabilitation. *Bulletin of problems in biology and medicine*. 2025;3(178):19-27. doi: 10.29254/2077-4214-2025-3-178-19-27.
4. Hryn V, Tikhonova O, Tarasenko Y, Bilash V, Severyn Y, Strizhenok V, et al. Bone support of the foot: anatomy and variability of the calcaneus. *Morphologia*. 2025;19(2):82-7. doi: 10.26641/1997-9665.2025.2.82-87.
5. Von Meyer GH. The classic: The architecture of the trabecular bone (tenth contribution on the mechanics of the human skeletal framework). *Clinical orthopaedics and related research*. 2011;469(11):3079-84. doi: 10.1007/s11999-011-2042-4.
6. Von Meyer GH. Die Architektur der Spongiosa, *Achiv fur Anatomie. Physiologie und Wissenschaftliche Medizin*. 1867;34:615-25.
7. Wolff J. The classic: on the inner architecture of bones and its importance for bone growth. 1870. *Clinical orthopaedics and related research*. 2010;468(4):1056-65. doi: 10.1007/s11999-010-1239-2.
8. Chen JH, Liu C, You L, Simmons CA. Boning up on Wolff's Law: mechanical regulation of the cells that make and maintain bone. *Journal of biomechanics*. 2010;43(1):108-18. doi: 10.1016/j.jbiomech.2009.09.016.
9. Ruff C, Holt B, Trinkaus E. Who's afraid of the big bad Wolff? "Wolff's law" and bone functional adaptation. *American journal of physical anthropology*. 2006;129(4):484-98. doi: 10.1002/ajpa.20371.
10. Wang ZJ, Huang XL, Chu YC, Zou YW. Applied anatomy of the calcaneocuboid articular surface for internal fixation of calcaneal fractures. *Injury*. 2013;44(11):1428-30. doi: 10.1016/j.injury.2012.08.023.
11. Yu Q, Li Z, Li J, Yu Q, Zhang L, Liu D, et al. Calcaneal fracture maps and their determinants. *Journal of orthopaedic surgery and research*. 2022;17(1):39. doi: 10.1186/s13018-022-02930-y.
12. Cardadeiro G, Baptista F, Zymbal V, Rodrigues LA, Sardinha LB. Ward's area location, physical activity, and body composition in 8- and 9-year-old boys and girls. *Journal of bone and mineral research*. 2010;25(11):2304-12. doi: 10.1002/jbmr.229.
13. Koh D, Tan B, Mehta K, Loh J, Chong LR, Kon Kam King C. Morphometric Analysis of the Calcaneus in a Southeast Asian Population. *Cureus*. 2024;16(4):e58899. doi: 10.7759/cureus.58899.
14. Amuti T, Muuthuri N, Nichome L, Ouko I, Misiani M, Olabu B, et al. Morphometric Dimensions of the Calcaneus. *The journal of foot and ankle surgery*. 2020;59(5):949-52. doi: 10.1053/j.foot.2019.09.040.
15. Anbumani T, Sridharan R, Thamarai Selvi A. An anatomical study of morphology and morphometric analysis of calcaneum and its talar articular surfaces. *International Journal of Anatomy and Research*. 2017;5:4223-9. doi: 10.16965/ijar.2017.291.
16. Bajraliu M, Walley KC, Kwon JY. Rationale for the hypodense calcaneal region of Ward's neutral triangle. *The Orthopaedic Journal at Harvard Medical School*. 2016;17:63-7.
17. Saers JPP, Ryan TM, Stock JT. Baby steps towards linking calcaneal trabecular bone ontogeny and the development of bipedal human gait. *Journal of anatomy*. 2020;236(3):474-92. doi: 10.1111/joa.13120.
18. Kivell TL. A review of trabecular bone functional adaptation: what have we learned from trabecular analyses in extant hominoids and what can we apply to fossils? *Journal of anatomy*. 2016;228(4):569-94. doi: 10.1111/joa.12446.
19. Gefen A, Seliktar R. Comparison of the trabecular architecture and the isostatic stress flow in the human calcaneus. *Medical engineering & physics*. 2004;26(2):119-29. doi: 10.1016/j.medengphy.2003.10.003.
20. Sabry FF, Ebraheim NA, Mehalik JN, Rezcallah AT. Internal architecture of the calcaneus: implications for calcaneus fractures. *Foot & ankle international*. 2000;21(2):114-8. doi: 10.1177/107110070002100204.
21. Sposeto RB, Matias-Joannas G, Godoy-Santos AL. Current Concepts in Intra-articular Calcaneus Fractures. *Revista Brasileira de ortopedia*. 2025;60(3):s00451809886. doi: 10.1055/s-0045-1809886.
22. Ward F. On the internal architecture of the human femur. *London Med Gaz*. 1838;23:28-92.
23. Charnley J. Compression arthrodesis: Including central dislocation as a principle in hip surgery. Edinburgh: Livingstone E & S; 1953. 264 p.
24. Pauwels F. Biomechanics of the locomotor apparatus: contributions on the functional anatomy of the locomotor apparatus. Springer Verlag Berlin Heidelberg; 1980.
25. Kummer FJ. The neutral zone in bone structure. *Clinical orthopaedics and related research*. 1972;88:36-41.
26. Cowin SC. *Bone Mechanics Handbook*. CRC Press; 2001.
27. Oftadeh R, Perez-Viloria M, Villa-Camacho JC, Vaziri A, Nazarian A. Biomechanics and mechanobiology of trabecular bone: a review. *Journal of biomechanical engineering*. 2015;137(1):0108021-01080215. doi: 10.1115/1.4029176.
28. Xie S, Wallace RJ, Callanan A, Pankaj P. From Tension to Compression: Asymmetric Mechanical Behaviour of Trabecular Bone's Organic Phase. *Annals of biomedical engineering*. 2018;46(6):801-9. doi: 10.1007/s10439-018-2009-7.
29. Jia P, Yang Y, Fang Z, Tang X. The contribution of trabeculae and the failure initiation in the proximal femur: a finite element analysis. *Journal of orthopaedic surgery and research*. 2025;20(1):1022. doi: 10.1186/s13018-025-06447-y.
30. Zhang J, Li H, Zhou Y, Chen S, Rong Q. An Analysis of Trabecular Bone Structure Based on Principal Stress Trajectory. *Bioengineering*. 2023;10(10):1224.
31. Chavarri-Prado D, Brizuela-Velasco A, Álvarez-Arenal Á, Dieguez-Pereira M, Pérez-Pevida E, Viteri-Agustín I, et al. The Bone Buttress Theory: The Effect of the Mechanical Loading of Bone on the Osseointegration of Dental Implants. *Biology*. 2021;10(1):12. doi: 10.3390/biology10010012.

Received 10.06.2026

Revised 28.06.2026

Accepted 30.07.2026

Information about authors

Volodymyr Hryn, MD, PhD, Professor, Head of the Department of Human Anatomy, Poltava State Medical University, Poltava, Ukraine; e-mail: v.hryn@pdmu.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-5894-4416>
 Oleksandr Maksymenko, PhD, Department of Human Anatomy, Poltava State Medical University, Poltava, Ukraine; e-mail: dr.aleksmaksymenko@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-1502-1464>
 Yaroslav Brovarnyk, Department of Human Anatomy, Poltava State Medical University, Poltava, Ukraine; e-mail: brovarnyk2001@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-0060-9256>
 Vitaliy Drabovskiy, PhD, Poltava State Medical University, Poltava, Ukraine; e-mail: v.drabovskiy@pdmu.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0003-4111-7179>
 Svitozar Davydenko, PhD, Department of Evolutionary Morphology, I.I. Schmalhausen Institute of Zoology of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: yurgenvorona@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-4780-5338>
 Andriy Piliuhin, PhD, Department of Human Anatomy, Poltava State Medical University, Poltava, Ukraine; e-mail: andrey19782019@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-0601-8036>
 Yana Tarasenko, PhD, Department of Human Anatomy, Poltava State Medical University, Poltava, Ukraine; e-mail: cvetkovajj@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2296-9464>
 Roman Ustenko, PhD, Department of Human Anatomy, Poltava State Medical University, Poltava, Ukraine; e-mail: rlustenka@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-9021-4472>
 Maksym Hryn, Department of Human Anatomy, Poltava State Medical University, Poltava, Ukraine; e-mail: maxhryn@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0001-0962-4069>
 Heorhiy Hoduadze, Department of Surgery 3, Poltava State Medical University, Poltava, Ukraine; e-mail: dr.goduadze@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6287-8028>
 Yevheniy Chip, PhD, Department of Surgery 3, Poltava State Medical University, Poltava, Ukraine; e-mail: yevheniychip@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7397-0580>
 Serhii Kononenko, PhD, Department of Surgery 3, Poltava State Medical University, Poltava, Ukraine; e-mail: doctorviolinist@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-9423-5104>
 Friedrich Paulsen, Prof. Dr. med. Dr. Dr. h.c., Chairmen of the Institute of Functional and Clinical Anatomy, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, Germany; e-mail: friedrich.paulsen@fau.de; <https://orcid.org/0000-0002-0527-0953>

Conflicts of interests. Authors declare the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

Information about funding. This research received no external funding.

Authors' contribution. V.H. Hryn — conceptualization, research, writing the original draft, review writing and editing, project administration, supervision; O.S. Maksymenko — conceptualization, research, methodology; Ya.O. Brovarnyk — research, methodology, writing the original draft; V.S. Drabovskiy — data visualization, methodology; S.V. Davydenko — formal analysis and validation, software; A.V. Piliuhin — formal analysis and validation, resources; Ya.A. Tarasenko — data visualization, software; R.L. Ustenko — methodology, resources; M.V. Hryn, S.V. Kononenko — resources, software; H.N. Hoduadze — methodology, software; Ye.E. Chip — resources, data visualization; F. Paulsen — review writing and editing.

Гринь В.Г.¹, Максименко О.С.¹, Броварник Я.О.¹, Драбовський В.С.¹, Давиденко С.В.², Пілюгін А.В.¹,
 Тарасенко Я.А.¹, Устенко Р.Л.¹, Гринь М.В.¹, Годуадзе Г.Н.¹, Чіп Є.Є.¹, Кононенко С.В.¹, Paulsen F.³

¹Полтавський державний медичний університет, м. Полтава, Україна

²Інститут зоології ім. І.І. Шмальгаузена НАН України, м. Київ, Україна

³Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, Germany

Архітектоніка губчастої речовини п'яtkової кістки: пілотне дослідження

Резюме. Актуальність. П'яtkова кістка є ключовим структурним компонентом стопи, який відіграє ключову роль у забезпеченні опори тіла та передачі навантаження. Її губчаста речовина формує складну тривимірну трабекулярну архітекtonіку, що забезпечує ефективний розподіл механічного навантаження. Особливий інтерес становить нейтральна зона (трикутник Ворда) — ділянка зі зниженою щільністю трабекул, функціональне значення якої залишається недостатньо з'ясованим. Сучасні методи тривимірної візуалізації відкривають нові можливості для детального аналізу структурної організації губчастої речовини п'яtkової кістки та її морфометричних характеристик. **Мета:** вивчити структурну організацію і морфометричні особливості губчастої речовини п'яtkової кістки. **Матеріали та методи.** У дослідженні використано анатомічні препарати п'яtkових кісток дорослих людей (n = 5), отриманих на кафедрі анатомії людини Полтавського державного медичного університету. Зразки не мали патологічних ознак або травматичних пошкоджень. **Результати.** У губчастій речовині п'яtkової кістки виявлено дві основні трабекулярні системи — компресійну і тензійну, які формують біомеханічно ефективну конструкцію для опти-

мального розподілу механічного навантаження. Між ними визначається центральна нейтральна зона (трикутник Ворда), що характеризується зниженою щільністю трабекул та помірною варіабельністю геометричних параметрів. При цьому основні морфометричні характеристики найбільш виражених трабекул залишаються відносно стабільними. Тривимірна реконструкція, виконана за допомогою сканера Artec 3D Artec Місто, підтвердила адаптивну орієнтацію трабекул відповідно до функціонального навантаження: у ділянці п'яtkового горба переважають масивні короткі трабекули, у центральній частині спостерігається більш розріджене розташування трабекул, а передній відділ характеризується пластинчасто-лінійною архітекtonікою. **Висновки.** Трабекулярна архітекtonіка п'яtkової кістки представлена складною системою компресійних і тензійних трабекул, орієнтованих відповідно до напрямків дії механічних сил. Нейтральна зона (трикутник Ворда) є тривимірною морфологічною структурою, що відіграє ключову роль у перерозподілі навантаження.

Ключові слова: кістка; стопа; п'яtkова кістка; трикутник Ворда; закон Вольфа; трабекулярна архітекtonіка; губчаста речовина кістки; контрфорси

V.O. Fishchenko¹, O.O. Humeniuk¹, O.V. Fishchenko¹, R.S. Humeniuk²¹National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine²Ministry of Youth and Sports of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Prospective clinical validation of an algorithm for selecting a comprehensive physiotherapeutic treatment modality in patients with shoulder osteoarthritis

Abstract. Background. Despite the widespread use of conservative treatment for shoulder osteoarthritis, standardized algorithms for selecting physiotherapeutic modality remain insufficiently developed. The purpose of the study was to perform a prospective clinical validation of an algorithm for selecting a comprehensive physiotherapeutic treatment in patients with shoulder osteoarthritis. **Materials and methods.** Forty-five patients with Kellgren-Lawrence grade I–II shoulder osteoarthritis were enrolled. According to the proposed algorithm, 31 patients received extracorporeal shock wave therapy combined with physical rehabilitation (ESWT + PR), whereas 14 patients underwent nuclear magnetic resonance therapy and physical rehabilitation (NMRT + PR). Outcomes were assessed using the Oxford Shoulder Score (OSS) before treatment and 6 months after its completion. Statistical analysis was performed using the Wilcoxon signed-rank test. Statistical significance was set at $p < 0.05$. **Results.** Both treatment groups demonstrated significant improvement across all components of the OSS. In the ESWT + PR group, the mean OSS increased from 27.52 ± 2.62 to 42.71 ± 2.69 points ($p < 0.00001$), with a mean improvement of 15.19 points. Excellent treatment outcomes were achieved in 25 (80.65 %) patients, while good outcomes were observed in 6 (19.35 %). In the NMRT + PR group, the mean OSS increased from 27.64 ± 1.86 to 44.86 ± 2.66 points ($p = 0.000004$), with a mean improvement of 17.22 points. Excellent treatment outcomes were achieved in 12 (85.71 %) patients and good outcomes in 2 (14.29 %). No satisfactory or poor treatment outcomes were recorded in either group. **Conclusions.** Prospective clinical validation confirmed the high clinical utility of the proposed algorithm for selecting a comprehensive physiotherapeutic treatment in patients with shoulder osteoarthritis.

Keywords: osteoarthritis; degenerative joint disease; physiotherapeutic treatment; personalized medicine; algorithm

Introduction

Shoulder osteoarthritis is a common degenerative joint disease characterized by progressive degeneration of the articular cartilage, chronic pain, restricted range of motion, and gradual deterioration of upper limb function. With increasing life expectancy and population aging, the prevalence of shoulder osteoarthritis continues to rise, imposing a substantial socioeconomic burden, reducing patients' quality of life, and increasing healthcare expenditures [1–4].

Conservative treatment remains the preferred therapeutic approach for patients with early to moderate stages of

shoulder osteoarthritis. Current clinical guidelines advocate a multimodal management strategy that includes physical therapy, therapeutic exercise, patient education, and other non-operative interventions [5, 6]. In recent years, growing interest has been directed toward physiotherapeutic modalities, particularly extracorporeal shock wave therapy (ESWT) and nuclear magnetic resonance therapy (NMRT), both of which have demonstrated promising results in reducing pain and improving shoulder function [7–9].

Despite the expanding evidence supporting individual physiotherapeutic modalities, selecting the optimal treat-

ment strategy for a particular patient remains challenging. Various approaches to physiotherapeutic management have been proposed; however, their implementation in routine clinical practice largely depends on the clinician's experience and local treatment protocols [10, 11].

In our previous study, independent clinical and demographic predictors of treatment effectiveness for ESWT and NMRT were identified using multivariable statistical analysis. Based on these predictors, an algorithm for selecting a comprehensive physiotherapeutic treatment in patients with shoulder osteoarthritis was developed. However, its clinical utility and practical applicability require prospective validation.

The purpose of this study was to prospectively validate an algorithm for selecting a comprehensive physiotherapeutic treatment in patients with shoulder osteoarthritis.

Materials and methods

For the prospective phase of the study, 45 patients with Kellgren-Lawrence grade I–II shoulder osteoarthritis who underwent treatment at the VinProfiMed Medical Rehabilitation Center (Vinnytsia, Ukraine) were enrolled.

According to the proposed algorithm for selecting physiotherapeutic treatment, 31 (68.89 %) patients received extracorporeal shock wave therapy combined with physical rehabilitation (ESWT + PR) (mean age 50.00 ± 13.74 years; 14 (45.16 %) men), whereas 14 (31.11 %) participants received NMRT + PR (mean age 57.36 ± 13.11 years; 8 (57.14 %) men).

Inclusion criteria: radiographically confirmed Kellgren-Lawrence grade I–II shoulder osteoarthritis; shoulder osteoarthritis associated with soft tissue pathology of the shoulder complex, including lesions of the glenoid labrum and rotator cuff tendons; post-traumatic shoulder osteoarthritis following fractures of the proximal humerus; shoulder osteoarthritis associated with recurrent anterior shoulder instability; primary (idiopathic) shoulder osteoarthritis; avascular necrosis of the humeral head without radiographic evidence of collapse or severe articular deformity.

Exclusion criteria: shoulder pathology (proximal humeral fractures or soft tissue injuries) without radiographic evidence of osteoarthritis; isolated soft tissue disorders of the shoulder without radiographic signs of degenerative joint disease; proximal humeral fractures and their sequelae without established shoulder osteoarthritis; Kellgren-Lawrence grade III–IV shoulder osteoarthritis with severe joint deformity, marked joint space narrowing, or ankylosis; rotator cuff arthropathy.

The clinical decision-support algorithm for selecting a comprehensive physiotherapeutic treatment was developed based on independent statistically significant predictors of therapeutic effectiveness identified in our previous study. The methodology used to determine these predictors has been described in detail elsewhere [12, 13]. A schematic representation of the algorithm is given in Fig. 1.

Patients in the prospective cohort received the recommended comprehensive physiotherapeutic treatment according to the proposed clinical decision-support algorithm.

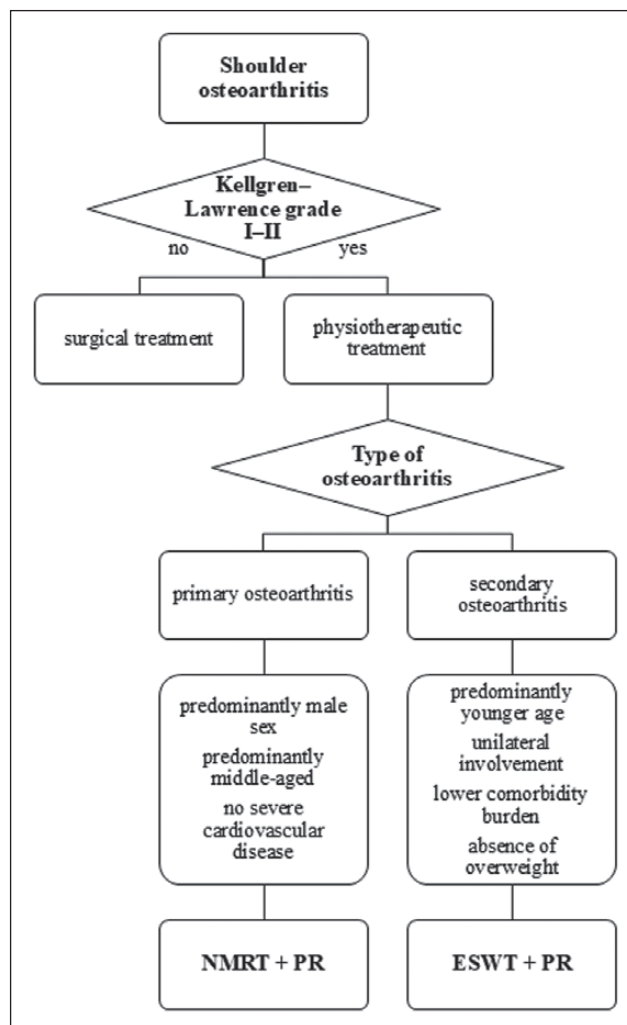


Figure 1. Algorithm for selecting a comprehensive physiotherapeutic treatment in patients with shoulder osteoarthritis

The ESWT + PR protocol consisted of extracorporeal shock wave therapy combined with a McKenzie-based physical rehabilitation program. ESWT was administered using low- and medium-energy radial shock waves ($0.1\text{--}0.2\text{ mJ/mm}^2$). Depending on the individual clinical condition, pain severity, and functional impairment, patients underwent 4–7 treatment sessions at 5–7-day intervals. Treatment sites were determined according to the location of trigger points, clinical examination findings, and functional assessment.

The NMRT + PR protocol consisted of seven NMRT sessions, each lasting 1 hour and performed daily, combined with the same McKenzie-based physical rehabilitation program.

Physical rehabilitation according to the McKenzie method was adapted for patients with chronic pain associated with shoulder osteoarthritis. The program included an initial self-assessment to identify movements that provoked or relieved pain, individualized exercise prescription aimed at restoring normal movement patterns, gradual improvement of the range of motion, strengthening the shoulder

girdle musculature, and restoration of shoulder function. Throughout the rehabilitation course, patients regularly monitored symptom progression, and the exercise program was modified under therapist supervision according to the clinical response. An essential component of the program was the development of self-management skills and independent performance of therapeutic exercises in accordance with the McKenzie concept [14].

Clinical outcomes were assessed using the Oxford Shoulder Score (OSS) questionnaire [15]. Patients were evaluated at baseline and 6 months after completion of physiotherapeutic treatment. In addition, the change in the total OSS score (Δ OSS) was calculated.

Statistical analysis. Statistical analysis was performed using StatSoft Statistica 13 software. Quantitative and score-based variables are presented as mean $\pm$ standard deviation to facilitate interpretation of the magnitude of clinical change. Paired baseline and 6-month values were compared using the Wilcoxon signed-rank test, considering the ordinal nature of the individual OSS items and the limited sample size. A two-sided p value of < 0.05 was considered statistically significant.

Ethics. The study was conducted in accordance with the ethical principles of the Declaration of Helsinki of the World Medical Association (7th revision, 2013), the Convention on Human Rights and Biomedicine of the Council of Europe (1997), and applicable national and institutional ethical standards [16–18]. Written informed consent was obtained from all participants prior to their enrollment in the study.

Results

Following completion of the comprehensive physiotherapeutic treatment, both groups demonstrated statistically significant improvements in shoulder function compared to baseline. The results of the prospective clinical validation of the proposed algorithm are presented in Tables 1 and 2 for patients treated with ESWT + PR and NMRT + PR according to the algorithm recommendations.

In the ESWT + PR group, excellent clinical outcomes were achieved in 25 (80.65 %) patients and good outcomes in 6 (19.35 %), whereas no satisfactory or poor outcomes were recorded. The mean total OSS increased significantly from the satisfactory range at baseline to the excellent range at follow-up (Fig. 2), with a mean improvement of 15.19 points.

The greatest improvements in mean OSS item scores following treatment were observed for items 1 (+1.42 points), 3 (+1.33 points), 5 (+1.33 points), and 7 (+1.33 points). The smallest improvements were recorded for items 9 (+1.13 points) and 12 (+1.13 points); however, all changes remained statistically significant compared to baseline values. Intermediate improvements were observed for items 2 (+1.26 points), 4 (+1.29 points), 6 (+1.23 points), 8 (+1.23 points), 10 (+1.29 points), and 11 (+1.26 points).

In the NMRT + PR group, excellent clinical outcomes were achieved in 12 (85.71 %) patients and good outcomes in 2 (14.29 %), whereas no satisfactory or poor outcomes were recorded. The mean total OSS increased significantly

Table 1. Comparison of baseline and 6-month clinical outcomes in patients treated with ESWT + PR

OSS questionnaire item	Clinical outcomes		p
	Baseline	Follow-up	
1. How would you rate the level of pain in your shoulder during the past month?	2.03 $\pm$ 0.48	3.45 $\pm$ 0.51	$\leq 0.00001^*$
2. Have you had any difficulty dressing because of your shoulder condition?	2.19 $\pm$ 0.48	3.45 $\pm$ 0.51	
3. Have you had any difficulty getting into or out of a car or using public transport because of your shoulder condition?	2.32 $\pm$ 0.65	3.65 $\pm$ 0.49	
4. Have you had any difficulty using a knife and fork simultaneously while eating?	2.26 $\pm$ 0.58	3.55 $\pm$ 0.51	
5. Are you able to do household shopping independently?	2.35 $\pm$ 0.55	3.68 $\pm$ 0.48	
6. Are you able to carry a tray with a plate of food across a room?	2.29 $\pm$ 0.59	3.52 $\pm$ 0.51	
7. Are you able to comb your hair using the affected arm?	2.19 $\pm$ 0.54	3.52 $\pm$ 0.51	
8. How would you describe the pain you usually experience in your shoulder?	2.35 $\pm$ 0.49	3.58 $\pm$ 0.50	
9. Are you able to hang your clothes in a wardrobe using the affected arm?	2.32 $\pm$ 0.48	3.45 $\pm$ 0.51	
10. Are you able to wash and dry yourself using both hands?	2.39 $\pm$ 0.62	3.68 $\pm$ 0.48	
11. Does shoulder pain interfere with your usual work, including housework?	2.32 $\pm$ 0.65	3.58 $\pm$ 0.50	
12. Has shoulder pain disturbed you at night during the past month?	2.48 $\pm$ 0.57	3.61 $\pm$ 0.50	
Total score	27.52 $\pm$ 2.62	42.71 $\pm$ 2.69	

Note: here and in Table 2: * — statistically significant difference compared to baseline ($p \leq 0.05$).

from the satisfactory range at baseline to the excellent range at follow-up (Fig. 3), with a mean improvement of 17.22 points.

The greatest improvements in individual OSS item scores were observed for item 5 (+1.79 points), followed by items 1 (+1.65 points), 6 (+1.57 points), and 11 (+1.57 points). The smallest improvement was recorded for item 7 (+1.07 points); however, the difference remained statistically significant compared to baseline. Intermediate improvements were observed for items 2 (+1.42 points), 3 (+1.42 points), 4 (+1.28 points), 8 (+1.35 points), 9 (+1.50 points), 10 (+1.28 points), and 12 (+1.28 points).

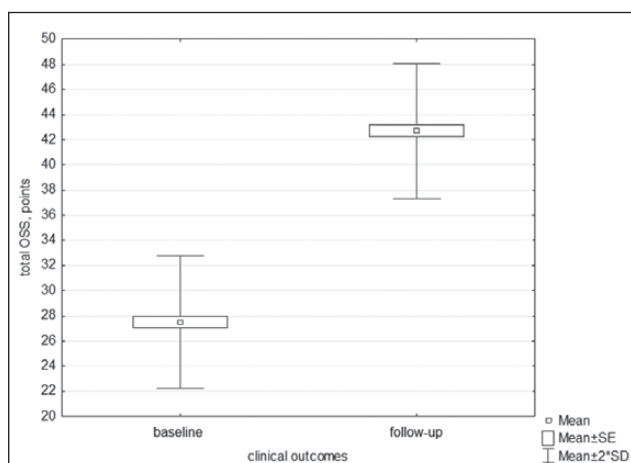


Figure 2. Box plots of baseline and 6-month total OSS in patients treated with ESWT + PR

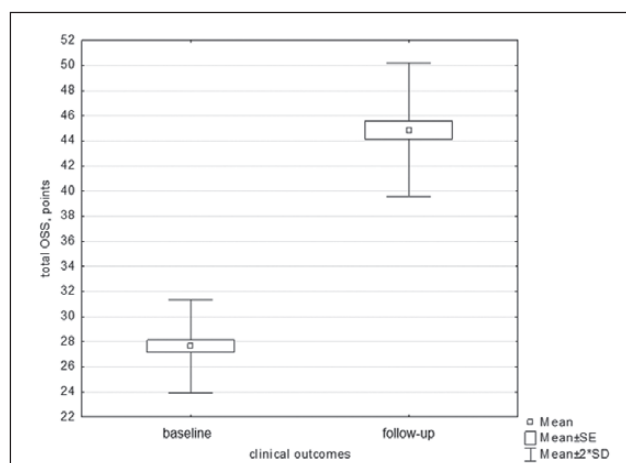


Figure 3. Box plots of baseline and 6-month total OSS in patients treated with NMRT + PR

Table 2. Comparison of baseline and 6-month clinical outcomes in patients treated with NMRT + PR

OSS questionnaire item	Clinical outcomes		p
	Baseline	Follow-up	
1. How would you rate the level of pain in your shoulder during the past month?	2.14 ± 0.77	3.79 ± 0.43	0.00001*
2. Have you had any difficulty dressing because of your shoulder condition?	2.29 ± 0.61	3.71 ± 0.47	0.000006*
3. Have you had any difficulty getting into or out of a car or using public transport because of your shoulder condition?	2.29 ± 0.61	3.71 ± 0.47	
4. Have you had any difficulty using a knife and fork simultaneously while eating?	2.43 ± 0.65	3.71 ± 0.47	
5. Are you able to do household shopping independently?	2.07 ± 0.62	3.86 ± 0.36	0.000008*
6. Are you able to carry a tray with a plate of food across a room?	2.29 ± 0.61	3.86 ± 0.36	0.000006*
7. Are you able to comb your hair using the affected arm?	2.36 ± 0.63	3.43 ± 0.51	
8. How would you describe the pain you usually experience in your shoulder?	2.29 ± 0.61	3.64 ± 0.63	0.000008*
9. Are you able to hang your clothes in a wardrobe using the affected arm?	2.29 ± 0.61	3.79 ± 0.43	0.000006*
10. Are you able to wash and dry yourself using both hands?	2.36 ± 0.63	3.64 ± 0.63	0.000008*
11. Does shoulder pain interfere with your usual work, including housework?	2.43 ± 0.65	4.00 ± 0.00	0.000006*
12. Has shoulder pain disturbed you at night during the past month?	2.43 ± 0.65	3.71 ± 0.47	
Total score	27.64 ± 1.86	44.86 ± 2.66	0.000004*

Discussion

The present study prospectively validated an algorithm for selecting a comprehensive physiotherapeutic treatment in patients with shoulder osteoarthritis. The algorithm-guided approach resulted in statistically significant improvements in shoulder function in both treatment groups. Improvements were observed not only in the total OSS but also across all individual questionnaire items, indicating a comprehensive positive effect of treatment on pain, activities of daily living, and overall shoulder function.

These findings are consistent with current concepts of conservative management of shoulder osteoarthritis, which emphasize that treatment selection should be based on in-

dividual patient characteristics, functional demands, symptom severity, and treatment expectations [5, 6]. Current clinical practice guidelines identify physical therapy as one of the fundamental components of non-operative management for shoulder osteoarthritis and highlight the importance of individualized rehabilitation programs for achieving optimal functional outcomes [5].

At the same time, a systematic review of contemporary clinical practice guidelines demonstrated that, despite broad agreement on the role of conservative management, recommendations regarding specific physiotherapeutic interventions remain heterogeneous [10]. Similarly, a recent survey of physiotherapists in the United Kingdom showed that treatment selection in routine clinical practice is largely determined by individual patient characteristics, including symptom severity, comorbidities, and functional requirements, whereas standardized decision-support algorithms are rarely used [11].

The concept of personalized treatment selection for osteoarthritis based on individual clinical and morphological characteristics has gained increasing attention in orthopedic practice in recent years [5, 6, 11, 19, 20]. In this context, the statistically significant improvement in shoulder function observed in both treatment groups, together with the absence of satisfactory or poor clinical outcomes, supports the clinical applicability of the proposed algorithm-guided approach.

The findings regarding ESWT are consistent with current evidence demonstrating its potential effectiveness in the management of various musculoskeletal disorders. According to a recent narrative review, ESWT contributes to pain reduction, functional improvement, and stimulation of tissue repair through mechanisms including mechanotransduction, neoangiogenesis, and modulation of the inflammatory response [7].

Similarly, the results obtained with NMRT combined with PR are consistent with current evidence supporting the potential role of this technology in the management of osteoarthritis. As reported in the scoping review by Schmidt et al. and the narrative review by Žnidarič et al., molecular biophysical stimulation therapy (MBST/NMRT) is associated with pain relief, improved functional outcomes, and potential stimulation of cartilage regenerative processes. However, both reviews emphasize that the available evidence remains limited because of the small number of high-quality prospective clinical studies [8, 9].

Overall, our findings are in agreement with current evidence highlighting the important role of rehabilitation in the conservative management of shoulder osteoarthritis. As noted by Vocelle et al., physical rehabilitation represents an essential component of conservative treatment; however, high-quality evidence supporting the optimal selection of specific rehabilitation strategies remains limited [21]. The proposed algorithm not only integrates independent clinical predictors of treatment effectiveness but also provides a practical decision-support tool for personalized selection of physiotherapeutic treatment according to individual patient characteristics.

Nevertheless, the present study has several limitations. The prospective cohort was relatively small, which may limit

the generalizability of the findings to a broader population of patients with shoulder osteoarthritis. Future multicenter prospective studies involving larger patient cohorts and longer follow-up periods are warranted to further validate the clinical effectiveness of the proposed algorithm.

The practical value of this algorithm lies in its ability to standardize the selection of physiotherapeutic treatment while preserving an individualized approach to patient management. Its implementation may improve the reproducibility of clinical decision-making, facilitate selection of the optimal therapeutic strategy, and contribute to better functional outcomes following conservative treatment. The present findings should be regarded as the first clinical evidence supporting the feasibility of an algorithm-guided approach to selecting comprehensive physiotherapeutic treatment for patients with shoulder osteoarthritis.

Conclusions

1. Prospective validation confirmed the clinical effectiveness of the proposed algorithm for selecting a comprehensive physiotherapeutic treatment in patients with shoulder osteoarthritis. The algorithm-guided approach was associated with statistically significant improvements in shoulder function regardless of the recommended treatment.

2. Application of the algorithm resulted in statistically significant improvements in both the total Oxford Shoulder Score and all individual questionnaire items following extracorporeal shock wave therapy combined with physical rehabilitation as well as nuclear magnetic resonance therapy combined with physical rehabilitation. All patients in the prospective cohort achieved either excellent or good clinical outcomes.

3. The proposed algorithm may serve as a practical clinical decision-support tool for selecting a comprehensive physiotherapeutic treatment in patients with shoulder osteoarthritis and represents a promising approach for further multicenter clinical validation.

References

1. Stanborough RO, Bestic JM, Peterson JJ. Shoulder Osteoarthritis. *Radiol Clin North Am.* 2022;60(4):593-603. doi: 10.1016/j.rcl.2022.03.003.
2. Ackerman IN, Buchbinder R. Let's talk about shoulder osteoarthritis. *Rheumatology (Oxford).* 2022;61(9):3507-3508. doi: 10.1093/rheumatology/keac057.
3. Hartnett DA, Milner JD, DeFroda SF. Osteoarthritis in the Upper Extremity. *Am J Med.* 2023;136(5):415-421. doi: 10.1016/j.amjmed.2023.01.025.
4. Voss A, Beitzel K. Shoulder osteoarthritis across the lifespan. *J ISAKOS.* 2023;8(6):396-397. doi: 10.1016/j.jisako.2023.10.012.
5. Michener LA, Heitzman J, Abbruzzese LD, Bondoc SL, Bowne K, et al. Physical Therapist Management of Glenohumeral Joint Osteoarthritis: A Clinical Practice Guideline from the American Physical Therapy Association. *Phys Ther.* 2023;103(6):pzad041. doi: 10.1093/ptj/pzad041.
6. Yamamoto N, Szymiski D, Voss A, Ishikawa H, Muraki T, et al. Non-operative management of shoulder osteoar-

thritis: Current concepts. *J ISAKOS*. 2023;8(5):289-295. doi: 10.1016/j.jisako.2023.06.002.

7. De la Corte-Rodríguez H, Román-Belmonte JM, Rodríguez-Damiani BA, Vázquez-Sasot A, Rodríguez-Merchán EC. Extracorporeal Shock Wave Therapy for the Treatment of Musculoskeletal Pain: A Narrative Review. *Healthcare (Basel)*. 2023;11(21):2830. doi: 10.3390/healthcare11212830.

8. Schmidt JK, Debess JE, Möller L. Magnetic resonance therapy in the treatment of osteoarthritis: A scoping review. *Radiography (London)*. 2021;27(3):968-975. doi: 10.1016/j.radi.2021.02.011.

9. Žnidarič M, Kozinc Z, Škrinjar D. Potential of molecular biophysical stimulation therapy in chronic musculoskeletal disorders: a narrative review. *Eur J Transl Myol*. 2023;33(4):11894. doi: 10.4081/ejtm.2023.11894.

10. Lowry V, Lavigne P, Zidarov D, Matifat E, Cormier AA, Desmeules F. A Systematic Review of Clinical Practice Guidelines on the Diagnosis and Management of Various Shoulder Disorders. *Arch Phys Med Rehabil*. 2024;105(2):411-426. doi: 10.1016/j.apmr.2023.09.022.

11. Lalande S, Moffatt M, Littlewood C. Shoulder osteoarthritis: A survey of current (2024) UK physiotherapy practice. *Musculoskeletal Care*. 2024;22(3):e1917. doi: 10.1002/msc.1917.

12. Fishchenko VO, Humeniuk OO. Predictive factors of clinical outcomes in the combined use of extracorporeal shock-wave therapy and physical rehabilitation methods for shoulder osteoarthritis. *Bulletin of Problems in Biology and Medicine*. 2025;178(3):270-284. doi: 10.29254/2077-4214-2025-3-178-270-284.

13. Fishchenko V, Humeniuk O, Fishchenko-Poberezhna T. Features of the Comprehensive Application of Nuclear Magnetic Resonance Therapy and Physical Rehabilitation Techniques for Degenerative-Dystrophic Shoulder Joint Diseases. *Terra Orthopaedica*. 2025;1(124):27-35. doi: 10.37647/2786-7595-2025-124-1-27-35.

14. McKenzie R, Watson G, Lindsay R. *Treat Your Own Shoulder*. USA: McKenzie Global Ltd.; 2009. 96 p.

15. Dawson J, Fitzpatrick R, Carr A. Questionnaire on the perceptions of patients about shoulder surgery. *J Bone Joint Surg Br*. 1996;78:593-600.

16. The World Medical Association. Declaration of Helsinki: Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects. Available from: <https://www.wma.net/what-we-do/medical-ethics/declaration-of-helsinki/>.

17. Convention for the Protection of Human Rights and Dignity of the Human Being with Regard to the Application of Biology and Medicine: Convention on Human Rights and Biomedicine. 1997 April 4. Available from: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_334#Text.

18. Order of the Ministry of Health of Ukraine No. 690. On Approval of the Procedure for Conducting Clinical Trials of Medicinal Products and Examination of Clinical Trial Materials and Model Regulation on Ethics Committees. 2009 September 23. Available from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1010-09#Text>.

19. Kylymniuk L, Matsipura M, Iaremyn, S. Morphological variation of knee joints in degenerative-dystrophic diseases. *Eastern Ukrainian Medical Journal*. 2026;14(2):594-604. doi: 10.21272/eumj.2026;14(2);594-604.

20. Kostub O, Blonskyi R, Kylymniuk L, Branitskyi O, Movchaniuk V, Matsipura M. Identification of clinical phenotypes in medial knee osteoarthritis using cluster analysis. *Trauma*. 2026;27(3):244-250. doi: 10.22141/1608-1706.3.27.2026.1088.

21. Vocelle AR, Weidig G, Bush TR. Shoulder structure and function: The impact of osteoarthritis and rehabilitation strategies. *J Hand Ther*. 2022;35(3):377-387. doi: 10.1016/j.jht.2022.06.008.

Received 03.05.2026

Revised 18.06.2026

Accepted 11.07.2026

Information about authors

Volodymyr O. Fishchenko, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Traumatology and Orthopedics, National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0001-9811-7861>

Olha O. Humeniuk, Postgraduate Student of the Department of Traumatology and Orthopedics, National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; <https://orcid.org/0009-0005-1065-1282>

Oleksandr V. Fishchenko, PhD, Assistant of the Department of Sports Medicine, Physical Education and Rehabilitation, National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-8825-4528>

Roman S. Humeniuk, Team Physician of the National Teams of Ukraine in Indoor and Beach Volleyball, Ministry of Youth and Sports of Ukraine, Kyiv, Ukraine; <https://orcid.org/0009-0009-7361-5405>

Conflicts of interests. Authors declare the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

Information about funding. This study was conducted without external financial support.

Authors' contribution. V.O. Fishchenko — study conception and design, supervision, critical revision of the manuscript; O.O. Humeniuk — patient recruitment, data collection, clinical investigation, statistical analysis, preparation of the first draft of the manuscript; O.V. Fishchenko — clinical investigation, methodology, interpretation of the results; R.S. Humeniuk — methodology, interpretation of the results, manuscript editing.

Фіщенко В.О.¹, Гуменюк О.О.¹, Фіщенко О.В.¹, Гуменюк Р.С.²

¹Вінницький національний медичний університет ім. М.І. Пирогова, м. Вінниця, Україна

²Міністерство молоді та спорту України, м. Київ, Україна

Проспективна клінічна валідація алгоритму вибору методу комплексного фізіотерапевтичного лікування при остеоартриті плечового суглоба

Резюме. Актуальність. Незважаючи на широке застосування консервативного лікування при остеоартриті плечового суглоба, стандартизовані алгоритми вибору фізіотерапевтич-

ної тактики залишаються недостатньо розробленими. **Мета:** провести проспективну клінічну валідацію алгоритму вибору методу комплексного фізіотерапевтичного лікування в осіб

з остеоартритом плечового суглоба. **Матеріали та методи.** Обстежено 45 пацієнтів з остеоартритом плечового суглоба I–II стадій за Kellgren — Lawrence. Відповідно до розробленого алгоритму, 31 пацієнту призначали екстракорпоральну ударно-хвильову терапію в поєднанні з фізичною реабілітацією (ЕУХТ + ФР), 14 — ядерно-магнітно-резонансну терапію та фізичну реабілітацію (ЯМРТ + ФР). Клінічні показники оцінювали за опитувальником Oxford Shoulder Score (OSS) до початку лікування та через 6 місяців після його завершення. Для статистичного аналізу використовували критерій Вілкоксона. Значущими вважали відмінності при $p < 0,05$. **Результати.** У пацієнтів обох груп встановлено значуще поліпшення функціонального стану плечового суглоба за всіма компонентами шкали OSS. У групі ЕУХТ + ФР сумарний показник OSS збільшився з $27,52 \pm 2,62$ бала до $42,71 \pm 2,69$ бала

($p < 0,00001$), середній приріст становив 15,19 бала. Результати лікування були відмінними у 25 (80,65 %) пацієнтів, хорошими — у 6 (19,35 %). У групі ЯМРТ + ФР сумарний показник OSS зріс з $27,64 \pm 1,86$ бала до $44,86 \pm 2,66$ бала ($p = 0,000004$), середній приріст становив 17,22 бала. Відмінні результати лікування визначено у 12 (85,71 %) пацієнтів, хороші — у 2 (14,29 %). Задовільних та незадовільних результатів лікування в обох групах не фіксували. **Висновки.** Таким чином, шляхом проспективної клінічної валідації алгоритму вибору методу комплексного фізіотерапевтичного лікування підтверджено його високу ефективність у пацієнтів з остеоартритом плечового суглоба.

Ключові слова: остеоартрит; дегенеративно-дистрофічні захворювання суглобів; фізіотерапевтичне лікування; персоналізована медицина; алгоритм

Бородюк Д.В.^{1,2}, Зазірний І.М.^{1,2}, Анкін М.Л.¹, Ладика В.О.¹

¹Національний університет охорони здоров'я України імені П.Л. Шупика, м. Київ, Україна

²Центр ортопедії, травматології та спортивної медицини клінічної лікарні «Феофанія», м. Київ, Україна

Хірургічне лікування вогнепальних переломів стегнової кістки: роль маркерів запалення

Резюме. Актуальність. Вогнепальні переломи стегнової кістки належать до найскладніших проблем військової та цивільної травматології через високоенергетичний характер ушкодження, формування обширних дефектів кісткової та м'якотканинної складових, значну контамінацію ранового каналу та порушення васкуляризації тканин. Частка таких ушкоджень у структурі бойових поранень кінцівок сягає 15–22 %, причому спостерігається тенденція до зростання кількості високоенергетичних травм із багатоуламковими переломами та критичними дефектами. Складність лікування визначається необхідністю балансування між радикальністю первинної хірургічної обробки та збереженням життєздатних тканин для подальшої реконструкції. **Мета:** провести систематичний огляд сучасних стратегій хірургічного лікування вогнепальних переломів стегнової кістки та узагальнити доступні дані щодо ролі маркерів системної запальної відповіді, зокрема прокальцитоніну (ПКТ), інтерлейкіну-6 (ІЛ-6) та С-реактивного білка (СРБ), у плануванні хірургічної тактики та оцінці ризику ускладнень. **Матеріали та методи.** Виконано систематичний огляд із дотриманням положень PRISMA 2020. Пошук здійснювався у базах PubMed, Scopus, Web of Science та Cochrane Library за період 2018–2025 рр. із використанням пошукових комбінацій на основі термінів «gunshot fractures», «femoral fractures», «damage control orthopedics», «external fixation», «intramedullary nailing», «interleukin-6», «C-reactive protein», «procalcitonin». Критерії включення: оригінальні когортні й ретроспективні дослідження, систематичні огляди, метааналізи та клінічні настанови, присвячені хірургічному лікуванню вогнепальних чи відкритих переломів стегнової кістки або динаміці біомаркерів при тяжкій травмі. Методологічна якість оцінювалась за інструментом ROBINS-I та MINORS. Проведено якісний нарративний синтез без метааналізу. **Результати.** До остаточного аналізу включено 24 публікації. Систематизовано показання та обмеження основних методів первинної стабілізації: зовнішньої фіксації, інтрамедулярного та накісткового остеосинтезу. Зовнішня фіксація залишається методом вибору при політравмі, нестабільній гемодинаміці, масивному ушкодженні м'яких тканин та потребі у судинній реконструкції. Тактика контролю ушкоджень в ортопедії передбачає первинну мінімально інвазивну стабілізацію з подальшою конверсією на остаточний остеосинтез після регресування системної запальної відповіді. Наведені дані щодо динаміки СРБ, ІЛ-6 та ПКТ ґрунтуються на підсумку включених першоджерел і відображають орієнтовні клінічні діапазони, які пропонуються авторами окремих досліджень як допоміжні маркери прийняття рішення, а не як формалізований поріг із доведеною діагностичною цінністю на рівні метааналізу. **Висновки.** Отримані дані підтверджують доцільність персоналізованого підходу до хірургічного лікування вогнепальних переломів стегнової кістки з урахуванням типу перелому, стану м'яких тканин та індивідуальної динаміки маркерів системного запалення. Поєднання сучасних хірургічних стратегій із моніторингом ПКТ, ІЛ-6 та СРБ може бути додатковим інструментом клінічного судження щодо термінів конверсії та ризику інфекційних ускладнень; однак остаточне формалізоване впровадження пропонує пропонує проспективних порівняльних досліджень із кількісним синтезом даних.

Ключові слова: вогнепальні переломи; стегнова кістка; маркери системного запалення; тактика контролю ушкоджень; огляд

Вступ

Вогнепальні переломи стегнової кістки залишаються однією з найскладніших категорій ушкоджень опорно-рухового апарату, що зумовлено високоенергетичним механізмом ушкодження, масивними дефектами кісток та м'яких тканин, контамінацією ранового каналу та порушенням кровопостачання тканин [1, 2]. За даними спеціалізованих центрів, зайнятих наданням допомоги постраждалим під час повномасштабної війни в Україні, вогнепальні переломи супроводжують близько 45 % поранень кінцівок, а переломи стегнової кістки становлять до 22 % у структурі бойової травми нижніх кінцівок [3, 4]. Високу частоту множинних уламкових ушкоджень зі значними первинними дефектами кісткової тканини відзначають майже у 80 % поранених із вогнепальними переломами довгих кісток [2].

Системна запальна відповідь при вогнепальному переломі має каскадний характер і супроводжується значним викидом прозапальних медіаторів. Персистенція високих рівнів цитокінів корелює з розвитком синдрому системної запальної відповіді, поліорганної дисфункції та інфекційних ускладнень [5]. Сучасна парадигма хірургічного лікування тяжкої бойової травми опорно-рухового апарату базується на концепції тактики контролю ушкоджень в ортопедії (damage control orthopedics, DCO), яка передбачає етапність хірургічних втручань із первинною мінімально інвазивною стабілізацією та відтермінованим остаточним остеосинтезом після стабілізації загального стану пораненого [6–9].

Моніторинг динаміки маркерів запалення розглядається як можливий допоміжний інструмент об'єктивізації тяжкості стану пораненого, прогнозування перебігу травматичної хвороби та планування термінів хірургічних втручань. Водночас наявна література характеризується значною гетерогенністю методологічних підходів, широкими діапазонами порогових значень і обмеженою кількістю рандомізованих порівнянь, що зумовлює потребу в систематизації накопичених даних [5, 10].

Мета роботи: систематизувати сучасні підходи до хірургічного лікування вогнепальних переломів стегнової кістки та узагальнити наявні дані щодо діагностичної та прогностичної цінності маркерів системної запальної відповіді (прокальцитоніну (ПКТ), інтерлейкіну-6 (ІЛ-6) та С-реактивного білка (СРБ)) у плануванні етапності хірургічної тактики.

Матеріали та методи

Систематичний огляд виконано з дотриманням положень Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA 2020). Протокол дослідження не реєструвався у PROSPERO, що зазначено в обмеженнях. Пошук релевантних джерел здійснювався у міжнародних наукометричних базах PubMed/MedLine, Scopus, Web of Science та Cochrane Library за період з 1 січня 2018 року до 31 грудня 2025 року, а також у фахових україномовних виданнях («Ортопе-

дія, травматологія та протезування», «Травма», «Terra Orthopaedica», «Pain, Joints, Spine»).

Пошукова стратегія ґрунтувалася на застосуванні контрольованих термінів MeSH та вільних текстових запитів, поєднаних булевими операторами. Базова формула мала вигляд: («gunshot fractures» OR «ballistic fractures» OR «combat-related fractures») AND («femur» OR «femoral shaft» OR «lower extremity») AND («external fixation» OR «intramedullary nailing» OR «damage control orthopedics» OR «induced membrane» OR «Ilizarov») AND («interleukin-6» OR «C-reactive protein» OR «procalcitonin» OR «systemic inflammatory response»). Ручний пошук передбачав перегляд списків літератури включених публікацій.

Критерії включення передбачали: публікації англійською або українською мовами за 2018–2025 рр.; когортні, випадок — контроль, ретроспективні, систематичні огляди, метааналізи та клінічні настанови; дослідження, що охоплюють дорослих пацієнтів (≥ 18 років) із вогнепальними або відкритими переломами стегнової кістки Gustilo-Anderson III або дослідження динаміки біомаркерів при політравмі. Критерії виключення: дослідження на дітях, тваринні моделі без клінічної трансляції, публікації російською мовою, тези без повнотекстової версії, дублікати, роботи з недостатнім методологічним описом, а також джерела, що безпосередньо не стосуються теми.

Процес відбору здійснювався у два етапи: перший — скринінг за заголовками та анотаціями; другий — оцінка повнотекстових публікацій за критеріями придатності. Видобування даних проводилося за стандартизованою формою, що включала бібліографічні характеристики, дизайн, розмір вибірки, тип ушкодження, застосовану хірургічну тактику, досліджувані біомаркери, часові точки вимірювання та основні результати. Оцінка ризику систематичної помилки для когортних та ретроспективних досліджень проводилася за інструментом ROBINS-I, для неконтрольованих серій випадків — за шкалою MINORS. З огляду на значну клінічну й методологічну гетерогенність включених робіт кількісний синтез (метааналіз) не виконувався; проведено якісний наративний синтез із групуванням результатів за тематичними блоками.

Процес відбору відображено на діаграмі PRISMA (рис. 1).

Результати

До остаточного аналізу включено 24 публікації. Систематизація даних включених публікацій дозволила виокремити три основні хірургічні стратегії стабілізації вогнепальних переломів стегнової кістки: зовнішню фіксацію, інтрамедулярний остеосинтез та накістковий остеосинтез [11]. Зовнішня фіксація зберігає статус методу вибору при поєднаній травмі, нестабільній гемодинаміці, масивному ушкодженні м'яких тканин, потребі у судинній реконструкції та при проведенні етапного лікування в польових умовах [4, 7, 12]. М. Laigle зі співавторами у серії з 85 пацієнтів показали, що при відкритих переломах гомілки перехід від тим-

часової зовнішньої фіксації до інтрамедулярного остеосинтезу забезпечує консолідацію в середньому через 16 тижнів із частотою глибокої інфекції 4,7 % [13].

Інтрамедулярний остеосинтез за умов правильного відбору демонструє найкращі функціональні результати серед методів внутрішньої фіксації вогнепальних переломів діяфіза стегнової кістки. G. Polat та співавтори у ретроспективному порівняльному дослідженні 107 вогнепальних переломів стегнової кістки (99 пацієнтів) не виявили статистично значущих відмінностей частоти післяопераційних ускладнень між групами зовнішньої фіксації та блокованого інтрамедулярного остеосинтезу, однак функціональні результати за шкалами оцінки сегмента були кращими у групі інтрамедулярної фіксації [9].

Одночасно M. Abghari зі співавторами при лікуванні низькоенергетичних вогнепальних ушкоджень нижніх кінцівок у цивільному травматологічному центрі відзначили низьку частоту ускладнень за умови стандар-

тизованого протоколу первинної хірургічної обробки [14–16].

Накістковий остеосинтез пластинами у лікуванні вогнепальних переломів стегнової кістки застосовується обмежено через додаткову травматизацію тканин, високий ризик розвитку глибокої інфекції та порушення кровопостачання кісткових фрагментів. Основними показаннями до його використання є внутрішньосуглобові переломи та складні метафізарні переломи, за яких неможливо забезпечити належну репозицію та стабільність іншими способами фіксації [7, 17].

Концепція тактики контролю ушкоджень в ортопедії

DCO передбачає первинну мінімально інвазивну стабілізацію апаратом зовнішньої фіксації з подальшою конверсією на остаточний остеосинтез після стабілізації загального стану пораненого [1, 18]. Ал-

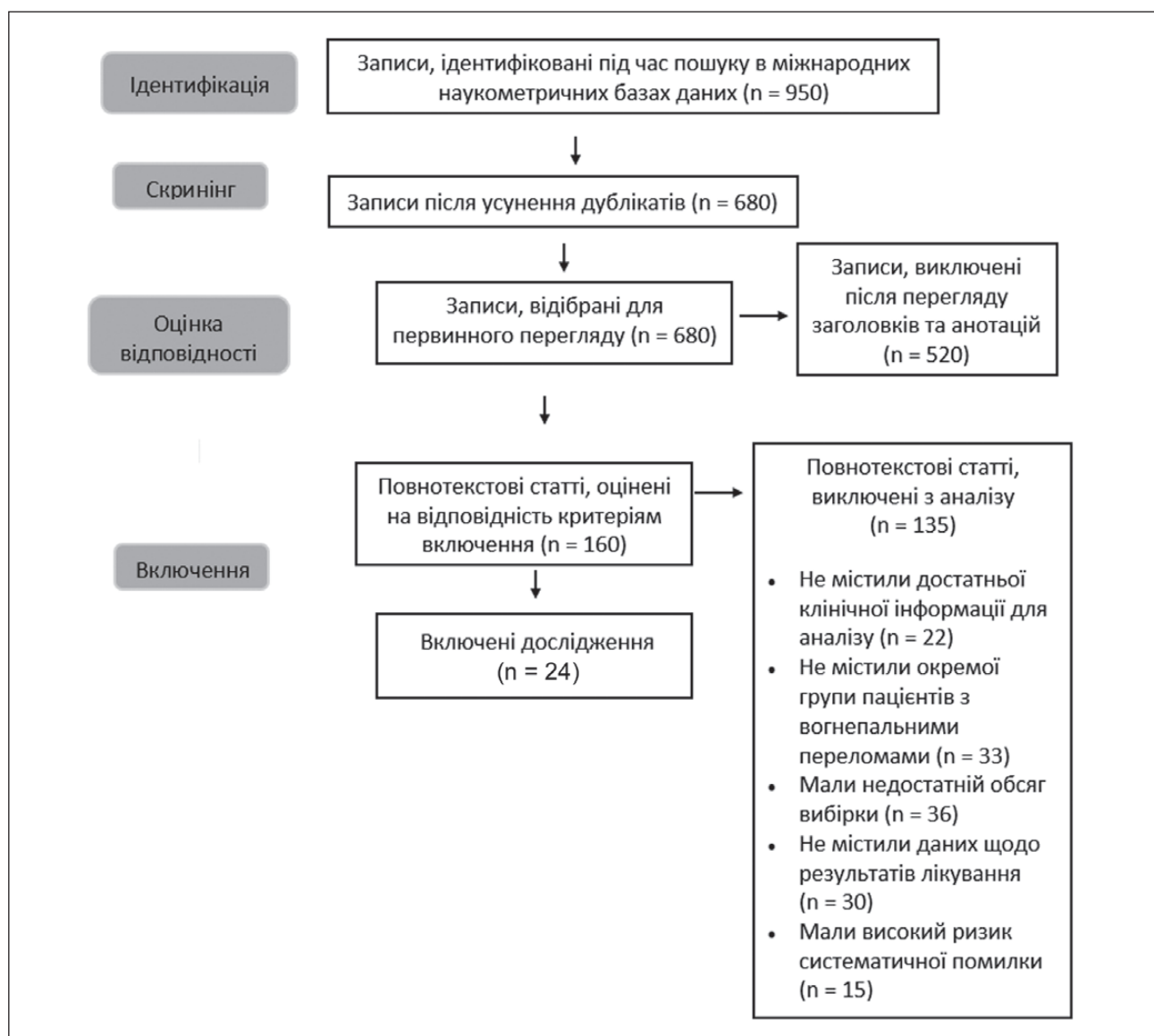


Рисунок 1. Діаграма PRISMA

горитм передбачає моніторинг системної запальної відповіді та визначення оптимальних термінів виконання остаточного остеосинтезу, оскільки передчасне хірургічне втручання може призвести до посилення системної запальної реакції та погіршення загального стану пацієнта [5]. У серії А. Калашникова і співавторів, що охоплює 128 постраждалих із домінуючою бойовою травмою гомілки, запропоновано диференційований підхід до конверсії АЗФ на інтрамедулярний остеосинтез із урахуванням типу перелому за класифікацією Gustilo-Anderson та ознак локального запального процесу [19].

Узагальнені показання до застосування первинних методів фіксації, які отримані з включених публікацій, наведено в табл. 1.

Маркери системної запальної відповіді при вогнепальній травмі

Аналіз включених досліджень виявив характерні патерни зміни концентрацій біомаркерів після тяжкої бойової травми. Інтерлейкін-6 демонструє найшвидшу кінетику серед досліджуваних маркерів із досягненням пікової концентрації через 12–24 години після травми;

у пацієнтів зі сприятливим перебігом рівень ІЛ-6 зазвичай знижується на 4–5-ту добу, тоді як персистенція високих значень після 3-ї доби у низці спостережних досліджень асоціювалась із розвитком інфекційних ускладнень [5]. С-реактивний білок характеризується повільнішою динамікою з піком через 48–72 години; вторинне підвищення рівнів СРБ після початкового зниження у клінічних спостереженнях розглядається як ранній сигнал інфекційного ускладнення [5]. Прокальцитонін серед проаналізованих маркерів є найбільш специфічним щодо бактеріальної інфекції: М. Лі зі співавторами у проспективному дослідженні 100 пацієнтів із тяжкою травмою (ISS ≥ 16) виявили, що комбінація СРБ, ПКТ та сироваткового амілоїду А (біоскор) перевершує діагностичну цінність кожного окремого маркера [5].

Орієнтовні діапазони значень біомаркерів, які пропонуються окремими авторами як допоміжні при оцінці перебігу травматичної хвороби, наведено в табл. 2.

Графічне відображення типових патернів динаміки СРБ, ІЛ-6 та ПКТ при сприятливому та несприятливому перебігу травматичної хвороби подано на рис. 2.

Таблиця 1. Показання до основних методів первинної фіксації вогнепальних переломів стегнової кістки

Метод	Клінічна ситуація	Обмеження
Зовнішня фіксація	Політравма; гемодинамічна нестабільність; масивне ушкодження м'яких тканин; судинна реконструкція; етап евакуації	Інфекція спиць; тривалий термін реабілітації; обмежене функціональне навантаження
Інтрамедулярний остеосинтез	Стабільний загальний стан; відсутність клінічно значущої контамінації; регрес системного запалення; діафізарний перелом	Можливість інфікування кістково-мозкового каналу; обмеження при багатотравматичних і внутрішньосуглобових ушкодженнях
Накістковий остеосинтез	Внутрішньосуглобові переломи дистального або проксимального відділів; критичні дефекти при фіксації двома пластинами	Широкий доступ; високий ризик періімплантного інфікування; обмежене застосування при контамінованих ранах

Примітка: дані отримані на основі якісного синтезу включених джерел [4, 7, 9, 11–13, 17].

Таблиця 2. Орієнтовні клінічні діапазони маркерів системної запальної відповіді за даними включених досліджень

Маркер	Час піку після травми, години	Діапазон при сприятливому перебігу	Діапазон при ризiku ускладнень	Клінічна інтерпретація
ІЛ-6	12–24	< 100 пг/мл після 4-ї доби	> 200 пг/мл після 3-ї доби	Ранній індикатор інтенсивності SIRS
СРБ	48–72	< 50 мг/л на 5-ту — 7-му добу	> 100 мг/л після 5-ї доби; бімодальний патерн	Скринінг загального рівня запалення
ПКТ	24–48	< 0,5 нг/мл	> 0,5 нг/мл після 5-ї доби; > 2,0 нг/мл	Найбільш специфічний щодо бактеріальної інфекції

Примітки: ІЛ-6 — інтерлейкін-6; СРБ — С-реактивний білок; ПКТ — прокальцитонін; SIRS — синдром системної запальної відповіді. Наведені діапазони є узагальненням окремих спостережних досліджень і не є формалізованими діагностичними порогоми [5, 10].

Алгоритм конверсії на остаточної остеосинтез

Узагальнення включених робіт дозволило запропонувати схему етапного хірургічного лікування із урахуванням динаміки запальних маркерів як допоміжного клінічного орієнтира. Типовий часовий інтервал для виконання конверсії з тимчасової зовнішньої фіксації на остаточної інтрамедулярний остеосинтез, описа-

ний у більшості включених публікацій, припадає на 5–10-ту добу після травми за умови нормалізації клінічних і лабораторних показників [13, 19]. Конверсія раніше 5-ї доби асоціюється з підвищеним ризиком вторинного запального ураження, тоді як затримка понад 14 діб ускладнюється формуванням рубцевої тканини та технічними проблемами репозиції. Спрощений алгоритм етапного лікування наведено на рис. 3.

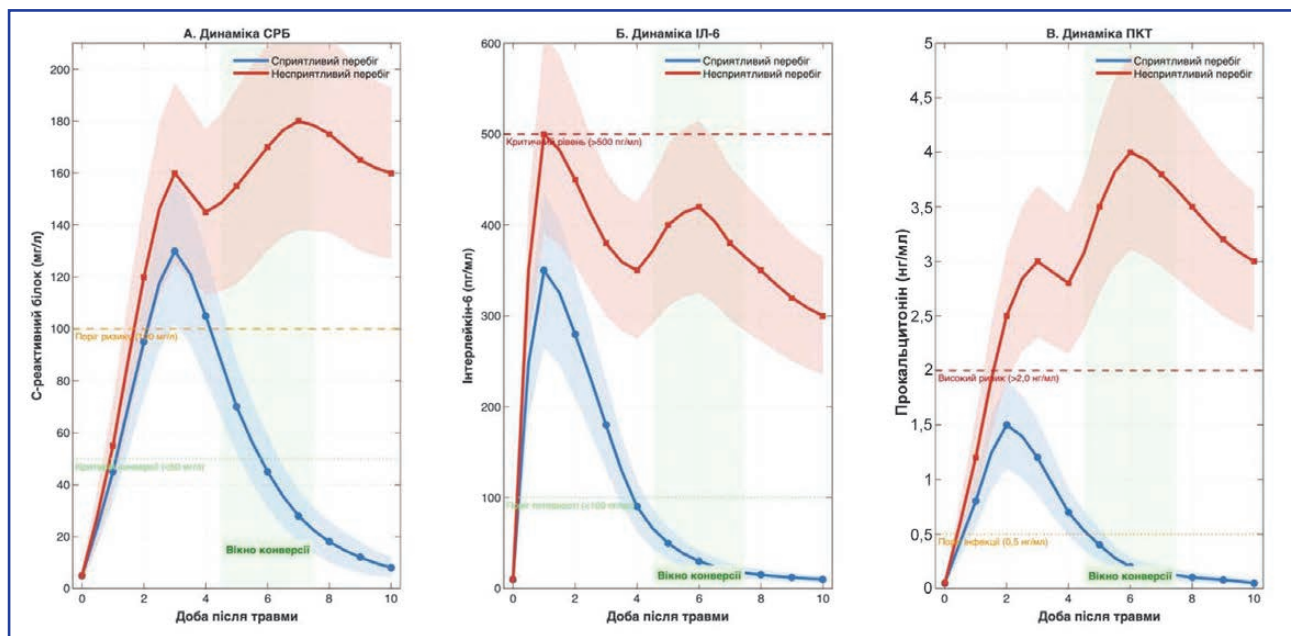


Рисунок 2. Узагальнена динаміка СРБ, ІЛ-6 та ПКТ при сприятливому та несприятливому перебігу травматичної хвороби у пацієнтів із вогнепальними переломами стегнової кістки (за даними включених досліджень)

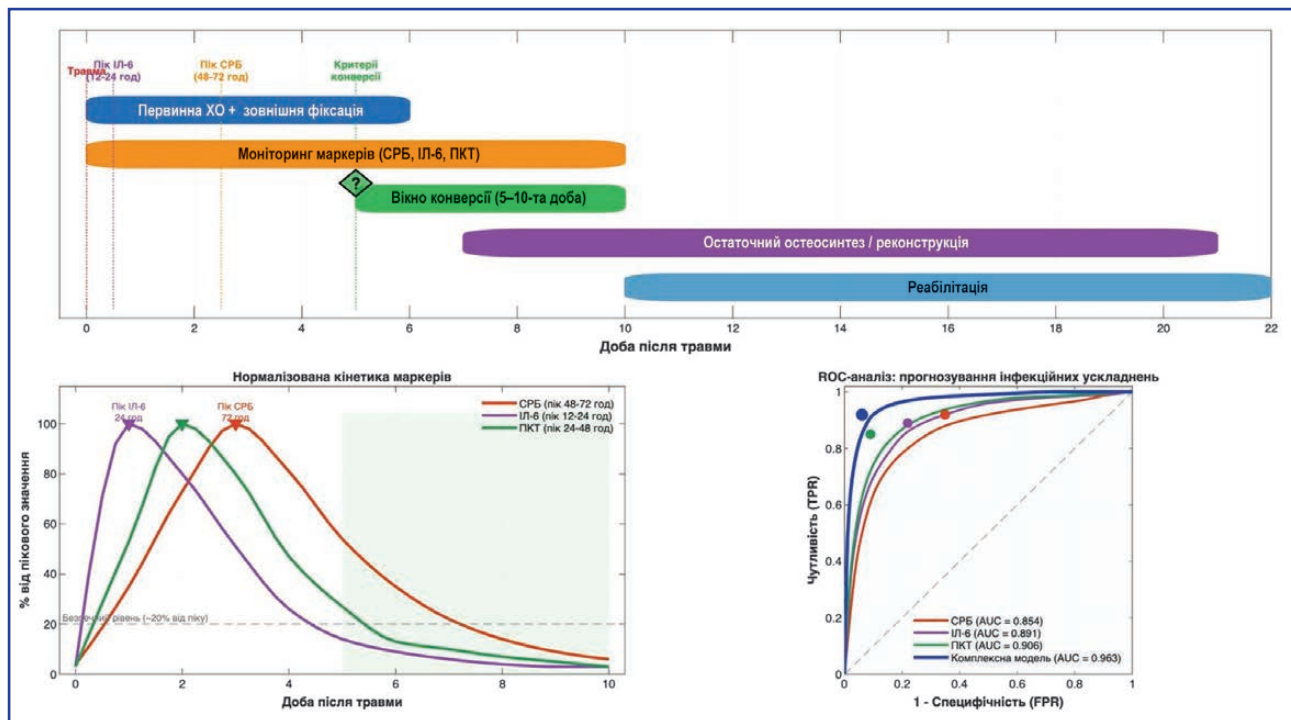


Рисунок 3. Спрощена схема етапного хірургічного лікування вогнепальних переломів стегнової кістки з інтеграцією моніторингу маркерів системного запалення

Реконструкція кісткових дефектів

Для заміщення кісткових дефектів стегнової кістки у включених дослідженнях застосовувалися метод Лізарова, техніка індукованої мембрани (Masquelet) та васкуляризована кісткова пластика [20, 21]. L. Mathieu зі співавторами у серії військових постраждалих продемонстрували успішну реконструкцію дефектів стегнової кістки довжиною до 11 см за допомогою техніки індукованої мембрани в поєднанні з одномоментною конверсією на інтрамедулярний остеосинтез за принципами DCO [22]. A. Shastov та співавтори у нещодавньому огляді підтвердили, що техніка індукованої мембрани ефективна як при асептичних, так і при інфікованих дефектах, однак рівень зрощення залежить від ретельності первинного дебрідменту й контролю інфекції [23]. С. Fischer і співавтори у роботі 2025 року представили модифіковану техніку із використанням термодезінфікованих кортикальних фрагментів для заповнення тривалих сегментарних дефектів, що демонструє перспективність подальших удосконалень [24].

Порівняльні узагальнені показники клінічних наслідків основних стратегій фіксації, отримані з включених публікацій, наведені у табл. 3.

Слід підкреслити, що наведені відсоткові показники є узагальненням діапазонів, повідомлених у первинних дослідженнях із різним дизайном, і не ґрунтуються на метааналітичному обчисленні.

Обговорення

Зіставлення з аналогічними дослідженнями. Отримані дані узгоджуються з тенденціями, описаними в міжнародних систематичних оглядах, присвячених лікуванню відкритих переломів діафіза стегнової кістки. Огляд M. Laigle та співавторів, який охопив 85 випадків відкритих переломів гомілки, також документує зниження частоти інфекційних ускладнень при етапній тактиці з плановою конверсією на інтрамедулярний остеосинтез порівняно з первинним остаточним втручанням у пацієнтів з політравмою [13]. Результати

роботи L. Mathieu та співавторів демонструють ефективність застосування техніки Masquelet саме в умовах обмежених ресурсів польової хірургії та підтверджують придатність DCO для бойової травми [22].

Суперечності літератури. Водночас порівняльні дослідження не виявляють однозначної переваги тактики контролю ушкоджень над первинним остаточним остеосинтезом у гемодинамічно стабільних пацієнтів, що підкреслює залежність вибору від конкретного клінічного контексту [9, 10]. Суттєво відрізняються також пропонувані порогові значення біомаркерів: у різних когортах межові значення ІЛ-6 коливаються від 150 до 500 пг/мл, що відображає методологічну гетерогенність вимірювань і часових точок забору крові [5, 10]. Відмінним є й підхід до інтерпретації ПКТ: у серії M. Li та співавторів біоскор із трьох маркерів переважає кожен показник окремо, однак ця модель потребує зовнішньої валідації [5].

Сила доказової бази. Оцінка методологічної якості включених робіт за ROBINS-I та MINORS засвідчила переважно помірний ризик систематичної помилки. Більшість джерел становлять ретроспективні когортні й спостережні дослідження; рандомізовані контрольовані випробування, присвячені саме вогнепальним переломам стегнової кістки, в базах не представлені. Така специфіка зумовлена етичними та логістичними обмеженнями проведення клінічних випробувань в умовах збройного конфлікту. Це знижує рівень доказовості наявних рекомендацій та обмежує можливість формулювання універсальних клінічних алгоритмів.

Обмеження огляду. Необхідно враховувати низку обмежень: відсутність реєстрації протоколу в PROSPERO; виконання якісного синтезу без кількісного метааналізу через клінічну гетерогенність джерел; значна частка робіт із низькоенергетичними цивільними ушкодженнями, узагальнення яких з бойовою травмою потребує обережності; мовні обмеження пошуку (включення до аналізу лише публікацій англійською та українською мовами). Наведені в табл. 2 і 3 діапазони

Таблиця 3. Узагальнені клінічні результати стратегій фіксації вогнепальних переломів стегнової кістки за даними включених досліджень

Показник	Первинний остаточний остеосинтез	DCO з плановою конверсією	DCO без систематичного моніторингу маркерів
Частота глибокої інфекції, %	18–25	8–12	15–20
Частота незрощення, %	12–18	6–9	10–15
Середній час зрощення, тижні	18–24	14–18	16–22
Потреба у повторних операціях, %	35–42	18–25	28–35
Функціональний результат (добрий/відмінний), %	55–65	72–82	60–70

Примітка: DCO — тактика контролю ушкоджень в ортопедії (damage control orthopedics). Наведені відсотки відображають узагальнені діапазони, повідомлені у включених публікаціях [9, 13, 14, 19, 22, 23], і мають інтерпретуватися з урахуванням гетерогенності первинних даних.

відображають зведені дані первинних досліджень і мають трактуватися як орієнтовні клінічні патерни, а не як формалізовані пороги з доведеною діагностичною цінністю.

Практичні межі висновків. У клінічній практиці моніторинг ПКТ, ІЛ-6 та СРБ доцільно розглядати як додатковий інструмент підтримки рішення в комплексі зі стандартною клініко-лабораторною оцінкою, даними візуалізації та інтраопераційним спостереженням. Остаточне впровадження кількісних алгоритмів потребує проспективних багатоцентрових досліджень з уніфікованими точками вимірювання та первинними кінцевими показниками у вигляді частоти глибокого інфікування, незрощення та функціонального відновлення.

Висновки

Сучасна концепція хірургічного лікування вогнепальних переломів стегнової кістки ґрунтується на принципах тактики контролю ушкоджень, що передбачає первинну мінімально інвазивну стабілізацію апаратом зовнішньої фіксації з подальшою відтермінованою конверсією на остаточний остеосинтез після стабілізації загального стану пораненого.

Інтрамедулярний остеосинтез у відібраних пацієнтів забезпечує кращі функціональні результати порівняно з тривалою зовнішньою фіксацією, проте питання оптимальних термінів конверсії залишається дискусійним. Реконструкція критичних кісткових дефектів може здійснюватися методом дистракційного остеогенезу, технікою індукованої мембрани та васкуляризованою кістковою пластиною залежно від розміру дефекту й стану м'яких тканин.

Моніторинг маркерів системної запальної відповіді, зокрема ПКТ, ІЛ-6 та СРБ, може розглядатися як допоміжний інструмент клінічного судження при плануванні термінів конверсії та оцінці ризику інфекційних ускладнень. Наявні дані свідчать про перевагу комплексної оцінки трьох маркерів у динаміці над ізольованим визначенням одного показника.

Водночас огляд підтверджує, що на сьогодні відсутні формалізовані порогові значення з доведеною діагностичною цінністю на рівні метааналізу; наведені у первинних дослідженнях діапазони слід трактувати як клінічні орієнтири. Для формалізованого впровадження стратегії визначення термінів конверсії на основі моніторингу біомаркерів необхідні проспективні, багатоцентрові дослідження з уніфікованими методологічними критеріями. Перспективним напрямом подальших досліджень є розробка інтегральних прогностичних моделей, які поєднуюватимуть лабораторні показники з клінічними індексами тяжкості та даними візуалізації.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів та власної фінансової зацікавленості при підготовці даної статті.

Інформація про фінансування. Дослідження виконано в рамках плану науково-дослідної роботи кафедри ортопедії та травматології Національного універ-

ситету охорони здоров'я України імені П.Л. Шупика. Окремого гранту чи додаткового фінансування дослідження не отримувало.

Внесок авторів. Бородюк Д.В. — концепція та дизайн дослідження, пошук і аналіз літератури, написання тексту статті; Зазірний І.М. — науково-методичне керівництво, критичний перегляд змісту; Анкін М.Л. — концепція дослідження, остаточне затвердження варіанта статті для публікації; Ладика В.О. — аналіз та систематизація даних, редагування тексту.

Список літератури

1. Бур'янов О.А., Страфун С.С., Шлапак І.П., Лакша А.М., Галушко О.А., Ярмолюк Ю.О. та ін. *Вогнепальні поранення кінцівок: методичні рекомендації*. Київ; 2015. 46 с.
2. Trutyak I., Los D., Medzyn V., Trunkvalter V. *Treatment of combat surgical trauma of the limbs in the conditions of modern war. Proceedings of the Shevchenko Scientific Society. Medical Sciences*. 2022;69(2):129-136. <https://doi.org/10.25040/ntsh2022.02.16>.
3. Бородюк Д.В., Зазірний І.М., Анкін М.Л., Ладика В.О. *Епідеміологія та клінічні особливості вогнепальних переломів стегнової кістки в умовах військового конфлікту*. Травма. 2025;26(2):94-99. doi: 10.22141/1608-1706.2.26.2025.1006.
4. Franke A. *Treatment of gunshot fractures of the lower extremity: Part I: Incidence, importance, case numbers, pathophysiology, contamination, principles of emergency and first responder treatment*. Unfallchirurg. 2014;117(11):978-984. <https://doi.org/10.1007/s00113-014-2635-y>.
5. Li M., Qin Y.J., Zhang X.L., Zhang C.H., Ci R.J., Chen W. et al. *A biomarker panel of C-reactive protein, procalcitonin and serum amyloid A is a predictor of sepsis in severe trauma patients*. Sci Rep. 2024;14:628. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51414-y>.
6. Анкін М.Л., Поліщук М.Є., Галушко О.А., Шуба В.Й., Петрик Т.М., Ладика В.О. *Принципи організації спеціалізованої травматологічної допомоги у разі вогнепальних поранень кінцівок у сучасній війні*. Київ; 2022. 42 с.
7. Бур'янов О.А., Ярмолюк Ю.О., Лось Д.В., Вакулич М.В. *Сучасні хірургічні методи лікування постраждалих з вогнепальними пораненнями кінцівок*. Травма. 2017;18(2):30-35. <https://doi.org/10.22141/1608-1706.2.18.2017.102555>.
8. Mathieu L., Mourtialon R., Durand M., de Rousiers A., de l'Escalopier N., Collombet J.M. *Masquelet technique in military practice: specificities and future directions for combat-related bone defect reconstruction*. Mil Med Res. 2022;9(1):48. <https://doi.org/10.1186/s40779-022-00411-1>.
9. Polat G., Balci H.I., Ergin O.N., Asma A., Şen C., Kiliçoğlu Ö. *A comparison of external fixation and locked intramedullary nailing in the treatment of femoral diaphysis fractures from gunshot injuries*. Eur J Trauma Emerg Surg. 2018;44(3):451-455. <https://doi.org/10.1007/s00068-017-0814-6>.
10. Nguyen M.P., Como J.J., Golob J.F., Reich M.S., Valier H.A. *Variation in treatment of low energy gunshot injuries — A survey of OTA members*. Injury. 2018;49(3):570-574. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2018.01.027>.
11. Танасієнко П.В., Василов В.В. *Порівняльна характеристика різних методик остеосинтезу у поранених із вогнепальними ушкодженнями довгих кісток*. Pain,

joints, spine. 2024;14(4):186-192. <https://doi.org/10.22141/pjs.14.4.2024.437>.

12. Лябах А.П., Турчин О.А., Омельченко Т.М., Лазаренко Г.М., П'ятковський В.М., Євлантьєва Т.В. Системи оцінки тяжко травмованої кінцівки в умовах сучасної війни (методичні рекомендації). *Terra Orthopaedica*. 2023;4(119):47-58. <https://doi.org/10.37647/2786-7595-2023-119-4-47-58>.

13. Laigle M., Rony L., Pinet R., Lancigu R., Steiger V., Hubert L. Intramedullary nailing for adult open tibial shaft fracture. An 85-case series. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2019;105:1021-1024. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2019.04.020>.

14. Abghari M., Monroy A., Schubl S., Davidovitch R., Egol K. Outcomes following low energy civilian gunshot wound trauma to the lower extremities: results of a standard protocol at an urban trauma center. *Iowa Orthop J*. 2015;35:65-69. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26361445/>.

15. Su C.A., Nguyen M.P., O'Donnell J.A., Vallier H.A. Outcomes of tibia shaft fractures caused by low energy gunshot wounds. *Injury*. 2018;49(6):1097-1101. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2018.04.002>.

16. Woolum J.A., Bailey A.M., Dugan A., Agrawal R., Baum R.A. Evaluation of infection rates with narrow versus broad-spectrum antibiotic regimens in civilian gunshot open fracture injury. *Am J Emerg Med*. 2020;38(5):934-939. <https://doi.org/10.1016/j.ajem.2019.158358>.

17. Jeffery S.L. The Management of Combat Wounds: The British Military Experience. *Adv Wound Care (New Rochelle)*. 2016;5(10):464-473. <https://doi.org/10.1089/wound.2015.0653>.

18. Бур'янов О.А., Ярмолюк Ю.О., Грицай М.П., Клапчук Ю.В., Лось Д.В., Омельченко Т.М. та ін. Об'єктивізація критеріїв до заміни методу фіксації при лікуванні переломів у пацієнтів із бойовою травмою кінцівок. *Вісник ортопедії, травматології та протезування*. 2022;(4):74-77.

19. Калашников А.В., Літун Ю.М., Дем'ян Ю.Ю. Диференційований підхід до хірургічного лікування вогнепальних переломів діафізу гомілки. *Terra Orthopaedica*. 2024;2(121):10-16. <https://doi.org/10.37647/2786-7595-2024-121-2-10-16>.

20. Connolly M. Changing paradigms in lower extremity reconstruction in war-related injuries. *Mil Med Res*. 2016;3:9. <https://doi.org/10.1186/s40779-016-0080-7>.

21. Venant J., Masquelet A.C., Collombet J.M. Engineering the bone reconstruction surgery: the case of the Masquelet-induced membrane technique. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2025;51(1):151. <https://doi.org/10.1007/s00068-025-02815-9>.

22. Mathieu L., Bilichtin E., Durand M., Murison J.C., Rigal S., Collombet J.M. Masquelet technique including a multi-perforated non-vascularized fibula graft for the reconstruction of massive post-traumatic bone defects in military practice. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2025. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39891669/>.

23. Shastov A.L., Kolchin S.N., Malkova T.A. Effectiveness of the induced membrane technique in aseptic and infected long-bone defect management: Are there any differences? *World J Orthop*. 2025;16(7):107337. <https://doi.org/10.5312/wjo.v16.i7.107337>.

24. Fischer C., Langwald S., Klauke F., Kobbe P., Mendel T., Hückstädt M. Introducing the Pearl-String Technique: A New Concept in the Treatment of Large Bone Defects. *Life (Basel)*. 2025;15(3):414. <https://doi.org/10.3390/life15030414>.

Отримано/Received 05.01.2026

Рецензовано/Revised 12.02.2026

Прийнято до друку/Accepted 01.07.2026

Information about authors

Davyd Borodiuk, doctor of the Center of Orthopedics, Traumatology and Sports Medicine, Feofaniya Clinical Hospital, Department of Orthopedics and Traumatology, Shupyk National Healthcare University of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: davidborodyuk@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0000-2108-9970>

Ihor Zazirnyi, MD, DSc, PhD, Head of the Center of Orthopedics, Traumatology and Sport Medicine, Feofaniya Clinical Hospital, Kyiv, Ukraine; e-mail: zazirnyi@ukr.net; phone: +380 (67) 756-32-47; Professor, Department of Orthopedics and Traumatology, Shupyk National Healthcare University of Ukraine, Kyiv, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0001-7890-1499>

Mykola Ankin, MD, professor, head of the Department of Orthopedics and Traumatology, Shupyk National Healthcare University of Ukraine, Kyiv, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0001-9795-0931>
Victoria Ladyka, PhD in Medicine, Associate Professor, Department of Orthopedics and Traumatology, Shupyk National Healthcare University of Ukraine, Kyiv, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-3796-428X>

Conflicts of interests. The authors declare no conflict of interest and no personal financial interest in the preparation of this article.

Information about funding. The study was performed within the research plan of the Department of Orthopedics and Traumatology, Shupyk National University of Health of Ukraine. No separate grant or additional funding was received for this study.

Authors' contributions. D.V. Borodiuk — study concept and design, literature search and analysis, manuscript writing; I.M. Zazirnyi — scientific and methodological supervision, critical revision of content; M.L. Ankin — study concept, final approval of the manuscript version for publication; V.O. Ladyka — data analysis and systematization, text editing.

D.V. Borodiuk^{1,2}, I.M. Zazirnyi^{1,2}, M.L. Ankin¹, V.O. Ladyka¹

¹Shupyk National Healthcare University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Center of Orthopedics, Traumatology and Sport Medicine, Feofaniya Clinical Hospital, Kyiv, Ukraine

Surgical treatment of gunshot femoral fractures: the role of inflammation markers

Abstract. Background. Gunshot femoral fractures represent one of the most challenging conditions in military and civilian traumatology due to high-energy mechanism, extensive bone and soft-tissue destruction, significant wound-tract contamination and impaired tissue vascularization. These injuries account for 15–22 % of combat-related limb trauma with a rising proportion of high-energy injury with comminuted fractures and critical defects. The complexity

of treatment is determined by the need to balance the radicality of the initial surgical treatment and the preservation of viable tissues for subsequent reconstruction. The purpose was to systematically review contemporary surgical strategies for the management of gunshot femoral fractures and to summarize available evidence on the role of systemic inflammatory response markers, namely procalcitonin (PCT), interleukin-6 (IL-6) and C-reactive protein (CRP), in gui-

ding surgical decision-making and risk stratification. **Materials and methods.** A systematic review was performed following the PRISMA 2020 statement. We searched PubMed, Scopus, Web of Science and Cochrane Library for publications from 2018 to 2025 using Boolean combinations of “gunshot fractures”, “femoral fractures”, “damage control orthopedics”, “external fixation”, “intramedullary nailing”, “interleukin-6”, “C-reactive protein”, and “procalcitonin”. Eligible publications included original cohort and retrospective studies, systematic reviews, meta-analyses and clinical guidelines addressing surgical treatment for gunshot or open femoral fracture or biomarker dynamics in severe trauma. Methodological quality was evaluated using the ROBINS-I and MINORS tools. A qualitative narrative synthesis was performed without meta-analysis. **Results.** Twenty-four publications were included in the final analysis. We systematized the indications and limitations of the main methods for primary stabilization such as external fixation, intramedullary nailing and plate osteosynthesis. External fixation remains the method of choice in cases of multiple trauma, unstable hemodynamics, massive soft tissue injury,

and the need for vascular reconstruction. The damage control concept in orthopedics presumes initial minimally invasive stabilization followed by conversion to definitive osteosynthesis once the systemic inflammatory response subsides. The reported dynamics of PCT, IL-6 and CRP are based on a summary of the included primary sources and reflect approximate clinical ranges proposed by the authors of individual studies as auxiliary markers for decision-making rather than formally validated diagnostic thresholds at the meta-analysis level.

Conclusions. The findings support the feasibility of an individualized approach to surgical treatment for gunshot femoral fracture based on fracture pattern, soft tissue condition and the dynamics of systemic inflammation markers. Integration of contemporary surgical strategies with PCT, IL-6 and CRP monitoring may serve as an adjunctive tool for clinical judgement regarding the timing of conversion and infection risk; however, final formal validation of the proposed ranges requires prospective comparative studies with quantitative synthesis.

Keywords: gunshot fractures; femur; systemic inflammation markers; damage control orthopedics; review

Махник В.В., Жаріков С.О., Кліманський Р.П., Собченко Д.А.
Донецький національний медичний університет, м. Лиман, Україна

Діагностика закритої травми живота при політравмі: порівняння методів

Резюме. Актуальність. Закрита травма живота у пацієнтів із політравмою залишається складною діагностичною проблемою. Її складність зумовлена гемодинамічною нестабільністю, пригніченням свідомості та поєднаними ушкодженнями. Додатковий ризик пов'язаний із відтермінованим розпізнаванням кишково-мезентеріальних ушкоджень. **Мета** — порівняти діагностичну ефективність клінічного огляду, первинного фокусованого ультразвукового дослідження при травмі (Focused Assessment with Sonography for Trauma — FAST), серійного FAST, контрастної мультidetекторної комп'ютерної томографії (КТ) та комбінованого алгоритму у виявленні клінічно значущої закритої травми живота у дорослих пацієнтів із політравмою. **Матеріали та методи.** Проведено ретроспективне діагностичне дослідження, до якого включено 184 пацієнти віком 18–79 років з Injury Severity Score ≥ 16 і тупим механізмом травми. Референтним стандартом вважали інтраопераційну верифікацію або узгоджений клініко-радіологічний діагноз після 72-годинного спостереження, повторної КТ, ангіографічного втручання або хірургічного лікування. Розраховано чутливість, специфічність, прогностичні значення, точність і 95% довірчі інтервали; предиктори відтермінованого діагнозу оцінено за допомогою багатофакторної логістичної регресії. **Результати.** Клінічно значущу внутрішньочеревну травму встановлено у 72 із 184 пацієнтів (39,1 %). Терапевтично значущі ушкодження виявлено у 38 пацієнтів (20,7 %). Первинне FAST мало чутливість 69,4 % і специфічність 91,1 %. Серійне FAST мало чутливість 80,6 % і специфічність 89,3 %. Контрастна КТ мала чутливість 94,4 % і специфічність 95,5 %. Комбінований алгоритм мав чутливість 97,2 % і специфічність 92,9 %. Рання контрастна КТ/тотальна КТ скорочувала медіану часу до остаточного діагнозу з 88 до 49 хв ($p < 0,001$). Частота пропущених або відтерміновано діагностованих ушкоджень зменшилася з 10,5 до 2,0 % ($p = 0,018$). Негативний первинний результат FAST на тлі лактату $> 2,5$ ммоль/л був незалежним предиктором діагностичної затримки (OR = 3,90; 95% ДІ 1,44–10,56; $p = 0,008$). **Висновки.** FAST є інформативним методом первинного сортування. Метод не може використовуватися як самостійний інструмент виключення закритої травми живота. Найвища діагностична ефективність досягається при ранньому застосуванні контрастної КТ у стабільних або стабілізованих пацієнтів. Додаткову цінність має комбінований алгоритм, який поєднує клінічні, лабораторні й ультразвукові ознаки. Перспективним напрямом є проспективна валідація алгоритму в багаторанових травматологічних вибірках. Окремого вивчення потребує група пацієнтів з негативним FAST і лабораторними маркерами гіперперфузії.

Ключові слова: політравма; закрита травма живота; FAST; комп'ютерна томографія; діагностична точність; внутрішньочеревна травма

Вступ

У глобальному масштабі травма залишається значною проблемою громадського здоров'я та спричиняє близько 4,4 млн смертей щороку. Дорожньо-транспортні травми становлять приблизно 1,19 млн смертей на рік і залишаються однією з провідних причин смерті серед дітей та молодих дорослих. За даними сучасних епідеміологічних досліджень, абдомінальна

травма виявляється у клінічно значущої частки госпіталізованих пацієнтів із травмою та асоціюється зі значною летальністю [1–3].

Закрита травма живота є однією з клінічно значущих причин летальності, яким можна запобігти, у пацієнтів з високоенергетичною травмою. У структурі політравми діагностичний ризик формується поєднанням внутрішньочеревного ушкодження, шоку та конкуруючих

травм [1–3]. Черепно-мозкова, торакальна, тазова та скелетна травми можуть змінювати клінічну картину. За таких умов помилка полягає не тільки у пропуску травми живота. Вона також пов'язана з неправильним визначенням клінічної ваги ушкодження.

Сучасна діагностика абдомінальної травми при політравмі базується на поєднанні bedside-оцінки, фокусованого ультразвукового дослідження при травмі (Focused Assessment with Sonography for Trauma — FAST) або його розширеного варіанта (extended Focused Assessment with Sonography for Trauma, eFAST), визначення лабораторних маркерів гіперперфузії та ранньої контрастної комп'ютерної томографії (КТ) [2, 7, 10]. FAST має найбільшу практичну цінність на етапі первинного сортування. Метод дозволяє швидко виявити вільну рідину в черевній порожнині, перикардальний випіт або плевральні ускладнення [7, 8].

Обмеження FAST пов'язані з тим, що метод переважно виявляє наслідок ушкодження. Він фіксує вільну рідину, але не завжди визначає органне або кишково-мезентеріальне ураження. Негативний результат не виключає паренхіматозної травми без масивного гемоперитонеуму або ретроперитонеальної кровотечі [5, 6]. Також він не виключає ушкодження порожнистих органів у ранні години після травми [8, 9]. Серійне повторення FAST підвищує чутливість. Проте воно не усуває потреби у КТ за наявності маркерів високого ризику [8–10].

Контрастна мультidetекторна КТ стала ключовим методом оцінки стабільних і стабілізованих пацієнтів з підозрою на абдомінальну травму. Її діагностична цінність полягає у визначенні органної локалізації, ступеня ушкодження та ознак активної кровотечі [5, 11, 15]. КТ також дозволяє виявити ретроперитонеальну кровотечу, судинні ускладнення та вірогідні кишково-мезентеріальні ознаки травми, які впливають на вибір між неоперативним веденням, ангіоемболізацією та хірургічним втручанням [14–16].

Для пацієнтів із політравмою окреме значення має тотальна КТ (whole-body computed tomography, WBCT). Вона дає можливість синхронно оцінити голову, шию, грудну клітку, живіт, таз і хребет [2, 3, 11]. Водночас некорисне застосування WBCT підвищує променеве навантаження та збільшує витрати. Надмірне сканування може перевантажувати діагностичний маршрут у пацієнтів без клінічних критеріїв тяжкості [12, 13].

Найбільш проблемною групою залишаються кишково-мезентеріальні ушкодження. Вони трапляються рідше, ніж травми печінки або селезінки. Проте саме ці ушкодження частіше пропускаються під час первинної оцінки [5, 6, 16]. Причиною є неспецифічність КТ-ознак і слабка клінічна маніфестація в перші години після травми. Міжпетльова рідина, брижова гематома або локальне потовщення кишкової стінки потребують активного нагляду [14–16]. За клінічної динаміки доцільними є повторний огляд і повторна КТ [17, 18].

Невирішенням залишається питання оптимального маршруту для пацієнтів з негативним первинним результатом FAST. Особливий ризик мають пацієнти з

лактатемією, пригніченням свідомості, seat-belt sign або високими балами за Injury Severity Score (ISS). У таких випадках діагностичне рішення не повинно залежати від одного тесту. Воно має ґрунтуватися на інтеграції клінічних, лабораторних і візуалізаційних показників [4, 17, 19].

Метою дослідження було порівняння діагностичної ефективності клінічного огляду, первинного та серійного FAST, контрастної мультidetекторної КТ та комбінованого алгоритму у виявленні клінічно значущої закритої травми живота у дорослих пацієнтів із політравмою. Завдання дослідження: 1) оцінити чутливість, специфічність і прогностичні значення клінічного огляду, первинного та серійного FAST, контрастної КТ та комбінованого алгоритму; 2) порівняти часові показники двох первинних діагностичних маршрутів; 3) визначити предиктори пропущених або відтерміновано діагностованих ушкоджень; 4) сформулювати практичні умови, за яких негативне первинне FAST не завершує діагностичний пошук.

Матеріали та методи

Дизайн дослідження. Проведено одноцентрове ретроспективне діагностичне дослідження. Джерелами даних були електронна медична документація, протоколи FAST/eFAST, результати контрастної КТ, операційні протоколи, записи ангіографічних втручань і дані 72-годинного клінічного спостереження. Період спостереження охоплював січень 2022 року — грудень 2025 року. Дослідження виконували поетапно. На першому етапі ідентифікували пацієнтів у травматологічному реєстрі. На другому етапі перевіряли критерії включення та виключення. На третьому етапі зіставляли результати клінічного огляду, FAST/eFAST і КТ з референтним стандартом. На четвертому етапі виконували статистичний аналіз і клінічну інтерпретацію результатів. STARD 2015 є міжнародним стандартом звітності для досліджень діагностичної точності. Він потребує чіткого опису вибірки, індекс-тестів, референтного стандарту, відсутніх даних і способів статистичного аналізу [19].

Критерії включення та виключення. До аналізу включено 184 дорослих пацієнти віком 18–79 років. Усі пацієнти мали тупий механізм травми, бал за ISS ≥ 16 , підозру на закрити травму живота та мінімальний діагностичний набір. До нього входили первинний клінічний огляд, FAST/eFAST, контрастна КТ або чіткий референтний стандарт. Пацієнтів відбирали з травматологічного реєстру Комунального некомерційного підприємства «Центральна міська лікарня» Гайворонської міської ради. Цю установу обрано як клінічну базу дослідження, оскільки вона забезпечує цілодобове надання допомоги пацієнтам із політравмою, має доступ до КТ, ургентної хірургії та інтервенційної радіології. Первинну оцінку стану пацієнтів виконувала чергова травматологічна команда. До неї входили лікар екстреної медицини, хірург, анестезіолог та радіолог. Розмір вибірки визначався суцільним включенням усіх пацієнтів, які відповідали критеріям,

протягом 2022–2025 років. Вибірка вважалася достатньою для порівняння діагностичних методів, оскільки вона містила 72 підтверджені випадки клінічно значущої травми. Це забезпечувало понад 10 подій на одну змінну для багатофакторної логістичної моделі. Критеріями виключення були проникна травма, ізольоване абдомінальне ушкодження без політравми, відсутність контрольного спостереження, переведення до іншої установи до завершення діагностичного циклу, вагітність, недостатня якість зображень або неповний набір первинної документації.

Діагностичні методи. Клінічний огляд включав оцінку гемодинаміки, абдомінального болю, захисного напруження м'язів, здуття живота, симптомів подразнення очеревини, абдомінальної гематоми та seat-belt sign. FAST/eFAST виконували у стандартних позиціях: правий верхній квадрант, лівий верхній квадрант, таз, субксіфоїдальна позиція, плевральні простори. Серійне FAST повторювали через 60–180 хв або раніше при погіршенні гемодинаміки.

Протокол КТ. Контрастну КТ органів грудної клітки, живота і таза виконували на мультidetекторному сканері з внутрішньовенним контрастуванням. У гемодинамічно стабільних або стабілізованих пацієнтів застосовували артеріальну та портально-венозну фази, за потреби — відтерміновану фазу для оцінки сечовидільної системи або активної екстравазації. WBCT визначали як первинну КТ-оцінку голови, шиї, грудної клітки, живота, таза і хребта в межах одного діагностичного маршруту.

Референтний стандарт. Клінічно значущою внутрішньочеревною травмою вважали підтверджене ушкодження паренхіматозного органа, порожнистого органа, брижі, великої судини, ретроперитонеального простору або діафрагми. Верифікацію проводили інтраопераційно, ангіографічно, за повторною КТ або клініко-радіологічним консенсусом після 72 год спостереження. Терапевтично значущими вважали ушкодження, що потребували лапаротомії, лапароскопії, ангіоемболізації, трансфузійної підтримки або інтенсивного моніторингу через ризик прогресування.

Статистичний аналіз. Описову статистику подавали як середнє $\pm$ стандартне відхилення або медіану з міжквартильним інтервалом. Вибір способу подання залежав від характеру розподілу. Категоріальні змінні наведено як n (%). Для міжгрупових порівнянь використовували χ^2 або точний критерій Фішера, t -критерій Стюдента або критерій Манна — Уїтні. Діагностичну ефективність оцінювали за чутливістю, специфічністю, PPV, NPV, точністю, AUC та 95% довірчими інтервалами (ДІ) Вілсона. PPV означає позитивне прогностичне значення, NPV — негативне прогностичне значення. AUC означає площу під ROC-кривою та відображає інтегральну здатність тесту розрізняти пацієнтів з ушкодженням і без нього. OR означає odds ratio, тобто відношення шансів. Парні відмінності між діагностичними методами оцінювали за критерієм Макнемара. Для порівняння AUC використовували метод Делонга. Предиктори відтермінованого встановлення

діагнозу визначали за допомогою багатофакторної логістичної регресії. Статистично значущими вважали відмінності при $p < 0,05$. Статистичний аналіз проводили з використанням програм IBM SPSS Statistics 29.0 та MedCalc Statistical Software 22.0.

Етичні аспекти. Дослідження мало ретроспективний характер та ґрунтувалося на аналізі даних травматологічного реєстру за 2022–2025 роки. До дослідження включалися лише знеособлені медичні та радіологічні дані пацієнтів. Під час проведення аналізу забезпечувалися конфіденційність та захист персональних даних. У рукописі не наведено інформації, що дає змогу безпосередньо ідентифікувати окремих пацієнтів. Дослідження проводилося з дотриманням загальновищаних принципів біоетики, поваги до приватності та конфіденційності пацієнтів.

Результати

З 247 пацієнтів, первинно ідентифікованих у травматологічному реєстрі, критеріям включення відповідали 184. До аналізу не включали осіб з неповним діагностичним маршрутом або недостатньою якістю візуалізації. Послідовність формування вибірки наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Схема формування вибірки дослідження

Етап формування вибірки	n
Первинно ідентифіковано у травматологічному реєстрі	247
Виключено за критеріями невідповідності або неповного маршруту	63
Включено до фінального аналізу	184
Без клінічно значущої внутрішньочеревної травми	112
З клінічно значущою внутрішньочеревною травмою	72

Базові клінічні характеристики подано в табл. 2. Для подальшої інтерпретації були ключовими ISS, GCS, систолічний артеріальний тиск, лактат і абдомінальні ознаки. Саме ці показники могли впливати на інформативність клінічного огляду та потребу в ранній КТ. Аналіз даних таблиці дозволяє виділити клінічно значущі відмінності між групами.

Пацієнти з клінічно значущою абдомінальною травмою мали вищу травматичну тяжкість. Вони частіше надходили з гіпотензією, лактатемією та абдомінальними ознаками ушкодження. Водночас стать і наявність перелому таза не показали статистично значущої відмінності між групами. Після первинного поділу на групи за наявністю клінічно значущої травми додатково аналізували структуру внутрішньочеревних ушкоджень. Структуру ушкоджень і провідну лікувальну тактику наведено в табл. 3.

У табл. 3 подано розподіл за типами травми, оскільки частина пацієнтів мала комбіновані ушкодження. Переважали ушкодження селезінки та печінки. Кишково-мезентеріальна травма була окремою клінічно

Таблиця 2. Клініко-демографічна характеристика пацієнтів

Показник	Усі пацієнти, n = 184	Без значущої травми, n = 112	Значуща травма, n = 72	p
Вік, роки, Me [IQR]	38 [27–54]	36 [26–51]	42 [29–58]	0,041
Чоловіки, n (%)	129 (70,1)	76 (67,9)	53 (73,6)	0,403
ISS, бали, Me [IQR]	27 [21–34]	24 [19–30]	31 [25–39]	< 0,001
GCS ≤ 12 балів, n (%)	62 (33,7)	31 (27,7)	31 (43,1)	0,030
CAT < 90 мм рт.ст., n (%)	39 (21,2)	16 (14,3)	23 (31,9)	0,004
Лактат > 2,5 ммоль/л, n (%)	83 (45,1)	40 (35,7)	43 (59,7)	0,001
Абдомінальний біль/захист, n (%)	91 (49,5)	46 (41,1)	45 (62,5)	0,005
Seat-belt sign/гематома, n (%)	34 (18,5)	12 (10,7)	22 (30,6)	0,001
Перелом таза, n (%)	47 (25,5)	25 (22,3)	22 (30,6)	0,210

Примітки: GCS — Glasgow Coma Scale; IQR — міжквартильний інтервал; ISS — Injury Severity Score; CAT — систолічний артеріальний тиск; для кількісних змінних використано критерій Манна — Уїтні; для категоріальних — χ^2 або точний критерій Фішера.

Таблиця 3. Структура внутрішньочеревних ушкоджень і провідна тактика лікування

Тип ушкодження	n	Частка серед 72 пацієнтів, %	Провідна тактика
Селезінка	24	33,3	NOM — 16; емболізація — 5; спленектомія — 3
Печінка	21	29,2	NOM — 14; емболізація — 4; операція — 3
Кишка/брижа	16	22,2	Лапаротомія — 13; лапароскопія — 2; спостереження — 1
Нирка/ретроперитонеум	9	12,5	NOM — 6; урологічне втручання — 2; емболізація — 1
Діафрагма	3	4,2	Оперативне відновлення — 3
Великі судини/активна екстра-вазація	11	15,3	Емболізація — 8; лапаротомія — 3

Примітки: NOM — non-operative management; частина пацієнтів мала комбіновані ушкодження, тому сума категорій перевищує 72.

Таблиця 4. Діагностична ефективність методів у виявленні клінічно значущої внутрішньочеревної травми, % (95% ДІ)

Метод	Чутливість	Специфічність	PPV	NPV	Точність
Клінічний огляд	62,5 (51,0–72,8)	76,8 (68,2–83,6)	63,4 (51,8–73,6)	76,1 (67,5–83,0)	71,2 (64,3–77,3)
Первинне FAST	69,4 (58,0–78,9)	91,1 (84,3–95,1)	83,3 (72,0–90,7)	82,3 (74,6–88,0)	82,6 (76,5–87,4)
Серійне FAST	80,6 (70,0–88,0)	89,3 (82,2–93,8)	82,9 (72,4–89,9)	87,7 (80,4–92,5)	85,9 (80,1–90,2)
Контрастна КТ	94,4 (86,6–97,8)	95,5 (90,0–98,1)	93,2 (84,9–97,0)	96,4 (91,1–98,6)	95,1 (91,0–97,4)
Комбінований алгоритм	97,2 (90,4–99,2)	92,9 (86,5–96,3)	89,7 (81,0–94,7)	98,1 (93,4–99,5)	94,6 (90,3–97,0)

Примітки: ДІ — довірчий інтервал; NPV — негативне прогностичне значення; PPV — позитивне прогностичне значення; довірчі інтервали розраховано за методом Вілсона.

Таблиця 5. Статистичне порівняння діагностичної ефективності методів

Порівняння	Критерій	Ключова відмінність	P
Серійне FAST vs первинне FAST	Макнемара	Вища чутливість: 80,6 проти 69,4 %	0,041
Контрастна КТ vs первинне FAST	Макнемара	Вища чутливість: 94,4 проти 69,4 %	< 0,001
Комбінований алгоритм vs первинне FAST	Макнемара	Вища чутливість: 97,2 проти 69,4 %	< 0,001
Контрастна КТ vs комбінований алгоритм	Делонга/AUC	Суттєвої різниці AUC не встановлено	0,782

Примітки: критерій Макнемара застосовано для парних порівнянь часток правильного виявлення ушкоджень; метод Делонга використано для порівняння AUC.

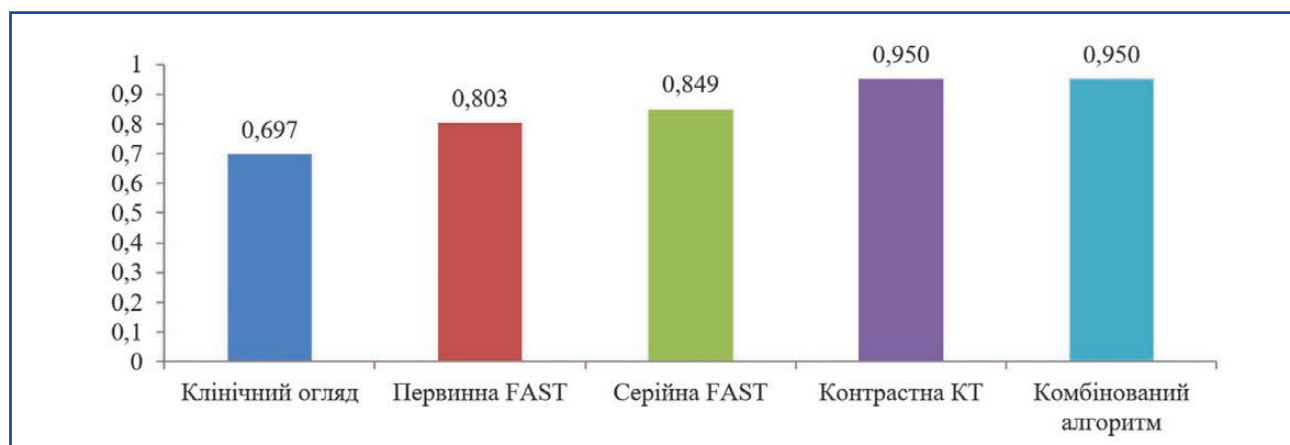


Рисунок 1. Порівняння AUC діагностичних методів

важливою групою через високу частку оперативних втручань. Порівняння діагностичних методів наведено в табл. 4. У ній подано основні клінічно інтерпретовані показники за тестами.

Первинне FAST мало прийнятну специфічність, але недостатню чутливість для безпечного виключення абдомінального ушкодження. Серійне FAST підвищувало чутливість порівняно з первинним FAST. Контрастна КТ і комбінований алгоритм забезпечували найвищу діагностичну надійність. Для перевірки статистичної значущості цих відмінностей виконано парні порівняння діагностичних підходів. Статистичне порівняння між методами подано окремо в табл. 5 і на рис. 1.

AUC відображає ймовірність того, що метод правильно відрізняє пацієнта з ушкодженням від пацієнта без ушкодження. Найбільші значення AUC мали контрастна КТ і комбінований алгоритм. Це свідчить про їхню найвищу інтегральну здатність до класифікації пацієнтів. Комбінований алгоритм включав клінічний огляд, лактат, первинне FAST, серійне FAST і ранню КТ/WBCT у пацієнтів високого ризику. Часові показники та основні клінічні наслідки залежно від первинного діагностичного маршруту наведено в табл. 6. Рання контрастна КТ/WBCT була пов'язана зі скороченням часу до остаточного діагнозу та часу до лапаротомії серед оперованих пацієнтів.

Відмінності за трансфузійною потребою, ICU LOS і 30-денною летальністю не досягали статистичної значущості. Ймовірно, ці показники залежали не лише від діагностичного маршруту, на них також впливали тяжкість позаабдомінальних ушкоджень, обсяг крововтрати та початковий фізіологічний резерв пацієнта.

Частоту пропущених або відтерміновано діагностованих ушкоджень за маршрутом візуалізовано в табл. 7. Цей показник безпосередньо відображає ризик недодіагностики. Він є більш чутливим для оцінки безпеки маршруту, ніж загальна летальність. Летальність у політраумі часто залежить від множинних позаабдомінальних чинників.

Найчастіше відтерміновано розпізнавалися кишково-мезентеріальні ушкодження без масивного гемо-

перитонеуму та ретроперитонеальні крововиливи. Це підтверджує обмеження маршруту, який завершується негативним первинним FAST. Такий маршрут є недостатнім, якщо не враховуються лактат, seat-belt sign, GCS і механізм травми. Саме ці показники були включені до подальшого регресійного аналізу.

Для визначення незалежних чинників діагностичної затримки проведено багатофакторний логістичний регресійний аналіз (табл. 8). У тексті інтерпретовано напрям, статистичну значущість і клінічну вагу виявлених асоціацій.

Негативний первинний результат FAST у поєднанні з лактатемією, seat-belt sign і пригніченням свідомості асоціювався з вищою ймовірністю відтермінованого встановлення діагнозу. Рання контрастна КТ/WBCT мала захисну асоціацію. Це підтримує її використання у пацієнтів високого ризику. Узагальнено результати показують, що негативне первинне FAST є безпечним лише в низькоризиковому клінічному контексті. За наявності лактатемії, пригнічення свідомості або seat-belt sign потрібне продовження діагностичного маршруту.

Обговорення

Отримані результати демонструють клінічно обґрунтовану ієрархію діагностичних методів. FAST мало високу специфічність, але недостатню чутливість для самостійного виключення внутрішньочеревної травми. Це узгоджується з оглядом Bella та співавт., у якому eFAST розглядається як метод швидкого сортування, а не повна заміна КТ [7]. Подібну тенденцію показали Daniel та Kakran, які підкреслювали користь повторного ультразвукового контролю [8, 9]. Поточні результати доповнюють ці дані тим, що прямо зіставляють первинне FAST, серійне FAST, КТ і комбінований маршрут. Клінічне значення такого порівняння посилюється високим тягарем травматизму та політрауми в різних системах охорони здоров'я [31, 32]. Подібні дані отримано і в регіональних дослідженнях травматичних абдомінальних ушкоджень [33–35].

Діагностична перевага КТ була найбільш помітною у пацієнтів із множинними ушкодженнями. У таких

пацієнтів фізикальний огляд має обмежену надійність. Черепно-мозкова травма, інтубація та аналгоседація зменшують інформативність абдомінальних симптомів. Цей висновок відповідає даним Fabig та співавт., які показали значення ранніх предикторів клінічно релевантної абдомінальної травми [4]. На відміну від цієї роботи, дане дослідження додатково оцінює вплив ранньої КТ на частоту відтермінованого діагнозу. Значення КТ також підтверджують дані про її здатність виявляти ушкодження, які потребують оперативного або інтервенційного лікування [25, 26]. Окремі роботи підкреслюють, що діагностична ефективність КТ зростає при поєднанні з клінічним маршрутом і повторною оцінкою пацієнта [27].

FAST залишається практично незамінним при нестабільній гемодинаміці. Позитивне виявлення вільної рідини у нестабільного пацієнта скорочує шлях до контролю кровотечі [1, 7]. Водночас отримані дані підтверджують, що негативний результат FAST не ви-

ключає травму живота. Це особливо стосується ретроперитонеальної кровотечі та ушкоджень порожнистих органів [5, 6]. Тому результати FAST потрібно інтерпретувати разом з лактатом, GCS і механізмом травми. Такий підхід відповідає сучасним спробам поєднати ультразвукові, клінічні та радіологічні критерії в єдиний діагностичний маршрут [22, 27].

Окреме клінічне значення мають кишково-мезентеріальні ушкодження. У досліджуваній вибірці вони були однією з основних причин діагностичної затримки. Kaewlaі та співавт. також підкреслювали, що ця група ушкоджень часто має лише непрямі КТ-ознаки [5]. WSES guidelines вказують, що soft signs потребують динамічного клінічного та радіологічного контролю [6]. Поточні дані узгоджуються з цими рекомендаціями. Вони показують, що затримка частіше виникала саме за відсутності масивного гемоперитонеуму. Подібні труднощі описані в роботах, присвячених Bowel Injury Prediction Score та КТ-ознакам ішемічного

Таблиця 6. Часові та клінічні показники залежно від первинного діагностичного маршруту

Показник	Клініко-FAST + селективна КТ, n = 86	Рання контрастна КТ/WBCT, n = 98	p
Час до остаточного діагнозу, хв, Me [IQR]	88 [64–130]	49 [35–72]	< 0,001
Час до лапаротомії серед оперованих, хв, Me [IQR]	158 [124–211]	102 [82–149]	0,012
Негативна лапаротомія, n/операцій (%)	5/20 (25,0)	1/21 (4,8)	0,084
Трансфузія $\geq$ 4 доз еритроцитів, n (%)	19 (22,1)	17 (17,3)	0,414
ICU LOS, доби, Me [IQR]	5 [3–9]	4 [2–8]	0,094
30-денна летальність, n (%)	17 (19,8)	15 (15,3)	0,427

Примітки: ICU LOS — тривалість перебування у відділенні інтенсивної терапії; IQR — міжквартильний інтервал; для кількісних показників використано критерій Манна —Уїтні; для категоріальних — χ^2 або точний критерій Фішера.

Таблиця 7. Частка пропущених або відтерміновано діагностованих ушкоджень залежно від первинного діагностичного маршруту

Первинний діагностичний маршрут	Пропущені/відтерміновані ушкодження
Клінічне FAST + селективна КТ	9/86 (10,5 %)
Рання контрастна КТ/WBCT	2/98 (2,0 %)

Таблиця 8. Багатофакторний логістичний регресійний аналіз предикторів відтермінованого діагнозу

Фактор	OR	95% ДІ	p
Негативне первинне FAST + лактат > 2,5 ммоль/л	3,90	1,44–10,56	0,008
Seat-belt sign/гематома живота	3,12	1,10–8,84	0,033
GCS $\leq$ 12 балів або аналгоседація	2,83	1,01–7,94	0,047
ISS $\geq$ 30 балів	2,21	0,86–5,69	0,101
Рання контрастна КТ/WBCT $\leq$ 60 хв	0,24	0,08–0,71	0,010

Примітки: ДІ — довірчий інтервал; OR — odds ratio; модель включала клінічні, лабораторні та візуалізаційні змінні, доступні під час раннього діагностичного маршруту.

ушкодження кишки [22, 23]. Додаткову цінність мають дослідження, у яких оцінювали прогностичні шкали та досвід радіолога при малих кишково-мезентеріальних ушкодженнях [33, 34]. Це підтверджує потребу у поєднанні КТ-ознак, клінічної динаміки та повторного огляду [35].

У цьому дослідженні наявність seat-belt sign асоціювалася з підвищеною настороженістю щодо можливої прихованої кишково-мезентеріальної травми. Водночас Delaplain та співавт. показали, що негативний результат якісно виконаної контрастної КТ знижує ймовірність ушкодження порожнистих органів (hollow viscus injury) у таких пацієнтів [17]. Водночас цей висновок не скасовує потреби у клінічному нагляді за наявності лабораторної або симптомної динаміки. Дані Papan та співавт. також свідчать, що ознаки ушкодження черевної стінки на КТ можуть бути пов'язані з внутрішньочеревною травмою [24]. Тому seat-belt sign доцільно розглядати як маркер підвищеної настороженості, а не як ізольований діагностичний критерій.

Рання контрастна КТ/WBCT у цьому дослідженні асоціювалася зі скороченням часу до остаточного діагнозу. Вона також зменшувала частоту пропущених або відтермінованих ушкоджень. Цей результат відповідає метааналізу Fathi та співавт., який підтвердив діагностичну цінність WBCT при травмі [2]. Він також узгоджується з роботою Yamamoto та співавт., у якій рання КТ була пов'язана з кращою організацією допомоги тяжко травмованим пацієнтам [3]. Водночас дані Naccache та Alahmad свідчать, що WBCT потребує селективного застосування [12, 13]. Це підтверджується і дослідженням Hanzalova та співавт., у якому аналізували використання WBCT у тяжко травмованих пацієнтів із циркуляторним шоком [30]. Тому поточні методи не передбачають універсального сканування всіх пацієнтів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у підтвердженні потреби в комбінованому алгоритмі. Для нестабільного пацієнта позитивний результат FAST має спрямовувати команду до ургентного контролю кровотечі. Для стабільного або стабілізованого пацієнта з ISS ≥ 16 балів, лактатом $> 2,5$ ммоль/л, GCS ≤ 12 балів або seat-belt sign рання КТ є обґрунтованою. Це стосується навіть ситуацій з негативним первинним результатом FAST. Для пацієнтів із негативною КТ, але збереженим абдомінальним боєм або soft signs потрібні повторний огляд і лабораторний контроль. Повторна КТ має виконуватися за клінічною динамікою, а не як рутинне обстеження для всіх пацієнтів [20, 21, 29]. Такий підхід також узгоджується з даними про роль повторної візуалізації та прогностичних шкал при підозрі на кишково-мезентеріальні ушкодження [22, 34].

Обмеження дослідження пов'язані з ретроспективним дизайном. Такий дизайн не дозволяє повністю усунути ризик селекційного зміщення. Він також зберігає залежність діагностичного маршруту від клінічного стану пацієнта. Одноцентровий характер дослідження може обмежувати зовнішню валідність результатів

для закладів із іншою доступністю КТ, інтервенційної радіології та іншою організацією роботи мультидисциплінарної травматологічної команди. Додатковим обмеженням є потенційна неоднорідність виконання FAST та інтерпретації КТ. Це особливо важливо для пацієнтів із поєднаною торакальною, тазовою або черепно-мозковою травмою [25, 30]. Для зменшення такого впливу в майбутніх дослідженнях доцільно стандартизувати інтерпретацію КТ-ознак і використовувати валідовані прогностичні шкали [33, 34].

Подальші дослідження мають бути проспективними й багатоконтрольними. Вони повинні включати попередній розрахунок розміру вибірки та засліплену оцінку візуалізаційних даних. Під зовнішньою валідацією комбінованого алгоритму слід розуміти його перевірку в інших травматологічних центрах. У таких центрах мають відрізнятися потік пацієнтів, доступність КТ, досвід проведення FAST і наявність інтервенційної радіології. Це дозволить оцінити, чи зберігає алгоритм діагностичну точність поза межами однієї установи. Такий підхід відповідає сучасному напряму досліджень, у яких діагностичні шкали та маршрути перевіряють на незалежних клінічних вибірках [33–35].

Висновки

Діагностика закритої травми живота при політравмі залишається актуальною клінічною проблемою через ризик хибнонегативної первинної оцінки. Особливе значення це має у пацієнтів із пригніченням свідомості, аналгоседацією та поєднаними ушкодженнями. Первинне проведення FAST мало чутливість 69,4 % і специфічність 91,1 %. Це підтверджує його цінність як методу раннього сортування, але не як самостійного інструменту виключення абдомінальної травми. Серійне FAST підвищувало чутливість до 80,6 %, однак поступалося контрастній КТ. Мультидетекторна КТ забезпечила найкраще співвідношення чутливості та специфічності серед окремих методів. Її чутливість становила 94,4 %, специфічність — 95,5 %. Комбінований алгоритм мав найвищу чутливість — 97,2 %, а також найвище негативне прогностичне значення — 98,1 %. Рання контрастна КТ/WBCT скорочувала медіану часу до остаточного діагнозу з 88 до 49 хв ($p < 0,001$). Частота пропущених або відтерміновано діагностованих ушкоджень зменшувалася з 10,5 до 2,0 % ($p = 0,018$). Негативний первинний результат FAST на тлі лактату $> 2,5$ ммоль/л був незалежним предиктором діагностичної затримки (OR = 3,90; 95% ДІ 1,44–10,56; $p = 0,008$).

Отримані результати можуть бути використані у травматологічних центрах для оптимізації маршруту пацієнтів з політравмою. Негативний первинний результат FAST не повинен завершувати діагностичний пошук у пацієнтів із лактатемією, GCS ≤ 12 балів, seat-belt sign або високою енергією травми. У таких випадках доцільним є раннє виконання контрастної КТ або продовження динамічного клініко-лабораторного спостереження. Перспективи подальших досліджень пов'язані з проспективною багатоконтрольною валідацією запропонованого алгоритму. Окремого вивчення

потребує група пацієнтів із негативним результатом FAST, але збереженими клінічними або лабораторними маркерами високого ризику.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів та власної фінансової зацікавленості при підготовці даної статті.

Інформація про фінансування. Дослідження виконано без залучення зовнішнього фінансування.

Внесок авторів. Махник В.В. — концепція та дизайн дослідження, підготовка рукопису, критичне редагування; Жаріков С.О. — збір даних, аналіз результатів візуалізаційних досліджень та клінічна інтерпретація; Кліманський Р.П. — статистичний аналіз, підготовка таблиць і рисунків, редагування рукопису; Собченко Д.А. — збір даних, статистичний аналіз, критичне редагування. Усі автори ознайомилися з остаточною версією рукопису та схвалили її до публікації.

Використання інструментів штучного інтелекту. Інструменти штучного інтелекту використовувалися виключно для мовного редагування, структурної організації тексту та технічної підтримки оформлення рукопису. Автори самостійно перевірили всі клінічні дані, результати статистичного аналізу, бібліографічні посилання, інтерпретацію результатів і висновки та несуть повну відповідальність за зміст поданого рукопису.

Список літератури

- Rossaint R, Afshari A, Bouillon B, Cerny V, Cimpoesu D, Curry N, et al. The European guideline on management of major bleeding and coagulopathy following trauma: sixth edition. *Crit Care*. 2023;27:80. doi: 10.1186/s13054-023-04327-7.
- Fathi M, Mirjafari A, Yaghoobpoor S, Ghanikolahloo M, Sadeghi Z, Bahrami A, et al. Diagnostic utility of whole-body computed tomography/pan-scan in trauma: a systematic review and meta-analysis study. *Emerg Radiol*. 2024;31:251-268. doi: 10.1007/s10140-024-02213-5.
- Yamamoto R, Suzuki M, Funabiki T, Sasaki J. Immediate CT after hospital arrival and decreased in-hospital mortality in severely injured trauma patients. *BJS Open*. 2023;7(1):zrac133. doi: 10.1093/bjsopen/zrac133.
- Fabig S, Weigert N, Migliorini F, Kleff J, Hofmann GO, Schenk P, et al. Predictive parameters for early detection of clinically relevant abdominal trauma in multiple-injury or polytraumatised patients: a retrospective analysis. *Eur J Med Res*. 2024;29:394. doi: 10.1186/s40001-024-01969-3.
- Kaewlai R, Chatpuwaphat J, Maitriwong W, Wongwaisayawan S, Shin CI, Lee CW. Radiologic imaging of traumatic bowel and mesenteric injuries: a comprehensive up-to-date review. *Korean J Radiol*. 2023;24(5):406-423. doi: 10.3348/kjr.2022.0998.
- Smyth L, Bendinelli C, Lee N, Reeds MG, Loh EJ, Amico F, et al. WSES guidelines on blunt and penetrating bowel injury: diagnosis, investigations, and treatment. *World J Emerg Surg*. 2022;17(1):13. doi: 10.1186/s13017-022-00418-y.
- Bella FM, Bonfichi A, Esposito C, Zanza C, Bellou A, Sfondrini D, et al. Extended focused assessment with sonography for trauma in the emergency department: a comprehensive review. *J Clin Med*. 2025;14(10):3457. doi: 10.3390/jcm14103457.
- Kakran A, Singh R, Chaudhary P, Chaudhary AK, Ali MS. Sensitivity and specificity of serial focused assessment with sonography in trauma in patients with blunt abdominal trauma. *Cureus*. 2025;17(9):e92103. doi: 10.7759/cureus.92103.
- Daniel E, Srinivasan C, Selvaraj K. Focused assessment with sonography in trauma as a prognostic tool in blunt abdominal trauma: a prospective observational study. *Cureus*. 2025;17(9):e93071. doi: 10.7759/cureus.93071.
- Rofananda IF, Pratiwi AD, Jaya Putra ES, Budi Azhari SR, Setiawati R. Diagnostic value of focused assessment with sonography in trauma and computed tomography in blunt abdominal trauma: a systematic review and meta-analysis. *Malays J Med Health Sci*. 2025;21(2):205-215. doi: 10.47836/mjmhs.21.2.26.
- Abdel Hamid MA, Abd-erRazik MA, Nagy M, El-Shinawi M, Hirshon JM, El-Setouhy M. Computed tomography benefits and cost in hemodynamically stable patients with blunt abdominal trauma at an Egyptian University Hospital. *Afr J Emerg Med*. 2024;14(2):96-99. doi: 10.1016/j.afjem.2023.11.006.
- Naccache R, Scemama U, El Ahmadi AA, Habert P, Zieleskiewicz L, Chaumoitre K, et al. Can the use of whole-body CT be reduced in cases of kinetic-based polytrauma patients without a clinical severity criterion? A bi-center retrospective study. *Eur J Radiol*. 2024;171:111278. doi: 10.1016/j.ejrad.2023.111278.
- Alahmad H, Hobani A, Alasmi M, Alshahrani AM, Abanomy A, Alarifi M, et al. Investigating the potential overuse of pan-computed tomography examinations in trauma cases in emergency departments. *Medicina (Kaunas)*. 2024;60(11):1742. doi: 10.3390/medicina60111742.
- Bonomi AM, Granieri S, Gupta S, Altomare M, Cioffi SPB, Sammartano F, et al. Traumatic hollow viscus and mesenteric injury: role of CT and potential diagnostic-therapeutic algorithm. *Updates Surg*. 2021;73(2):703-710. doi: 10.1007/s13304-020-00929-w.
- Hsia CC, Wang CY, Huang JF, Hsu CP, Kuo LW, Ouyang CH, et al. Diagnostic accuracy of computed tomography for the prediction of the need for laparotomy for traumatic hollow viscus injury: systematic review and meta-analysis. *J Pers Med*. 2021;11(12):1269. doi: 10.3390/jpm11121269.
- Wong HL, Shi H, Teoh WC, Liu JJ. Bowel and mesenteric injuries in blunt abdominal injury. *Singapore Med J*. 2024;65(6):354-359. doi: 10.4103/singaporemedj.SMJ-2022-023.
- Delaplain PT, Tay-Lasso E, Biffi WL, Schaffer KB, Sundel M, Behdin S, et al. Excluding hollow viscus injury for abdominal seat belt sign using computed tomography. *JAMA Surg*. 2022;157(9):771-778. doi: 10.1001/jamasurg.2022.2770.
- Podda M, De Simone B, Ceresoli M, Augustin G, Gori A, Boermeester MA, et al. Follow-up strategies for patients with splenic trauma managed non-operatively: the 2022 World Society of Emergency Surgery consensus document. *World J Emerg Surg*. 2022;17(1):52. doi: 10.1186/s13017-022-00457-5.
- Bossuyt PM, Reitsma JB, Bruns DE, Gatsonis CA, Glasziou PP, Irwig L, et al. STARD 2015: an updated list of essential items for reporting diagnostic accuracy studies. *BMJ*. 2015;351:h5527. doi: 10.1136/bmj.h5527.
- Tominaga GT, Crandall M, Cribari C, Zarzaur BL, Bernstein M, Kozar RA, et al. Organ injury scaling 2020 up-

date: bowel and mesentery. *J Trauma Acute Care Surg.* 2021;91(3):e73–e77. doi: 10.1097/TA.0000000000003319.

21. Weinberg JA, Peck KA, Ley EJ, Brown CV, Moore EE, Sperry JL, et al. Evaluation and management of bowel and mesenteric injuries after blunt trauma: a Western Trauma Association critical decisions algorithm. *J Trauma Acute Care Surg.* 2021;91(5):903–908. doi: 10.1097/TA.0000000000003327.

22. Wandling M, Cuschieri J, Kozar R, O'Meara L, Celi A, Starr W, et al. Multi-center validation of the Bowel Injury Prediction Score for the early identification of need to operate in blunt bowel and mesenteric injuries. *Injury.* 2022;53(1):122–128. doi: 10.1016/j.injury.2021.07.026.

23. Boscak AR, Bodanapally UK, Elshourbagy T, Shanmuganathan K. Segmental bowel hypoenhancement on CT predicts ischemic mesenteric laceration after blunt trauma. *AJR Am J Roentgenol.* 2021;217(1):93–99. doi: 10.2214/AJR.20.23144.

24. Paran M, Tchernin N, Becker A, Sheffer D, Fucks L, Kessel B. Do signs of abdominal wall injury on computed tomography predict intra-abdominal injury in trauma patients with a seatbelt sign? *Injury.* 2022;53(9):2988–2991. doi: 10.1016/j.injury.2022.06.031.

25. Rinderknecht TN, Salcedo ES, Holcroft JW. Improved computed tomography performance in blunt abdominal trauma — has our care kept pace? *JAMA Surg.* 2022;157(9):778. doi: 10.1001/jamasurg.2022.2775.

26. Zarama V, Torres N, Duque E, Arango-Ibanez JP, Duran K, Azcarate V, et al. Incidence of intra-abdominal injuries in hemodynamically stable blunt trauma patients with a normal computed tomography scan admitted to the emergency department. *BMC Emerg Med.* 2024;24(1):103. doi: 10.1186/s12873-024-01014-w.

27. Chen F, Zhai X, Li S, Chen W, Li H, Wen X. Comparative effectiveness of FAST combined with MRI and CT in wound evaluation of blunt abdominal trauma. *Front Med (Lausanne).* 2026;12:1702765. doi: 10.3389/fmed.2025.1702765.

28. Hwang S, Cho SH, Jung CY, Lim KH, Kim GW. Predictive value of preoperative CT findings for bowel ischemia in patients with blunt mesenteric injury: a retrospective cohort study. *J Clin Med.* 2026;15(4):1330. doi: 10.3390/jcm15041330.

29. Lannes F, Scemama U, Maignan A, Boyer L, Beyer-Berjot L, Berdah SV, et al. Value of early repeated abdominal CT in selective non-operative management for blunt bowel and mesenteric injury. *Eur Radiol.* 2019;29(11):5932–5940. doi: 10.1007/s00330-019-06212-w.

30. Hanzalova I, Bourgeat M, Demartines N, Ageron FX, Zingg T. The use of whole body computed tomography does not lead to increased 24-h mortality in severely injured patients in circulatory shock. *Sci Rep.* 2024;14:2169. doi: 10.1038/s41598-024-52657-5.

31. Halvachizadeh S, Mariani D, Pfeifer R. Impact of trauma on society. *Eur J Trauma Emerg Surg.* 2025;51(1):155. doi: 10.1007/s00068-025-02824-8.

32. Gu D, Ou S, Liu G. Global burden of road injuries and their attributable risk factors from 1990 to 2021: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. *Prev Med Rep.* 2025;53:103051. doi: 10.1016/j.pmedr.2025.103051.

33. Seidu AS, Alhassan AR, Buunaaim ADB, Aslanturk O. Epidemiology of polytrauma at a teaching hospital in Northern Ghana: a cross-sectional study. *Int J Clin Pract.* 2024;2024:4131822. doi: 10.1155/2024/4131822.

34. Yadollahi M, Fazeli H, Ghasemian M, Yousefi MR, Karajizadeh M, Farajpour H. Incidence, pattern and mortality of traumatic abdominal injury, a three-year study at the largest trauma center in Southern Iran: a cross-sectional study. *Health Sci Rep.* 2025;8(6):e70941. doi: 10.1002/hsr.2.70941.

35. World Health Organization. Global status report on road safety 2023. Geneva: World Health Organization; 2023.

Отримано/Received 12.05.2026

Рецензовано/Revised 22.06.2026

Прийнято до друку/Accepted 23.06.2026

Information about authors

Volodymyr Makhnyk, Assistant, Department of Surgical Disciplines, Donetsk National Medical University, Lyman, Ukraine; e-mail: mahnyc.vladim@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7795-9274>
Stanislav Zharikov, PhD, Associate Professor, Head of Department, Donetsk National Medical University, Lyman, Ukraine; e-mail: stanislav.zharikov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6503-1068>
Ruslan Klimanskyi, PhD, Associate Professor, Department of Surgical Disciplines, Donetsk National Medical University, Lyman, Ukraine; e-mail: ruslanmozg@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-9118-7813>
Dmytro Sobchenko, Assistant, Department of Surgical Disciplines, Donetsk National Medical University, Lyman, Ukraine; e-mail: micronfly@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0005-2330-3527>

Conflicts of interests. Authors declare the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

Information about funding. The study was conducted without external funding.

Authors' contribution. V.V. Makhnyk — concept and design of the study, preparation of the manuscript, critical editing; S.O. Zharikov — data collection, analysis of imaging results and clinical interpretation; R.P. Klimanskyi — statistical analysis, preparation of tables and figures, editing the manuscript; D.A. Sobchenko — data collection, statistical analysis, critical editing. All authors reviewed the final version of the manuscript and approved it for publication.

Use of artificial intelligence tools. Artificial intelligence tools were used exclusively for language editing, structural organization of the text and technical support in manuscript formatting. The authors independently verified all clinical data, results of statistical analysis, bibliographic references, interpretation of results and conclusions and bear full responsibility for the content of the submitted manuscript.

V.V. Makhnyk, S.O. Zharikov, R.P. Klimanskyi, D.A. Sobchenko
Donetsk National Medical University, Lyman, Ukraine

Diagnosis of closed abdominal trauma in polytrauma: comparison of methods

Abstract. Background. Blunt abdominal trauma in polytrauma patients remains diagnostically challenging due to hemodynamic instability, depressed consciousness and combined injuries. An additional risk is associated with delayed recognition of bowel, mesenteric or retroperitoneal injuries. The purpose was to compare the diagnostic performance of clinical examination, initial Focused Assessment with Sonography for Trauma (FAST), serial

FAST, contrast-enhanced multidetector computed tomography (CT) and an integrated algorithm for detecting clinically significant blunt abdominal injury in adult polytrauma patients. **Materials and methods.** A retrospective diagnostic study included 184 adults aged 18–79 years with blunt trauma and Injury Severity Score ≥ 16 . The reference standard was operative verification or a concordant clinical-radiological diagnosis after 72-hour observa-

tion, repeat CT, angiographic intervention or surgery. Sensitivity, specificity, predictive values, accuracy and 95% confidence intervals (CI) were calculated. Predictors of delayed diagnosis were assessed using multivariable logistic regression. **Results.** Clinically significant intra-abdominal injury was identified in 72 of 184 patients (39.1 %). Therapeutically significant injury was found in 38 patients (20.7 %). Initial FAST showed 69.4 % sensitivity and 91.1 % specificity. Serial FAST demonstrated 80.6 % sensitivity and 89.3 % specificity. Contrast-enhanced CT showed 94.4 % sensitivity and 95.5 % specificity. The combined algorithm had 97.2 % sensitivity and 92.9 % specificity. Early contrast-enhanced CT/whole-body CT reduced the median time to definitive diagnosis from 88 to 49 min ($p < 0.001$). Missed or delayed diagnosed injuries decreased

from 10.5 to 2.0 % ($p = 0.018$). Negative initial FAST with lactate > 2.5 mmol/L independently predicted diagnostic delay (odds ratio = 3.90; 95% CI 1.44–10.56; $p = 0.008$). **Conclusions.** FAST is useful for early triage but is insufficient as a stand-alone exclusion test in blunt abdominal trauma. Early contrast-enhanced CT provides the highest diagnostic yield in stable or stabilized patients. An integrated algorithm had additional value, it combines clinical, laboratory and ultrasound signs. Future studies should prospectively validate the proposed algorithm in multicenter trauma cohorts. A group of patients with negative FAST and laboratory markers of hypoperfusion requires a separate study.

Keywords: polytrauma; blunt abdominal trauma; FAST; computed tomography; diagnostic accuracy; intra-abdominal injury

Нехлопочин О.С., Вербов В.В., Чешук Є.В., Фортуненко В.І.
Інститут нейрохірургії імені акад. А.П. Ромоданова НАМН України, м. Київ, Україна

Морфофункціональна стратифікація ушкоджень типу А грудопоперекового переходу: КТ-морфометричні морфотипи та алгоритм вибору тактики лікування

Резюме. Актуальність. Вибір тактики лікування при ушкодженнях типу А грудопоперекового переходу (ГПП, Th11-L2) залишається дискусійним. Класифікація AO Spine описує морфологію та слугує міжнародною мовою спілкування, проте її недостатньо для індивідуального вибору втручання, особливо у складних реконструктивних ситуаціях. Це обґрунтовує виділення внутрішньотипових кількісних морфотипів і побудову індивідуалізованого алгоритму. **Мета:** виконати морфофункціональну стратифікацію ушкоджень типу А ГПП: виділити КТ-морфометричні морфотипи, що відображають співвідношення локальної морфології перелому й деформаційної відповіді сегмента, і побудувати алгоритм, у якому морфотип формалізує базовий тактичний сценарій, а кількісні порогові значення — його модифікацію. **Матеріали та методи.** За даними КТ-морфометрії (CA, GA, A/P ratio, AVH ratio, AED, PED, HU) методами k-means і Gaussian mixture model виділено морфотипи; HU застосовано як модифікатор якості кістки. Кластеризацію оцінювали за silhouette, BIC і клінічною інтерпретованістю, відмінності — за критеріями Краскела — Уолліса/Манна — Уїтні та χ^2 , дискримінаційну здатність — ROC-аналізом, зв'язок із результатом — відношенням шансів. Алгоритм побудовано за принципом «тип AO Spine → морфотип → базова тактика → кількісні модифікатори». **Результати.** Усередині A1-A2 виділено три морфотипи — компенсований, субкомпенсований і декомпенсований (градієнт втрати передньої опори); усередині A3-A4 — два: кіфотико-деформаційний і компресійно-ретропульсійний. Морфотип тісно пов'язаний із реалізованою тактикою: при A1-A2 — перехід від спостереження до цементопластики та короткої транспедикулярної фіксації (ТПФ); при A3-A4 — вибір між довгою ТПФ і декомпресією з фіксацією. Порогові значення (CA > 14°/GA > 25° для довжини конструкції; рівень-залежний орієнтир стенозу 35/45/55 % для відкритої vs непрямой декомпресії; HU < 150 за аугментацію) уточнювали рішення. Кіфотико-деформаційний морфотип A3-A4 в усіх 40 спостереженнях лікували довгою ТПФ, компресійно-ретропульсійний — варіативно. **Висновки.** Морфотип доцільно використовувати як кількісне клініко-тактичне уточнення підтипу AO Spine: AO Spine задає морфологічну вісь, морфотип — рівень ухвалення базового рішення, а ASIA, задній лігаментозний комплекс і якість кістки залишаються обов'язковими модифікаторами. Алгоритм є дериваційною моделлю та потребує проспективної валідації.

Ключові слова: грудопоперековий перехід; ушкодження типу А; AO Spine; КТ-морфометрія; морфотип; алгоритм вибору тактики

Вступ

Грудопоперековий перехід (Th11-L2) — найчастіша локалізація переломів хребта, що зумовлено біомеханічним переходом від відносно ригідного грудного відділу до рухливішого поперекового та концентрацією осевих, флексійних і ротаційних навантажень у цій зоні; поширеність таких ушкоджень зростає зі збільшенням тривалості життя населення та частоти остеопорозу [1, 2].

Для опису цих ушкоджень запропоновано низку класифікаційних систем. Триколонна концепція F. Denis [3] і класифікація F. Magerl [4] історично заклали морфологічний підхід, а класифікація AO Spine [5] стала міжнародно визнаним стандартом. Для оцінювання тяжкості та потреби в хірургічному лікуванні застосовують шкалу TLICS [6], а для оцінювання навантажувальної спроможності тіла хребця — класифікацію McCormack [7]. Ці системи дають зручну мову

опису морфології та загальної нестабільності ушкодження.

Водночас вибір конкретного методу лікування при ушкодженнях типу А залишається предметом дискусії. Морфологічний код описує форму ушкодження, але не охоплює всього обсягу інформації, потрібної для індивідуального рішення: ступінь руйнування переднього опорного комплексу, конфігурацію фрагментації, якість кісткової тканини, стан заднього лігаментозного комплексу та неврологічний статус. Показано, що дані КТ і МРТ суттєво впливають на класифікацію та хірургічне рішення і не повністю відображаються формальним підтипом [8–10]; для остеопоротичних та інших складних ушкоджень запропоновано окремі рекомендації [11, 12]. Це сформувало напрям кількісної морфометричної індивідуалізації, у межах якого класифікацію розглядають як первинний морфологічний орієнтир, доповнюваний кількісними предикторами [13–15].

Усередині формального типу А підтипи А1–А4 об'єднують різні за функціональними наслідками ушкодження — від мінімальної клиноподібної компресії до вибухового перелому з ретропульсією фрагмента у хребтовий канал, унаслідок чого підтип виявляється недостатнім орієнтиром для вибору обсягу втручання.

Принципово, що тактичне значення ушкодження визначається не лише ступенем локального руйнування тіла хребця. За зіставної втрати передньої висоти або близького А/Р ratio сагітальна деформаційна відповідь хребтового сегмента може суттєво різнитися: в одних пацієнтів ушкодження залишається компенсованим із мінімальною кутовою деформацією, в інших формується виражений кіфотичний компонент і ризик прогресування. Отже, потрібна оцінка не лише морфології перелому, а й морфофункціональної реалізації ушкодження — співвідношення між локальною втратою опори та деформаційною відповіддю сегмента. Під морфофункціональною реалізацією ушкодження в цій роботі розуміли механіко-деформаційний прояв локального перелому на рівні хребтового сегмента: співвідношення між локальною втратою висоти/опори тіла хребця та інтегральною сагітальною відповіддю сегмента за СА і GA, без прямого вимірювання функції (ODI, динамічні проби).

Мета роботи: виділити КТ-морфометричні морфотипи ушкоджень типу А груднопоперекового переходу, що відображають не лише локальну морфологію перелому, а й морфофункціональну реалізацію ушкодження, та побудувати індивідуалізований алгоритм вибору лікувальної тактики, у якому морфотип формалізує базовий тактичний сценарій, а кількісні порогові значення його модифікують.

Матеріали та методи

Дизайн дослідження та критерії відбору пацієнтів

Проведено ретроспективно-проспективне одностороннє дослідження пацієнтів із травматичними ушкодженнями груднопоперекового переходу Th11–L2, що спостерігалися в Інституті нейрохірургії ім. акад. А.П. Ромоданова НАМН України у 2011–2026 рр. Із за-

гальної когорти відбирали пацієнтів з ушкодженнями типу А за АО Spine. До морфометричного і тактичного аналізу включали пацієнтів за весь період спостереження; аналіз 12-місячних результатів виконували лише за наявності повного 12-місячного катамнезу на момент закриття бази (січень 2026 р.), тому знаменники результатів менші за кількість пацієнтів у кожному морфотипі.

Включали дорослих пацієнтів (18 років і старших) із травматичним ушкодженням Th11–L2 типу А за АО Spine за наявності вихідної спіральної КТ із мультипланарними реконструкціями та доступності ключових морфометричних параметрів. Виключали патологічні (пухлинні, інфекційні) переломи, раніше оперований рівень, ушкодження типів В і С, а також спостереження з недостатньою якістю КТ або відсутністю даних для морфометрії.

КТ-морфометрія та клінічні змінні

За даними спіральної КТ із мультипланарними реконструкціями оцінювали: СА — кут Кобба; GA — кут Гарднера; А/Р ratio — співвідношення передньої та задньої висоти тіла хребця; AVH ratio — відносну передню висоту; AED і PED — переднє та заднє крайове зміщення фрагментів; HU — щільність губчастої кістки тіла хребця. Неврологічний статус класифікували за шкалою ASIA. Стан заднього лігаментозного комплексу (ЗЛК) оцінювали за сукупністю КТ-ознак (розходження остистих відростків, діастаз дуговідросткових суглобів) із залученням МРТ за її наявності; больовий синдром — за числовою рейтинговою шкалою болю (NRS) при надходженні; HU вимірювали в губчастій кістці тіла хребця на аксіальних зрізах. Вимірювання виконували із застосуванням програмного комплексу RadiAnt DICOM Viewer (Medixant, Польща; версія 2023.1, ліцензія № 1860F047).

Морфометричні вимірювання виконували незалежно; похибка ключових параметрів була низькою (середня абсолютна похибка/відносна: СА — 0,40°/3,0 %; GA — 0,65°/4,0 %; А/Р ratio — 0,016/2,7 %; AVH ratio — 0,014/2,2 %). Формальне оцінювання міжекспертної узгодженості (ICC) для повного набору параметрів, включно з PED, залишається предметом подальшої роботи.

Виділення морфотипів

Морфотипи виділяли виключно за кількісними КТ-морфометричними ознаками, без урахування методу лікування та результатів. Значення параметрів попередньо стандартизували (z-перетворення), а структуру даних оцінювали методом головних компонент (PCA). Кластеризацію виконували двома незалежними методами — k-means і Gaussian mixture model (GMM); оптимальну кількість кластерів обирали за сукупністю критеріїв: коефіцієнтом silhouette, баєсовим інформаційним критерієм (BIC) для GMM і клінічною інтерпретованістю рішення. Для А1–А2 кластеризацію вели за трьома параметрами — СА, GA, А/Р ratio; для А3–А4 — за розширеним набором (СА, GA, А/Р ratio, AVH ratio, AED, PED), що дало змогу врахувати ретропульсійно-фрагментаційний компонент. У таблиці

критеріїв наведено провідні розрізнявальні параметри. Міжкластерні межі та правило віднесення нового спостереження визначали за сукупністю параметрів (найближчий центроїд у стандартизованому просторі), а не за однією ознакою. Для практичного застосування нове спостереження спершу відносять до A1-A2 або A3-A4 за АО Spine; потім відповідні параметри стандартизують за навчальною вибіркою ($z = (x - M)/SD$) і обчислюють евклідову відстань до центроїдів морфотипів за формулою:

$$d_k = \sqrt{\sum_i (z_i - c_{ki})^2},$$

де z_i — стандартизоване значення i -го параметра у пацієнта, c_{ki} — координата центроїда k -го морфотипу за i -м параметром, d_k — відстань до k -го центроїда; спостереження відносять до морфотипу з мінімальною відстанню. За близьких відстаней до двох центроїдів випадок вважають межовим, а остаточне тактичне рішення ухвалюють з урахуванням ASIA, ЗЛК, НУ, болювого синдрому та технічної здійсненності. Повні значення середніх, SD і центроїдів наведено в додатку А.

Побудова алгоритму тактики

Алгоритм вибору тактики побудовано за принципом «тип АО Spine → морфотип → базове рішення → кількісні модифікатори»: базове рішення задавав морфотип, а кількісні порогові значення його модифікували. Кількісні орієнтири сформовано на основі внутрішнього ROC-аналізу, моделі непрямої декомпресії ΔΘ (за вихідним стенозом хребтового каналу та підтипом Magerl обчислюється залишковий стеноз і порівнюється з рівень-залежним орієнтиром), літературних даних і клінічних критеріїв; їхній статус наведено нижче.

Статистичний аналіз

Безперервні змінні подавали як $M \pm SD$ (для клінічної інтерпретації); статистичну перевірку відмінностей виконували непараметрично з огляду на малі підгрупи — за критеріями Краскела — Уолліса (≥ 3 групи) і Манна — Уїтні (2 групи), а зв'язок морфотипу з методом лікування — за критерієм χ^2 (за малих очікуваних частот — точним критерієм Fisher-Freeman-Halton). Структуру даних оцінювали методом головних компонент (PCA); кількість кластерів — коефіцієнтом silhouette ($k = 2-4$), бутстреп-стабільністю (індекс Жаккара) і клінічною інтерпретованістю (значення BIC — у додатку А). Дискримінаційну здатність па-

раметрів щодо морфотипу оцінювали ROC-аналізом (AUC). Аналізували дві пов'язані, але не вкладені кінцеві точки 12-місячного спостереження, які можуть розходитися: 1) несприятливий механіко-деформаційний результат — складену клінічну точку (клініко-деформаційна недостатність; імплант-асоційована подія — клінічно значуща міграція, поломка чи розхитування конструкції з болем, втратою корекції або потребою в ревізії; втрата корекції понад 10°; ревізія); 2) формальну структурну неспроможність — рентгенологічний критерій неспроможності конструкції/опорного комплексу, що міг бути наявний і без клінічного погіршення. Неврологічну динаміку (зміна класу ASIA) до механіко-деформаційної точки не включали й аналізували окремо. Частоти наведено з 95% довірчими інтервалами (метод Wilson), зв'язок морфотипу з результатом — відношенням шансів (OR) із точним критерієм Fisher та поправкою Холдейна — Анскомба за малих чисел подій. Статистичний аналіз виконано в середовищі R (версія 4.5.0, 2025-04-11; платформа x86_64-w64-mingw32). Рівень значущості $p < 0,05$.

Результати

Характеристика дослідженої когорти

У дослідження включено 157 пацієнтів з ушкодженнями типу А грудопоперекового переходу: A1-A2 — 57, A3-A4 — 100 (A1 — 45, A2 — 12, A3 — 56, A4 — 44). Середній вік — $51,0 \pm 19,3$ року (медіана 56; 18–92), чоловіків 74, жінок 83. Підгрупи відрізнялися за демографією: A1-A2 були старшими ($61,7 \pm 14,5$ року), з переважанням жінок (43 із 57), що відповідає остеопоротичному профілю, тоді як A3-A4 — молодшими ($45,0 \pm 19,2$ року), з переважанням чоловіків (60 зі 100), характерним для високоенергетичної травми. За рівнем ушкодження переважали L1 (71), Th12 (39) і L2 (31). Розподіл за неврологічним статусом при надходженні (ASIA): E — 54, D — 35, C — 18, B — 19, A — 31. Провідний механізм травми: падіння з висоти/кататравма — 110, дорожньо-транспортна травма — 47. Знижену щільність губчастої кістки (HU < 150) відзначено у 44 % пацієнтів (медіана HU 158). Зведену характеристику когорти наведено в табл. 1.

Формування морфотипів типу А

Кластеризація компресійних переломів A1-A2 ($n = 57$) за CA, GA і A/P ratio дала стійке трикластерне рішення, узгоджене між k-means і GMM. Кількість

Таблиця 1. Характеристика дослідженої когорти

Показник	Уся когорта	A1-A2	A3-A4
Кількість пацієнтів, n	157	57	100
Вік, років (M ± SD)	51,0 ± 19,3	61,7 ± 14,5	45,0 ± 19,2
Чоловіки/жінки	74/83	14/43	60/40
ASIA A-D/E	103/54	12/45	91/9
HU < 150	62/142 (44 %)	22/49 (45 %)	40/93 (43 %)
Падіння з висоти/ДТП	110/47	48/9	62/38

кластерів обрано за коефіцієнтом silhouette (0,574 при $k = 3$) і клінічною інтерпретованістю, а його стійкість підтверджено бутстреп-аналізом (середній індекс Жаккара 0,91); інформаційний критерій ВІС монотонно спадав до $k = 4$ (схильність GMM до дроблення) і вирішальним не був. Три кластери утворили не якісно різні типи, а впорядкований градієнт втрати передньої опори: від першого до третього послідовно зростала кутова деформація (CA від $6,5^\circ$ до $15,4^\circ$; GA від $10,6^\circ$ до $25,7^\circ$) при зниженні опорної геометрії (A/P ratio від 0,80 до 0,44). Відповідно кластери позначено як компенсований ($n = 19$), субкомпенсований ($n = 23$) і декомпенсований ($n = 15$) морфотипи (рис. 1, табл. 2). Ці морфотипи відображали не лише ступінь клиноподібної компресії, а й різну сагітальну відповідь на втрату передньої опори, тому їх доцільно розглядати як послідовні морфофункціональні стани — від збереженої опорної функції тіла хребця до її клінічно значущої неспроможності з деформаційним ризиком. Відмінності між морфотипами за всіма трьома параметрами високозначущі (Краскел — Уолліс: CA $H = 48,6$; GA $H = 47,8$; A/P ratio $H = 49,3$; $p < 0,001$ для кожного). Перша головна компонента пояснювала 91,7 % дисперсії (PC1-PC2 — 98,6 %), а коефіцієнт silhouette сягав максимуму при $k = 3$ (0,574), що підтримує трикластерне рішення.

Кластеризація вибухових переломів A3-A4 ($n = 100$) за розширеним набором параметрів (CA, GA, A/P, AVH, AED, PED) дала двокластерне рішення (silhouette при $k = 2$ — 0,41; для вихідного маркування — 0,37; бутстреп-стабільність — індекс Жаккара 1,00), що розділило спостереження не за ступенем тяжкості, а за провідним механізмом реалізації ушкодження (рис. 2). Кіфотико-деформаційний морфотип ($n = 40$) вирізнявся вираженою кутовою деформацією та втратою висоти тіла хребця (CA $16,2^\circ$; GA $19,2^\circ$; A/P 0,63; AVH 0,60) при помірній ретропульсії (PED 3,9 мм). Компресійно-ретропульсійний морфотип ($n = 60$) за збереженої висоти й геометрії тіла (CA $4,6^\circ$; GA $6,2^\circ$; A/P 0,93; AVH 0,81) мав вираженішу ретропульсію фрагмента (PED 5,4 мм). Відмінності були значущими за всіма параметрами; для CA, GA, A/P та AVH — $p < 0,001$, для PED — слабше, але також значуще ($p = 0,02$); PC1-PC2 пояснювали 75,2 % дисперсії. Помірне значення silhouette і часткове перекриття спостережень (рис. 2) вказують, що морфотипи A3-A4 відображають переважний механізм реалізації ушкодження, а не цілком дискретні категорії. Параметр AED (переднє крайове зміщення) вимірний лише при A3-A4 і становив 0,70 мм при кіфотико-деформаційному та 1,18 мм — при компресійно-ретропульсійному морфотипі.

Внутрішня дискримінантна характеристика кластерів (табл. 3) показує, які параметри ведуть розділення морфотипів; це структура кластерів, а не незалежна прогностична перевірка, оскільки ті самі параметри брали участь у їх формуванні. При A1-A2 провідними є A/P ratio і кут Кобба (AUC 1,000 і 0,999 для декомпенсованого морфотипу проти інших; орієнтовна межа CA близько $11,9^\circ$), при A3-A4 — A/P ratio, CA і GA (AUC

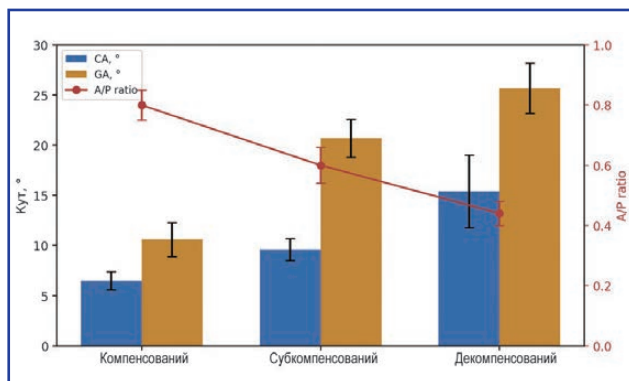


Рисунок 1. Морфотипи A1-A2: градієнт кутової деформації (CA, GA) і втрати передньої опори (A/P ratio); $M \pm SD$

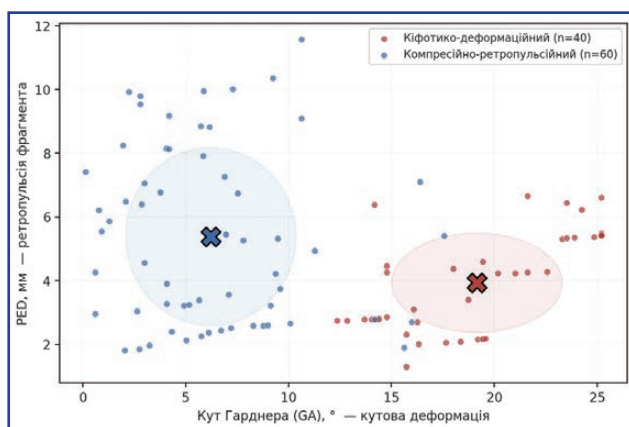


Рисунок 2. Морфотипи A3-A4 у просторі «кутова деформація (GA) — ретропульсія (PED)»: фактичне розділення двох кластерів (точки — пацієнти, X — центроїди)

0,98–0,99). Натомість PED як поодинокий параметр розділяє морфотипи A3-A4 слабо (AUC 0,635), тому компресійно-ретропульсійний морфотип вирізняється не ізольованим значенням PED, а поєднанням відносно збереженої висоти тіла хребця, малої кутової деформації та клінічно значущої ретропульсії фрагмента. Віднесення пацієнта виконується за сукупністю параметрів (найближчий центроїд; див. додаток А), а не за однією ознакою.

Морфотип уточнює і підтип A1/A2 (табл. 4): підтип A1 розподілявся між усіма трьома морфотипами (компенсований — 19, субкомпенсований — 22, декомпенсований — 4), тоді як A2 був переважно декомпенсованим (11 із 12). Отже, основний масив морфотипової варіації зосереджено всередині A1, який формальна класифікація не диференціює.

Морфотипи A3-A4 не дублюють підтип AO Spine (табл. 5): підтип A3 розподілявся між обома морфотипами (37 кіфотико-деформаційних і 19 компресійно-ретропульсійних), тоді як A4 був переважно компресійно-ретропульсійним (41 із 44). Зв'язок сильний, але неповний (V Крамера 0,58), тобто морфотип несе тактично значущу інформацію, що не зводиться до формального підтипу.

Клінічні ілюстрації морфотипів

Морфотипи відтворювано розпізнаються на КТ. На рис. 3 і 4 наведено репрезентативні приклади за кожним морфотипом із зазначенням морфометричних параметрів, що відповідають кластерним критеріям (табл. 2). У цій версії позиції зображень позначено як місця для знеособлених КТ-сагітальних реконструкцій із розміткою CA, GA і (для A3-A4) PED.

Морфотип і реалізована тактика

Фактична лікувальна тактика була тісно пов’язана з морфотипом (χ^2 : A1-A2 — 35,8; A3-A4 — 37,5; $p < 0,001$ для обох) (табл. 6). При A1-A2 спостерігався очікуваний за градієнтом перехід: компенсований морфотип лікували консервативно або цементопластикою (19 із 19), субкомпенсований — майже повністю цементо-

пластикою (21 із 23), а декомпенсований потребував активної стабілізації — короткої ТПФ (10 із 15). При A3-A4 морфотипи відтворювали два тактичні сценарії: кіфотико-деформаційний морфотип у всіх 40 спостереженнях лікували довгою транспедикулярною фіксацією (утримання сагітальної корекції), тоді як компресійно-ретропульсійний мав варіативну тактику — коротка ТПФ (25), довга ТПФ (24), корпектомія (7) та поодиноким цементопластиком, відображаючи потребу в індивідуальному оцінюванні каналу, декомпресії та опороздатності тіла.

Морфотип і результати

Морфотип був асоційований не лише з тактикою, а й із механіко-деформаційним результатом (табл. 7; частоти розраховано від кількості пацієнтів із 12-мі-

Таблиця 2. Кількісні критерії морфотипів типу А ($M \pm SD$)

Тип/морфотип	n	CA, °	GA, °	A/P	AVH	PED, мм
A1-A2, компенсований	19	6,5 ± 0,9	10,6 ± 1,7	0,80 ± 0,05	—	—
A1-A2, субкомпенсований	23	9,6 ± 1,1	20,7 ± 1,9	0,60 ± 0,06	—	—
A1-A2, декомпенсований	15	15,4 ± 3,6	25,7 ± 2,5	0,44 ± 0,04	—	—
A3-A4, кіфотико-деформаційний	40	16,2 ± 3,2	19,2 ± 4,2	0,63 ± 0,09	0,60 ± 0,08	3,9 ± 1,6
A3-A4, компресійно-ретропульсійний	60	4,6 ± 4,1	6,2 ± 4,1	0,93 ± 0,08	0,81 ± 0,17	5,4 ± 2,8

Таблиця 3. Внутрішня дискримінантна характеристика морфотипів: здатність окремих параметрів розділяти кластери (ROC; 95% ДІ — бутстреп, 500 повторів; за повної сепарації інтервал стягується до 1,00). Відображає структуру кластерів, а не незалежний прогноз

Розділення морфотипів	Параметр	AUC [95% ДІ]	Se	Sp
A1-A2: декомпенс. vs інші	A/P ratio (межа ≈ 0,49)	1,000 [1,00–1,00]	1,00	1,00
	CA (межа ≈ 11,9°)	0,999 [0,99–1,00]	1,00	0,98
	GA (межа ≈ 23°)	0,983 [0,95–1,00]	0,93	0,93
A3-A4: кіфотико-деформ. vs ретропульс.	A/P ratio (межа ≈ 0,76)	0,991 [0,98–1,00]	0,97	0,93
	CA (межа ≈ 11,2°)	0,982 [0,96–1,00]	0,93	0,95
	GA (межа ≈ 12,4°)	0,977 [0,95–1,00]	1,00	0,92
	PED (поодинокий)	0,635 [0,53–0,74]	—	—

Таблиця 4. Розподіл підтипів A1/A2 за морфотипами

Підтип AO Spine	Компенсований	Субкомпенсований	Декомпенсований	Усього
A1	19	22	4	45
A2	0	1	11	12
Усього	19	23	15	57

Таблиця 5. Розподіл підтипів A3/A4 за морфотипами ($\chi^2 = 33,6$; $p < 0,001$; V Крамера = 0,58)

Підтип AO Spine	Кіфотико-деформаційний	Компресійно-ретропульсійний	Усього
A3	37	19	56
A4	3	41	44
Усього	40	60	100

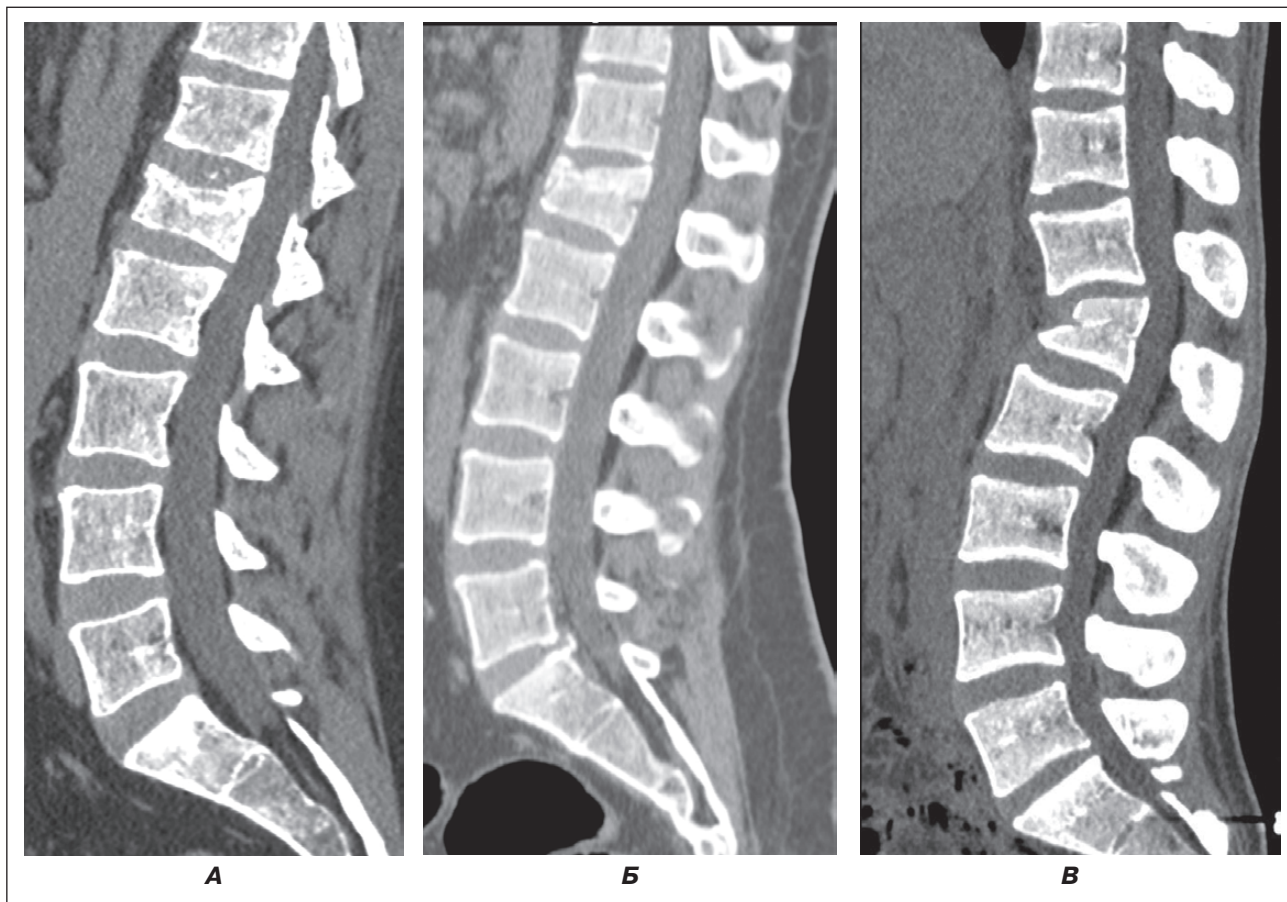


Рисунок 3. Морфофункціональні варіанти компресійної деформації та сегментарної сагітальної відповіді при переломах типів A1-A2 (ушкодження типу A1 хребця L1): А — компенсований варіант (CA = 6,3, GA = 11,3, A/P ratio = 0,80); Б — субкомпенсований варіант (CA = 10,9, GA = 19,7, A/P ratio = 0,61); В — декомпенсований варіант (CA = 25,4, GA = 31,8, A/P ratio = 0,43)



Рисунок 4. Клінічні приклади морфотипів A3-A4 (СКТ, сагітальна реконструкція): А — кіфотико-деформаційний (CA 24,5°, GA 24,4°, A/P ratio 0,49, AVH ratio 0,65, PED 5,2 мм), Б — компресійно-ретропульсійний (CA 14,6°, GA 12,1°, A/P ratio 0,72, AVH ratio 0,42, PED 9,8 мм)

сячним катамнезом, з 95% ДІ за методом Wilson). Несприятливий результат (клінічна складена точка) і формальна структурна неспроможність (рентгенологічний критерій) — пов’язані, але різні кінцеві точки, тому їхні частоти не вкладені. При A1-A2 частота несприятливого результату зростала за градієнтом: 0/19 (0 %; 95% ДІ 0–17), 1/19 (5,3 %; 95% ДІ 1–25) і 4/15 (26,7 %; 95% ДІ 11–52); відношення шансів для декомпенсованого морфотипу проти компенсованого та субкомпенсованого становило 9,8 (з поправкою Холдейна — Анскомба з огляду на малі числа; нескоригований OR 13,5; 95% ДІ 1,4–70; Fisher p = 0,019). При A3-A4 кіфотико-деформаційний морфотип перебігав без несприятливих механіко-деформаційних подій (0/40; верхня межа 95% ДІ близько 9 %), тоді як компресійно-ретропульсійний мав несприятливий результат у 15/48 (31,2 %; 95% ДІ 20–45) і структурну неспроможність у 16/48 (33,3 %; 95% ДІ 22–47). Окремо серед конфігурацій фіксації коротка 4-гвинтова конструкція виявилася неспроможною в 4 із 14 (28,6 %). Ці дані мають описовий характер: тяжчі морфотипи отримували складніше

лікування, тому результати відображають реалізовану практику, а не пряме порівняння ефективності методів; нульові частоти за обмеженого катамнезу (широкі верхні межі ДІ) не доводять відсутності ризику.

Неспроможність залежала від конфігурації задньої фіксації (табл. 8): коротка 4-гвинтова конструкція була неспроможною у 28,6 %, тоді як довга 8-гвинтова — у 9,6 %, а коротка 6-гвинтова з проміжними гвинтами — в 11,1 %; це відповідає вибору протяжніших або підсилених конструкцій при морфотипах із високим деформаційним ризиком. Порівняння конфігурацій має описовий характер і піддається confounding by indication: довжину конструкції обирали за вихідною морфологією ушкодження.

Щоб оцінити, чи не є морфотип лише опосередкованим відображенням неврологічної тяжкості, проаналізовано розподіл клінічних модифікаторів за морфотипами (табл. 9). Усередині A1-A2 неврологічний дефіцит траплявся істотно рідше, ніж при A3-A4, але концентрувався в декомпенсованому морфотипі; отже, градієнт A1-A2 відображає передусім втрату передньої

Таблиця 6. Фактичний розподіл методів лікування за морфотипами (кількість пацієнтів; довга ТПФ включає варіанти з відкритою та непрямую декомпресією)

Морфотип	Консерв.	Цементопл.	Коротка ТПФ	Довга ТПФ	Корпект.	n
A1-A2, компенсований	6	13	0	0	0	19
A1-A2, субкомпенсований	1	21	1	0	0	23
A1-A2, декомпенсований	1	4	10	0	0	15
A3-A4, кіфотико-деформаційний	0	0	0	40	0	40
A3-A4, компресійно-ретропульсійний	1	3	25	24	7	60

Таблиця 7. Результати 12-місячного спостереження за морфотипами (частоти з 95% ДІ за Wilson)

Морфотип	Катамнез	Несприятл. мех.-деформ. результат (95% ДІ)	Структ. неспром. (95% ДІ)	Втрата корекції > 10°
A1-A2, компенсований	19	0/19; 0 % (0–17)	0/19; 0 % (0–17)	0/19; 0 %
A1-A2, субкомпенсований	19	1/19; 5,3 % (1–25)	0/19; 0 % (0–17)	0/19; 0 %
A1-A2, декомпенсований	15	4/15; 26,7 % (11–52)	3/15; 20,0 % (7–45)	1/15; 6,7 %
A3-A4, кіфотико-деформаційний	40	0/40; 0 % (0–9)	0/40; 0 % (0–9)	0/40; 0 %
A3-A4, компресійно-ретропульсійний	48	15/48; 31,2 % (20–45)	16/48; 33,3 % (22–47)	4/48; 8,3 %

Таблиця 8. Структурна неспроможність за конфігурацією задньої фіксації (A3-A4, 12 міс.)

Конфігурація фіксації	n	Структ. неспром.
Коротка 4-гвинтова (1 вище + 1 нижче)	14	4/14 (28,6 %)
Коротка 6-гвинтова з проміжними	9	1/9 (11,1 %)
Довга 8-гвинтова (2 вище + 2 нижче)	52	5/52 (9,6 %)

опори, хоча в частини декомпенсованих ушкоджень поєднується з неврологічним дефіцитом. Усередині A3-A4 обидва морфотипи мали однаково високу частоту дефіциту (98 і 87 %), тому відмінність кіфотико-деформаційного та компресійно-ретропульсійного морфотипів не пояснюється класом ASIA і відображає саме механізм реалізації ушкодження. Це підтверджує, що морфотип несе інформацію, яка не зводиться до неврологічного статусу.

Оскільки обидва морфотипи A3-A4 мали високу частоту неврологічного дефіциту, окремо проаналізовано обсяг декомпресії та 12-місячну динаміку за ASIA (табл. 10). Кіфотико-деформаційний морфотип частіше отримував пряму (відкриту) декомпресію в поєднанні з довгою фіксацією (32 із 40), компресійно-ретропульсійний розподілявся між відкритою (26) і непрямою (22) декомпресією. Важливо, що неврологічна динаміка була сприятливою: поліпшення класу ASIA відзначено у 15 із 40 при кіфотико-деформаційному та у 22 із 48 пацієнтів при компресійно-ретропульсійному морфотипі, погіршення — лише в одному спостереженні. Отже, складена кінцева точка в роботі є механіко-деформаційною (імплант-асоційовані та деформаційні події), тоді як неврологічне відновлення аналізували окремо і воно було переважно позитивним; формулювання «без несприятливих подій» стосується саме механіко-деформаційної точки, а не неврології.

Алгоритм вибору тактики: морфотип як базове рішення

Морфотип слугував основою вибору базового тактичного сценарію, а кількісні порогові значення його модифікували (рис. 5, табл. 12). При A1-A2 градієнт морфотипів прямо відповідав зростанню обсягу втручання: компенсований — зона спостере-

ження та консервативного ведення; субкомпенсований — основна сфера пункційної цементопластики як аналгетично-стабілізувального методу (за болювого синдрому $NRS \geq 6$ і втрати висоти тіла хребця 20–50 %); декомпенсований — активна стабілізація, частіше коротка транспедикулярна фіксація з проміжними гвинтами. Низька щільність кістки ($HU < 150$) на будь-якому рівні змішувала рішення у бік аугментації гвинтів. Над усім алгоритмом діють обов'язкові клінічні модифікатори — неврологічний статус (ASIA), стан заднього лігаментозного комплексу, вираженість болювого синдрому, вік і коморбідність, технічна здійсненність, які морфотип не скасовує, а доповнює.

При A3-A4 морфотип задавав провідне тактичне питання. Для кіфотико-деформаційного морфотипу основним завданням було утримання сагітальної корекції: базовим рішенням слугувала довга (8-гвинтова) транспедикулярна конструкція, а порогові значення $CA > 14^\circ$ та/або $GA > 25^\circ$ слугували додатковими кількісними аргументами на користь збільшення довжини конструкції, особливо в межах випадках (усередині самого морфотипу середні значення деформації можуть бути нижчими за ці порогові). Для компресійно-ретропульсійного морфотипу провідним ставало питання декомпресії: за моделлю непрямої декомпресії обчислювали залишковий стеноз і порівнювали з рівень-залежним орієнтиром (близько 35 % для Th11-Th12, 45 % для L1, 55 % для L2), що розмежовувало відкриту та непряму декомпресію; вільний або мігрований фрагмент задавав пріоритет відкритої декомпресії. Корпектомію розглядали лише за вузькими показаннями — груба мультифрагментарна деструкція тіла або неможливість зберегти передню опору після видалення фрагментів.

Застосовані тактичні орієнтири та їхні джерела зведено в табл. 11. Морфотип-розділювальні межі CA/GA

Таблиця 9. Розподіл клінічних модифікаторів за морфотипами (чисельник/кількість пацієнтів із доступними даними; для ASIA — A-D/E)

Морфотип	n	ASIA A-D/E	HU < 150	NRS ≥ 6
A1-A2, компенсований	19	0/19	7/15	0/19
A1-A2, субкомпенсований	23	4/19	7/21	2/23
A1-A2, декомпенсований	15	8/7	8/13	7/11
A3-A4, кіфотико-деформаційний	40	39/1	19/38	40/40
A3-A4, компресійно-ретропульсійний	60	52/8	21/55	41/60

Таблиця 10. Декомпресія та 12-місячна динаміка за ASIA в морфотипах A3-A4 (кількість пацієнтів). Декомпресію наведено для всієї групи A3-A4 (40 і 60); динаміку за ASIA — для пацієнтів із 12-місячним катанезом (40 і 48)

Морфотип A3-A4	Відкр. де-компр.	Непр. де-компр.	Без де-компр.	ASIA покращ.	Без змін	Погірш.
Кіфотико-деформаційний	32	4	4	15	25	0
Компресійно-ретропульсійний	26	22	12	22	25	1

мають внутрішній дискримінантний характер (табл. 3); тактичні порогові значення $CA > 14^\circ/GA > 25^\circ$ і рівень-залежний орієнтир стенозу є робочими та модельними орієнтирами, а не валідованими прогностичними порогам.

Обговорення

Отримані дані дають змогу розглядати морфотип як безпосередній кількісний рівень ухвалення рішення в межах морфологічної рамки AO Spine, тоді як сам тип AO Spine зберігає значення вихідної класифікаційної осі. У середині типу А ушкодження функціонально неоднорідні, і кількісна морфометрія відтворювано розбиває їх на морфотипи, що відповідають різним тактичним зонам: градієнт A1-A2 — зростанню обсягу втручання, а два морфотипи A3-A4 — двом різним провідним питанням (утримання корекції проти декомпресії). Найнаочніше це при A3-A4: кіфотико-деформаційний морфотип в усіх спостереженнях отримав довгу фіксацію, тоді як ретропульсійний розподілився між короткою, довгою фіксацією та корпектомією.

Особливе значення має невідповідність між локальними висотними параметрами та кутовою деформацією. A/P ratio характеризує переважно геометрію тіла

ушкодженого хребця, тоді як CA і GA відображають інтегральну деформаційну відповідь хребтового сегмента. Тому за подібного ступеня компресії тіла хребця відмінності CA/GA вказують на різні морфофункціональні стани: компенсований, за якого локальна втрата висоти не призводить до вираженої кіфотизації, і декомпенсований, за якого подібне ушкодження реалізується у значущу сагітальну деформацію. У цьому сенсі морфотип є не просто КТ-морфологічною групою, а морфофункціональним фенотипом ушкодження, що відображає співвідношення між локальним ступенем руйнування тіла хребця та біомеханічною/деформаційною відповіддю хребтового сегмента.

Характер цього зв'язку потребує окремого пояснення. Морфотип формується з тих самих кількісних ознак (деформація, втрата висоти, ретропульсія, якість кістки), на які орієнтується хірург, тому висока асоціація морфотипу з реалізованою тактикою очікувана й означає, що морфотип відтворювано формалізує вже наявну клінічну логіку, а не доводить незалежну перевагу алгоритму. Для підтвердження того, що застосування алгоритму само по собі поліпшує результати, потрібна проспективна або зовнішня валідація (наприклад, порівняння результатів до та після впровадження).

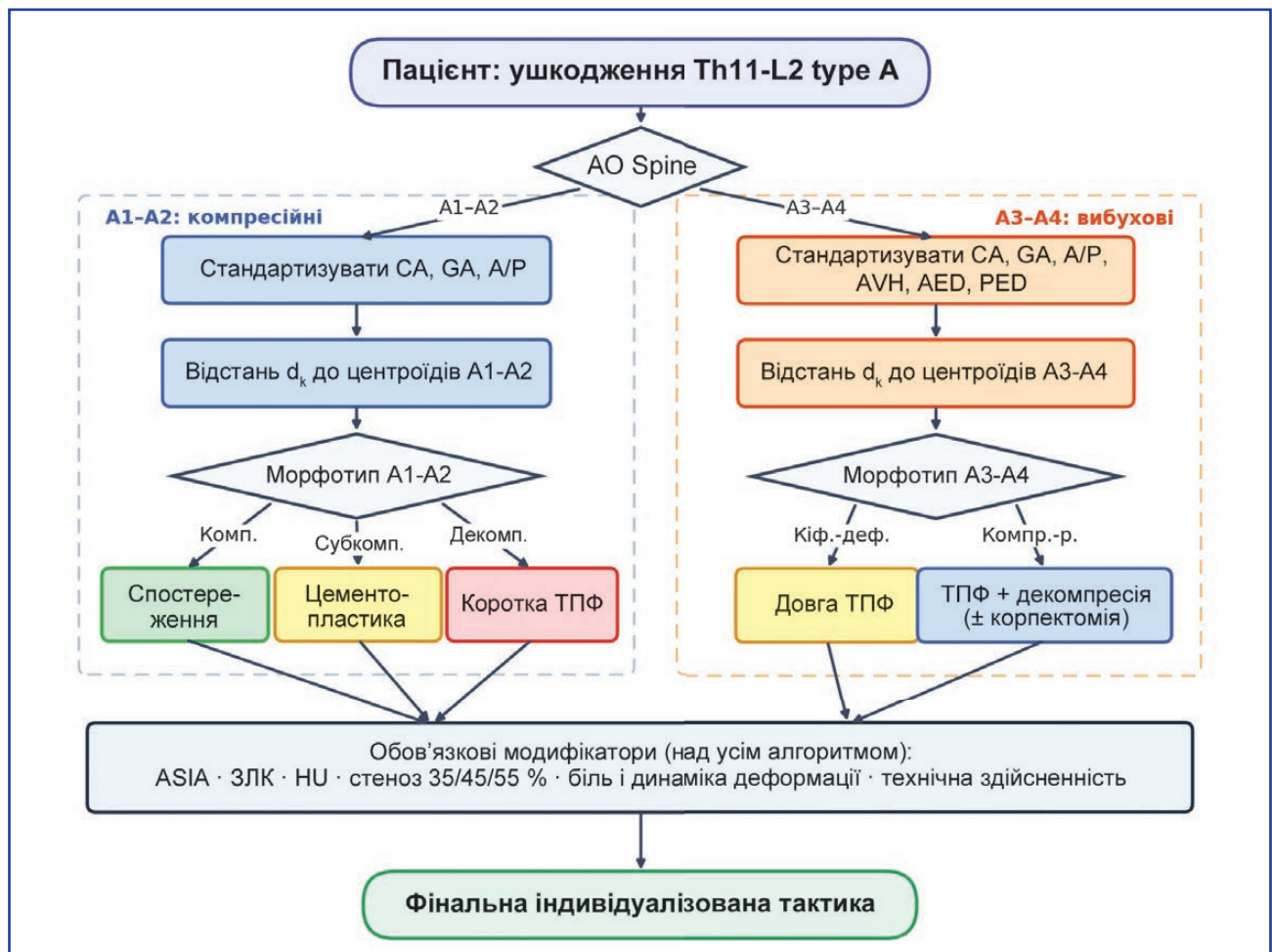


Рисунок 5. Індивідуалізований алгоритм вибору тактики при ушкодженнях типу А:
тип → морфотип → базова тактика → кількісні модифікатори

Отримані результати відповідають усталеному в літературі розумінню того, що морфологічна класифікація необхідна, але недостатня для індивідуального вибору тактики. A.F. Joaquim і A.A. Patel [16] наголошують, що класифікація задає рамку, але рішення потребує інтеграції додаткових чинників; саме тому автори Thoracolumbar AOSpine Injury Score [17] доповнили морфологію неврологічним статусом і модифікаторами, а S. Rajasekaran і співавт. [8, 18] показали, що дані КТ і МРТ суттєво змінюють класифікацію та хірургічне рішення. Морфотип операціоналізує цю ідею кількісно, переводячи набір КТ-параметрів у конкретну тактичну зону всередині формального типу А.

Найзмістовніше зіставлення — за вибором довжини конструкції, центральним предметом дискусії в літературі. Класифікація навантажувального розподілу McCormack [7] першою пов'язала уламковість із ризиком неспроможності короткосегментної фіксації (за сумою понад 6 балів). M. Altay і співавт. [19] на вибухових переломах грудопоперекового переходу типу А

за Magerl показали, що ізольована короткосегментна фіксація супроводжується високою частотою неспроможності імплантанта та втрати корекції, і запропонували обирати довжину конструкції за load-sharing і підтипом Magerl. H. Aono і співавт. [20] повідомили про неспроможність короткої фіксації у 28,6 % спостережень, передбачувану сумою load-sharing понад 6, вибуховим характером і трансляцією; біомеханічні дані R.F. McLain [21, 22] також свідчать на користь протяжніших конструкцій при вираженій нестабільності.

Наші дані відтворюють і уточнюють цю закономірність. Кіфотико-деформаційний морфотип А3-А4 — кількісний аналог ушкодження з високою навантажувальною неспроможністю (виражені СА, GA, втрата висоти тіла) — в усіх 40 спостереженнях супроводжувався довгою фіксацією та перебігав без несприятливих механіко-деформаційних результатів, тоді як коротка 4-гвинтова фіксація в нашій серії виявлялася неспроможною у 28,6 % — значення, що практично збігається з даними H. Aono і співавт. [20, 23]. Тим самим морфо-

Таблиця 11. Кількісні тактичні орієнтири та їхні джерела

Орієнтир	Джерело	Призначення	Статус
CA > 14°/GA > 25°	Клінічна модель/ROC	Аргумент за довгу конструкцію	Робочий орієнтир (межові випадки)
Стеноз 35/45/55 % (за рівнем)	Модель ΔΘ непрямой декомпресії	Відкрита vs непрямая декомпресія	Модельний поріг
HU < 150	Література/модель	Якість кістки, аугментація	Модифікатор (локально AUC 0,55)
NRS ≥ 6; втрата висоти 20–50 %	Клінічний критерій	Показання до цементопластики	Клінічний орієнтир

Таблиця 12. Відповідність «морфотип — морфофункціональний сенс — базова тактика — кількісні модифікатори» при ушкодженнях типу А

Морфотип	Морфофункціональний сенс	Базова тактика	Кількісні модифікатори
A1-A2, компенсований	Локальна компресія без значущої деформаційної реалізації	Спостереження/консервативне ведення	Біль, динаміка деформації
A1-A2, субкомпенсований	Часткова втрата опори з больовим/стабілізацийним значенням	Цементопластика (аналгетично-стабілізувальна)	NRS ≥ 6; втрата висоти 20–50 %; HU < 150 → аугментація
A1-A2, декомпенсований	Втрата опори реалізується в кіфотичну деформацію	Коротка ТПФ із проміжними гвинтами	HU < 150 → аугментація; ЗЛК як обов'язковий модифікатор
A3-A4, кіфотико-деформаційний	Вибухове ушкодження реалізується через сагітальну деформацію	Довга (8-гвинтова) ТПФ	CA > 14° та/або GA > 25° — додаткові аргументи за довгу конструкцію; HU < 150 → аугментація
A3-A4, компресійно-ретропульсійний	Вибухове ушкодження реалізується через компресію каналу	ТПФ + декомпресія	Стеноз vs поріг 35/45/55 % (рівень) → відкрита/непряма; вільний фрагмент → відкрита
A3-A4, особлива ситуація: груба деструкція тіла	Неможливість зберегти передню опору	+ корпектомія (вузькі показання)	Груба деструкція; тіло непридатне як опорний елемент

тип постає як КТ-похідне розширення принципу load-sharing: замість бальної оцінки уламковості використовується багатовимірний кількісний профіль (CA, GA, A/P, PED), який додатково розрізняє деформаційний і ретропульсійний механізми.

Для компресійних переломів A1-A2 градієнт морфотипів відповідає спектру рішень, що обговорюються в літературі. Обґрунтованість консервативного ведення компенсованого морфотипу за відсутності неврологічного дефіциту підтверджена рандомізованими даними К.В. Wood і співавт. [24]; субкомпенсований морфотип — основна сфера пункційної цементопластики, що узгоджується з рекомендаціями щодо остеопоротичних і компресійних ушкоджень [11, 12, 25]; декомпенсований — зона активної стабілізації, що відповідає підвищеному ризику прогресування кіфотичної деформації при ушкодженнях типу A1 [26]. Концентрація несприятливих результатів саме в декомпенсованому морфотипі (26,7 %) показує, що межа між цементопластикою та фіксацією клінічно значуща.

Для компресійно-ретропульсійного морфотипу провідним стає питання декомпресії. Застосована модель непрямой декомпресії з рівень-залежним орієнтиром залишкового стенозу розвиває наш раніше опублікований аналіз її ефективності при вибухових переломах [27] і узгоджується з концепцією лігаментотаксису: непрямая декомпресія ефективна за збережених задніх опорних структур, тоді як вільний або мігрований фрагмент потребує прямої декомпресії.

Отже, запропонований алгоритм «тип → морфотип → базова тактика → кількісні модифікатори» не протиставляється наявним системам, а інтегрує їх: AO Spine залишається морфологічною віссю, принцип load-sharing [7] та ідея індивідуалізації довжини конструкції [19, 20] отримують кількісне морфотипове вираження (підтверджене нашими біомеханічними та клінічними роботами з коротко- та довгосегментної стабілізації [28, 29]), а неврологічний статус і стан заднього лігаментозного комплексу входять як модифікатори — як у TLICS [6, 30] і Thoracolumbar AOSpine Injury Score [17].

Порогові значення потребують окремого розмежування. Морфотипові межі (CA близько 7,6° і 11,9° при A1-A2) і тактичні порогові значення (CA > 14°/GA > 25° для довжини конструкції; рівень-залежний орієнтир стенозу для декомпресії; HU < 150 для аугментації) — це робочі орієнтири стратифікації, а не жорсткі показання: остаточне рішення ухвалюють з урахуванням ASIA, стану заднього лігаментозного комплексу, больового синдрому, віку та технічної здійсненності. Важливо також, що підтипи Magerl A3.1-A3.3 не еквівалентні A3/A4 за AO Spine, і в моделі декомпресії вони використовуються саме як окрема морфологічна характеристика.

Обмеження дослідження

Дослідження має ретроспективно-проспективний, нерандомізований дизайн і становить дериваційний етап алгоритму, тому потребує зовнішньої проспективної валідації. Зв'язок морфотипу з реалізованою такти-

кою частково відображає формалізацію вже ухвалених хірургічних рішень, тому його не можна трактувати як доказ самостійної переваги алгоритму або прямого порівняння ефективності методів лікування. Окремі підгрупи були нечисленними, що обмежує стійкість оцінок частот і відношення шансів; розділення морфотипів A3-A4 було помірним і відображало переважний механізм реалізації ушкодження, а не абсолютно дискретні категорії. Відтворюваність вимірювань оцінювали за середньою абсолютною/відносною похибкою, тоді як формальна міжекспертна узгодженість для повного набору параметрів потребує окремого дослідження. Тактичні порогові значення CA > 14°/GA > 25°, рівень-залежний орієнтир стенозу 35/45/55 % і HU < 150 слід розглядати як робочі клініко-модельні орієнтири, а не валідовані прогностичні пороги. У цьому аналізі не виконували окремої багатофакторної оцінки впливу віку, статі, рівня ушкодження та механізму травми; також не проводили формального порівняння моделей «AO Spine» і «AO Spine + морфотип». Переносність центроїдів, порогових значень і алгоритму на інші установи, КТ-протоколи та хірургічні школи має бути перевірена в незалежних когортах.

Висновки

1. Усередині формального типу A ушкодження функціонально неоднорідні, тому підтип AO Spine сам по собі недостатній як безпосередній орієнтир вибору конкретної тактики і потребує внутрішньотипової кількісної морфометричної стратифікації.

2. Усередині типу A виділено морфотипи: при A1-A2 — компенсований, субкомпенсований і декомпенсований (градієнт втрати передньої опори); при A3-A4 — кіфотико-деформаційний і компресійно-ретропульсійний.

3. Морфотип був тісно пов'язаний із реалізованою тактикою ($\chi^2 p < 0,001$) і давав змогу формалізувати вибір базового лікувального сценарію всередині типу A: при A1-A2 — градієнт від спостереження/цементопластики до короткої ТПФ; при A3-A4 кіфотико-деформаційний морфотип в усіх спостереженнях лікували довгою ТПФ, а компресійно-ретропульсійний — варіативно (коротка/довга ТПФ, корпектомія) залежно від компресії каналу.

4. У цій когорті морфотип асоціювався з різною частотою несприятливих механіко-деформаційних результатів (декомпенсований A1-A2 — 26,7 %, OR 9,8, 95% ДІ 1,4–70; компресійно-ретропульсійний A3-A4 — 31,2 %; за нижчої частоти подій в інших морфотипах), що вказує на його потенційну прогностичну значущість.

5. Запропоновано індивідуалізований алгоритм «тип → морфотип → базова тактика → кількісні модифікатори», у якому AO Spine слугує морфологічною віссю, морфотип — кількісним клініко-тактичним уточненням, а ASIA, ЗЛК і якість кістки — обов'язковими модифікаторами. Алгоритм становить дериваційну версію та потребує зовнішньої проспективної валідації.

Етична експертиза. Дослідження схвалено комісією з етики та біоетики Інституту нейрохірургії ім. акад. А.П. Ромоданова НАМН України (протокол № 4 від 05.09.2018) і виконано як фрагмент планової науково-дослідної роботи (номер державної реєстрації 0119U000110). Для проспективної частини отримано інформовану згоду пацієнтів; ретроспек-

тивну частину виконано на знеособлених архівних даних.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів та власної фінансової зацікавленості при підготовці даної статті.

Інформація про фінансування. Дослідження не отримувало спеціального фінансування.

Додаток А. Стандартизація параметрів і центроїди морфотипів

Кластеризація (деталі). Використано GMM з повною матрицею коваріацій. Значення BIC ($k = 1-4$): A1-A2 — 308/271/258/245; A3-A4 — 1389/1361/1406/1178. Для A1-A2 BIC знижувався до $k = 4$, а для A3-A4 мінімальне значення також отримано при $k = 4$ (немонотонно), що вказує на схильність GMM до додаткового дроблення нечисленних і перекривних класів. Тому BIC розглядали як допоміжний критерій, а остаточну кількість морфотипів обирали за сукупністю silhouette, бутстреп-стабільності (200 повторів, кластерний індекс Жаккара 0,91 для A1-A2 і 1,00 для A3-A4) і клінічної інтерпретованості. Узгодженість центроїдного правила

з вихідним кластерним маркуванням становила 100 % (A1-A2) і 95 % (A3-A4); центроїдне правило використано як прагматичну апроксимацію вихідного кластерного рішення.

Правило віднесення нового спостереження. Значення параметрів стандартизують за середніми та стандартними відхиленнями навчальної вибірки (середні та SD навчальної вибірки наведено в табл. А.1, А.2), після чого обчислюють евклідову відстань до стандартизованих центроїдів морфотипів (табл. А.3, А.4), і спостереження відносять до найближчого центроїда.

Таблиця А.1. Параметри стандартизації навчальної вибірки A1-A2 ($M \pm SD$)

Параметр	M	SD
CA, °	10,07	3,96
GA, °	18,64	6,35
A/P ratio	0,62	0,15

Таблиця А.2. Параметри стандартизації навчальної вибірки A3-A4 ($M \pm SD$)

Параметр	M	SD
CA, °	9,26	6,79
GA, °	11,39	7,55
A/P ratio	0,81	0,17
AVH ratio	0,72	0,17
AED, мм	0,99	1,14
PED, мм	4,80	2,46

Таблиця А.3. Стандартизовані центроїди морфотипів A1-A2 (z-значення)

Морфотип	CA	GA	A/P
Компенсований	-0,90	-1,27	+1,18
Субкомпенсований	-0,13	+0,33	-0,17
Декомпенсований	+1,34	+1,11	-1,24

Таблиця А.4. Стандартизовані центроїди морфотипів A3-A4 (z-значення)

Морфотип	CA	GA	A/P	AVH	AED	PED
Кіфотико-деформційний	+1,02	+1,03	-1,08	-0,74	-0,25	-0,35
Компресійно-ретропульсійний	-0,68	-0,69	+0,72	+0,49	+0,17	+0,24

Список літератури

1. Ambulgekar RK, Ghag NS. Epidemiological study of thoracolumbar spine fracture patients reported to tertiary care center of Central India. *International Journal of Research in Orthopaedics*. 2023;9(2):261-266. doi: 10.18203/issn.2455-4510.IntJResOrthop20230344.
2. Wendt K, Nau C, Jug M, Pape HC, Kdolsky R, Thomas S, et al. ESTES recommendation on thoracolumbar spine fractures : January 2023. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2024;50(4):1261-1275. doi: 10.1007/s00068-023-02247-3, PMID: 37052627.
3. Denis F. The three column spine and its significance in the classification of acute thoracolumbar spinal injuries. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1983;8(8):817-831. doi: 10.1097/00007632-198311000-00003, PMID: 6670016.
4. Magerl F, Aebi M, Gertzbein SD, Harms J, Nazarian S. A comprehensive classification of thoracic and lumbar injuries. *Eur Spine J*. 1994;3(4):184-201. doi: 10.1007/bf02221591, PMID: 7866834.
5. 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, PMID: 23970107.
6. Vaccaro AR, Lehman RA, Jr., Hurlbert RJ, Anderson PA, Harris M, Hedlund R, et al. A new classification of thoracolumbar injuries: the importance of injury morphology, the integrity of the posterior ligamentous complex, and neurologic status. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2005;30(20):2325-2333. doi: 10.1097/01.brs.0000182986.43345.cb, PMID: 16227897.
7. McCormack T, Karaikovic E, Gaines RW. The load sharing classification of spine fractures. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1994;19(15):1741-1744. doi: 10.1097/00007632-199408000-00014, PMID: 7973969.
8. Rajasekaran S, Vaccaro AR, Kanna RM, Schroeder GD, Oner FC, Vialle L, et al. The value of CT and MRI in the classification and surgical decision-making among spine surgeons in thoracolumbar spinal injuries. *Eur Spine J*. 2017;26(5):1463-1469. doi: 10.1007/s00586-016-4623-0, PMID: 27250728.
9. Falcão L, Ohannesian VA, Monteiro PQ, Silva RAS, Menezes IR, Suruagy Motta RFO, et al. Accuracy of CT Scan for Detecting Posterior Ligamentous Complex Injury in Traumatic Thoracolumbar Fractures: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Global Spine J*. 2025;15(7):3531-3543. doi: 10.1177/21925682251343525, PMID: 40380790.
10. Dunsmuir RA, Price MJ, Rankine JJ. "Dirty Fat Pad" Sign: A novel computed tomography (CT) indicator of injury to the posterior ligamentous complex in acute fractures of the thoracolumbar spine. *Injury*. 2026;57(7):113110. doi: 10.1016/j.injury.2026.113110, PMID: 41927418.
11. Schnake KJ, Blattert TR, Hahn P, Franck A, Hartmann F, Ullrich B, et al. Classification of Osteoporotic Thoracolumbar Spine Fractures: Recommendations of the Spine Section of the German Society for Orthopaedics and Trauma (DGOU). *Global Spine J*. 2018;8(2 Suppl):46S-49S. doi: 10.1177/2192568217717972, PMID: 30210960.
12. Komadina R, Bloemers FW, Jug M, Wendt KW, Nau C, Pape HC. Fractures of the thoracolumbar spine in osteoporosis. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2024;50(5):1977-1984. doi: 10.1007/s00068-024-02625-5, PMID: 39254697.
13. Buyukayten V, Ridderikhof ML, Twisk JWR, Groot OQ, Doornberg JN, Bloemers FW. The AO Spine TL Injury Classification System Drives Clinical Decision Making in Acute Thoracolumbar Fractures: A Retrospective Evaluation of Clinical Implementation. *Global Spine J*. 2026;21925682261432541. doi: 10.1177/21925682261432541, PMID: 41797480.
14. Dandurand C, Öner CF, Hazenbiller O, Bransford RJ, Schnake K, Vaccaro AR, et al. Understanding Decision Making as It Influences Treatment in Thoracolumbar Burst Fractures Without Neurological Deficit: Conceptual Framework and Methodology. *Global Spine J*. 2024;14(1_suppl):8s-16s. doi: 10.1177/21925682231210183, PMID: 38324598.
15. Aly MM, Abdelaziz M, Alfaisal FA, Alrumian RA, Espinoza XAS, Gutiérrez-González R, et al. Multicenter External Validation of the Accuracy of Computed Tomography Criteria for Detecting Thoracolumbar Posterior Ligamentous Complex Injury. *Neurosurgery*. 2025;96(6):1236-1248. doi: 10.1227/neu.0000000000003263, PMID: 39636120.
16. Joaquim AF, Patel AA. Thoracolumbar spine trauma: Evaluation and surgical decision-making. *J Craniovertebr Junction Spine*. 2013;4(1):3-9. doi: 10.4103/0974-8237.121616, PMID: 24381449.
17. Kepler CK, Vaccaro AR, Schroeder GD, Koerner JD, Vialle LR, Aarabi B, et al. The Thoracolumbar AOSpine Injury Score. *Global Spine J*. 2016;6(4):329-334. doi: 10.1055/s-0035-1563610, PMID: 27190734.
18. Aly MM, Al-Shoaibi AM, Abduraba Ali S, Al Fattani A, Eldawood H. How Often Would MRI Change the Thoracolumbar Fracture Classification or Decision-Making Compared to CT Alone? *Global Spine J*. 2024;14(1):11-24. doi: 10.1177/21925682221089579, PMID: 35382642.
19. Altay M, Ozkurt B, Aktekin CN, Ozturk AM, Dogan O, Tabak AY. Treatment of unstable thoracolumbar junction burst fractures with short- or long-segment posterior fixation in magerl type a fractures. *Eur Spine J*. 2007;16(8):1145-1155. doi: 10.1007/s00586-007-0310-5, PMID: 17252216.
20. Aono H, Ishii K, Tobimatsu H, Nagamoto Y, Takenaka S, Furuya M, et al. Temporary short-segment pedicle screw fixation for thoracolumbar burst fractures: comparative study with or without vertebroplasty. *Spine J*. 2017;17(8):1113-1119. doi: 10.1016/j.spinee.2017.03.022, PMID: 28373079.
21. McLain RF. The biomechanics of long versus short fixation for thoracolumbar spine fractures. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2006;31(11 Suppl):S70-79; discussion S104. doi: 10.1097/01.brs.0000218221.47230.dd, PMID: 16685240.
22. Yu D, Zhang Y, Li X, Wang W, Li Z, Xiao J. Efficacy and safety of posterior short-segment versus long-segment pedicle screws fixation for thoracolumbar burst fractures: A systematic review and meta-analysis. *Medicine (Baltimore)*. 2025;104(23):e42699. doi: 10.1097/MD.00000000000042699, PMID: 40489858.
23. Canseco JA, Reinhold M, Dalton J, Dandurand C, Oner CF, Dvorak M, et al. Acute thoracolumbar burst fractures (AO types A3/A4) with and without concomitant posterior ligamentous complex injury: treatment outcomes in surgically and nonsurgically managed patients. A multi-center prospective study. *Eur Spine J*. 2026. doi: 10.1007/s00586-025-09680-5, PMID: 41854908.
24. Wood KB, Buttermann GR, Phukan R, Harrod CC, Mehbod A, Shannon B, et al. Operative compared with nonoperative

treatment of a thoracolumbar burst fracture without neurological deficit: a prospective randomized study with follow-up at sixteen to twenty-two years. *J Bone Joint Surg Am.* 2015;97(1):3-9. doi: 10.2106/JBJS.N.00226, PMID: 25568388.

25. Scherer J, Joaquim A, Vaccaro A, Kanna R, El-Sharkawi M, Takahata M, et al. AO Spine-DGOU Osteoporotic Fracture Classification System: Internal Validation by the AO Spine Knowledge Forum Trauma. *Global Spine J.* 2025;15(4):2152-2157. doi: 10.1177/21925682241288187, PMID: 39327898.

26. Nekhlopochyn OS, Verbov VV, Cheshuk IV, Vorodi MV. Assessment of risk factors for the vertebral body kyphotic deformity progression in patients with type A1 injuries of the thoracolumbar junction. *Ukrainian Neurosurgical Journal.* 2023;29(3):26-33. doi: 10.25305/unj.278927.

27. Nekhlopochyn O, Verbov V, Cheshuk I, Vorodi M. Analysis of the effectiveness of indirect spinal canal decompression in the treatment of burst fractures at the thoracolumbar junction. *Orthopaedics Traumatology and Prosthetics.* 2024(3):13-21. doi: 10.15674/0030-59872024313-21.

28. Nekhlopochyn OS, Verbov VV, Cheshuk IV, Vorodi MV, Karpinsky MY, Yaresko OV. Short-segment stabilization techniques for burst fractures of the thoracolumbar junction: a finite element study under lateral flexion. *Ukrainian Neurosurgical Journal.* 2025;31(4):44-54. doi: 10.25305/unj.331033.

29. Xu C, Bai X, Ruan D, Zhang C. Comparative finite element analysis of posterior short segment fixation constructs with or without intermediate screws in the fractured vertebrae for the treatment of type A thoracolumbar fracture. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 2024;27(11):1398-1409. doi: 10.1080/10255842.2023.2243360, PMID: 37553841.

30. Pidd KT, Sadauskas D, Tomatis V, Knight EJ. Which is the Superior Thoracolumbar Injury Classification Tool? TLICS Versus AOSpine 2013: A Systematic Review. *Global Spine J.* 2025;15(4):2536-2546. doi: 10.1177/21925682241311303, PMID: 39722528.

Отримано/Received 27.05.2026

Рецензовано/Revised 03.07.2026

Прийнято до друку/Accepted 10.07.2026

Information about authors

Oleksii S. Nekhlopochyn, PhD, Senior Research Associate in the Department of Spinal Neurosurgery, Romodanov Neurosurgery Institute of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: AlexeyNS@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-1180-6881>

Vadim V. Verbov, PhD, Neurosurgeon of the Restorative Neurosurgery Department, Romodanov Neurosurgery Institute of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: v.verbov@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-3074-9915>

Ievgen V. Cheshuk, Neurosurgeon of the Restorative Neurosurgery Department, Romodanov Neurosurgery Institute of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: evcheshuk@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-8063-2141>

Vitalii I. Fortunencko, Junior Research Associate in the Department of Vascular Neurosurgery, Romodanov Neurosurgery Institute of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: fortunenko.neuro@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-0729-3842>

Conflicts of interests. Authors declare the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

Information about funding. The study has no separate additional funding.

O.S. Nekhlopochyn, V.V. Verbov, Ie.V. Cheshuk, V.I. Fortunencko
Romodanov Neurosurgery Institute, Kyiv, Ukraine

Morphofunctional stratification of type A injuries of the thoracolumbar junction: CT morphometric morphotypes and an algorithm for treatment decision-making

Abstract. Background. The choice of treatment strategy for type A injuries of the thoracolumbar junction (T11-L2) remains controversial. The AO Spine classification describes injury morphology and serves as an international language for communication; however, it is insufficient for individualized selection of a specific intervention, especially in complex reconstructive scenarios. This supports the identification of intratype quantitative morphotypes and the development of an individualized treatment algorithm. The purpose was to perform morphofunctional stratification of type A thoracolumbar junction injuries by identifying CT morphometric morphotypes that reflect the relationship between local fracture morphology and the deformation response of the spinal segment, as well as to develop an algorithm in which the morphotype formalizes the baseline tactical scenario, while quantitative threshold values modify it. **Materials and methods.** Morphotypes were identified using CT morphometric parameters (CA, GA, A/P ratio, AVH ratio, AED, PED, and HU) with k-means clustering and Gaussian mixture model; HU was used as a modifier of bone quality. Clustering was assessed using silhouette, BIC, and clinical interpretability. Differences were evaluated using the Kruskal-Wallis/Mann-Whitney tests and χ^2 test; discriminatory ability was assessed by ROC analysis, and the association with outcome was evaluated using odds ratios. The algorithm was constructed according to the principle “AO Spine type → morphotype → baseline treatment

strategy → quantitative modifiers”. **Results.** Within A1-A2 injuries, three morphotypes were identified: compensated, subcompensated, and decompensated, reflecting a gradient of anterior support loss. Within A3-A4 injuries, two morphotypes were identified: kyphotic-deformational and compression-retropulsion. The morphotype was closely associated with the implemented treatment strategy: in A1-A2 injuries, there was a transition from observation to cementoplasty and short-segment transpedicular fixation (TPF); in A3-A4 injuries, the choice was between long-segment TPF and decompression with fixation. Threshold values, including $CA > 14^\circ$ / $GA > 25^\circ$ for construct length, level-dependent canal stenosis thresholds of 35/45/55 % for open versus indirect decompression, and $HU < 150$ as an argument for augmentation, refined the baseline decision. The kyphotic-deformational A3-A4 morphotype was treated with long-segment TPF in all 40 cases, whereas treatment of the compression-retropulsion morphotype was variable. **Conclusions.** The morphotype may be used as a quantitative clinical and tactical refinement of the AO Spine subtype: AO Spine defines the morphological axis, the morphotype provides the level for baseline decision-making, while ASIA grade, posterior ligamentous complex, and bone quality remain mandatory modifiers. The proposed algorithm is a derivation model and requires prospective validation.

Keywords: thoracolumbar junction; type A injuries; AO Spine; CT morphometry; morphotype; treatment algorithm

Гур'єв С.О.¹, Гаріян С.В.², Кушнір В.А.¹, Цибульський О.С.²

¹Державний заклад «Український науково-практичний центр екстреної медичної допомоги та медицини катастроф МОЗ України», м. Київ, Україна

²Тернопільська обласна клінічна лікарня, м. Тернопіль, Україна

Дефекти довгих кісток у постраждалих із сучасною бойовою травмою. Ризикорієнтовне визначення потреби в пластиці м'яких тканин залежно від розміру та локалізації кісткового дефекту

Резюме. Актуальність. Сучасна бойова травма кінцівок характеризується значним обсягом ураження як кісток, так і м'яких тканин. Дефекти кісток є одним з найтяжчих та найпоширеніших ускладнень сучасної бойової травми кінцівок. Такі пошкодження супроводжуються значними дефектами м'яких тканин. **Мета дослідження:** вивчити та оцінити необхідність і доцільність пластики м'яких тканин у постраждалих з дефектами довгих кісток унаслідок сучасної бойової травми. **Матеріали та методи.** Дослідження має ретроспективний та когортний характер і засновано на вивченні та аналізі 141 випадку пошкодження кінцівок унаслідок сучасної бойової травми з наявністю дефектів довгих кісток. Критерієм включення була наявність бойового пошкодження кінцівок з дефектами довгих кісток та м'яких тканин. **Результати.** У результаті дослідження встановлено, що переважна більшість постраждалих з дефектами довгих кісток унаслідок бойової травми потребують оперативних втручань з приводу пластики м'яких тканин — 68,09 %. Встановлено, що найбільше пластики м'яких тканин потребували постраждалі з дефектами довгих кісток розміром 5,00–9,99 см (42,71 % постраждалих за питомою вагою даної групи), а найрідше потребували пластики м'яких тканин пацієнти з дефектами довгих кісток до 5,00 см (5,21 %). Встановлено тенденцію до зростання потреби в пластиці м'яких тканин зі збільшенням розміру кісткового дефекту. Починаючи з розміру кісткового дефекту більше 5,00 см ризик виникнення потреби в пластиці м'яких тканин за якісною характеристикою є катастрофічним, а до 5,00 см — суттєвим. Також встановлено, що найбільше потребу в оперативних втручаннях з метою пластики м'яких тканин мали постраждалі з дефектами кісток гомілки — 83,87 %, передпліччя — 75,00 %, найменшу потребу в проведенні оперативних втручань з приводу пластики м'яких тканин мали постраждалі з дефектами стегнової кістки внаслідок бойової травми — 12,00 %. Доведено, що розмір і локалізація кісткового дефекту є чинниками ризику, пов'язаними з потребою в оперативних втручаннях для пластики м'яких тканин. **Висновки.** 1. Розміри та локалізація кісткового дефекту є ризикотворючими факторами виникнення потреби в пластиці м'яких тканин у постраждалих із дефектами довгих кісток унаслідок сучасних бойових дій. 2. Клінічний результативний ризик виникнення потреби в пластиці м'яких тканин у постраждалих із дефектами довгих кісток унаслідок сучасних бойових дій є суттєвим при розмірах до 5,00 см і катастрофічним при розмірах більше ніж 5,00 см, що визначає відповідно відносні чи абсолютні показання до виконання оперативних втручань з приводу пластики м'яких тканин. 3. Клінічний результативний ризик у виникненні потреби в пластиці м'яких тканин є катастрофічним при дефектах кісток плеча, передпліччя та гомілки і несуттєвим при локалізації дефекту на стегні. Це визначає також абсолютні чи відповідні показання до виконання оперативних втручань з приводу пластики м'яких тканин.

Ключові слова: дефекти довгих кісток; дефекти м'яких тканин; потреба; пластика; постраждалі; бойова травма

Вступ

Сучасна бойова травма кінцівок характеризується значним обсягом ураження як кісток, так і м'яких тканин [1–3]. Дефекти кісток є одним з найтяжчих і найпоширеніших ускладнень сучасної бойової травми кінцівок [4–6]. Такі пошкодження супроводжуються значними дефектами м'яких тканин [7, 8]. Однією з найбільш складних та невирішених проблем у постраждалих з дефектами довгих кісток унаслідок бойової травми є визначення потреби в пластиці м'яких тканин залежно від обсягу пошкодження кістки. Це пов'язано з тим, що існує об'єктивне протиріччя: з одного боку, необхідно ізолювати місце дефекту, особливо після оперативного втручання з приводу заміщення дефектів, а з іншого боку, це значно впливає на умови репаративної регенерації кістки і збільшує обсяг оперативного втручання [9, 10]. У даному дослідженні не було поставлено за мету оцінку ефективності застосування конкретних технологій пластики м'яких тканин, а лише визначення потреби в такій пластиці за принципом успішності лікування постраждалих. Ми не вивчали саме розмір дефекту м'яких тканин з тих міркувань, що питання пластики м'яких тканин залежно від розміру самого дефекту, з одного боку, достатньо вивчено, а з іншого боку, воно потребує окремого ретельного дослідження. Це зумовлює необхідність і доцільність даного дослідження.

Мета дослідження: вивчити й оцінити необхідність і доцільність пластики м'яких тканин у постраждалих з дефектами довгих кісток унаслідок сучасної бойової травми залежно від розміру кісткового дефекту.

Матеріали та методи

Дослідження має ретроспективний і когортний характер і засноване на вивченні та аналізі 141 випадку пошкоджень кінцівок унаслідок сучасної бойової травми з наявністю дефектів довгих кісток. Критерієм включення була наявність бойового пошкодження кінцівок з дефектами довгих кісток і м'яких тканин, а також успішність лікування. Критерієм виключення є недостатня успішність лікування. Тобто була застосована методика успішності. Обсяг дослідження перевищує показник необхідного та достатнього для повноцінного аналізу, що визначено законом великих чисел для досліджень з максимально припустимою помилкою 5 %. Було застосовано методи параметричного (ранговий аналіз) та непараметричного (визначення поліхоричного показника зв'язку) аналізу. Результати непараметричного аналізу порівнювалися з критичними значеннями за таблицями Snedecor при $\alpha = 0,01$ та $p < 0,05$ залежно від показника ступеня вільності. Також було проведено аналіз та оцінювання клінічного результативного ризику виникнення потреби у виконанні оперативних втручань для пластики м'яких тканин. Оцінювання результатів аналізу проводилася із застосуванням законів формальної логіки. Вищевикладене забезпечило вірогідність результатів дослідження на рівні II b Oxford. Таким чином, при проведенні дослідження було дотримано критеріїв і вимог доказової

медицини. Обчислення результатів дослідження здійснено за допомогою комп'ютерних технологій із застосуванням програми Statistica.

Це дослідження було проведено з дотриманням вимог Гельсінської декларації, яка прийнята в 1964 році й переглянута 59-ю Генеральною асамблеєю WMA, та схвалено комісією з біоетики ДЗ «Український науково-практичний центр екстреної медичної допомоги та медицини катастроф МОЗ України», протокол № 4 від 22.06.2026 року.

Результати

Для визначення загального обсягу потреби в пластиці м'яких тканин у постраждалих з дефектами довгих кісток унаслідок бойової травми нами був проведений розподіл масиву вивчення за ознакою потреби в такій пластиці. Результати наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Аналіз розподілу масиву вивчення за ознакою потреби в пластиці м'яких тканин

Пластика м'яких тканин	Питома вага	Ранг
Так	68,09	1
Ні	31,91	2
Загалом	100,00	–

Дані табл. 1 вказують на те, що переважна більшість постраждалих з дефектами довгих кісток унаслідок бойової травми потребує оперативних втручань з приводу пластики м'яких тканин — 68,09 % за питомою вагою. Такий показник більш ніж удвічі перевищує показник питомої ваги постраждалих, які не потребували пластики м'яких тканин.

Для верифікації потреби у пластиці м'яких тканин у постраждалих із дефектами довгих кісток, що виникли внаслідок бойової травми, проведено інтегральний аналіз розподілу досліджуваної вибірки за розміром кісткового дефекту залежно від наявності потреби в оперативному втручанні для пластики м'яких тканин. Отримані результати наведено в табл. 2.

Аналіз даних, наведених у табл. 2, засвідчив, що найчастіше пластику м'яких тканин потребували постраждалі з дефектами довгих кісток розміром 5,00–9,99 см (42,71 % постраждалих за питомою вагою даної групи), що практично відповідає питомій вазі постраждалих з даним розміром дефекту в загальній вибірці (41,13 %). На другому ранговому місці були пацієнти з розміром дефекту 10,00–14,99 см — 32,29 % за питомою вагою, що на 6,76 % в абсолютному значенні інтенсивного показника (або на 26,48 % показника базового рівня) більше за показник загального масиву. На третьому ранговому місці серед групи постраждалих, які потребували пластики м'яких тканин, знаходилися постраждалі з розмірами дефекту кісток 15,00–19,99 см — 16,67 %, що на 3,19 % в абсолютному значенні інтенсивного показника (або на 23,67 % показника базового рівня) більше за показник загального масиву. Цікаво, що пацієнти з дефектами довгих

кісток до 5,00 см в даній групі потребували пластики м'яких тканин в 5,21 % випадків, що на 12,52 % в абсолютному значенні інтенсивного показника (або на 70,61 % показника базового рівня) менше за показник загального масиву.

Узагальнюючи вищевикладене, можна зауважити, що існує певна закономірність залежності в потребі пластики м'яких тканин у постраждалих з дефектами довгих кісток унаслідок бойової травми. Однак залежність не є лінійною.

Для більш ретельного визначення потреби в пластичі м'яких тканин у постраждалих з дефектами довгих кісток унаслідок бойової травми ми провели інтегральний розподіл масиву вивчення за ознакою потреби у виконанні пластики м'яких тканин у групах за розміром дефекту. Результати наведено в табл. 3.

Аналіз даних, наведених у табл. 3, свідчить про наявність чіткої тенденції до зростання потреби у пластичі м'яких тканин зі збільшенням розміру кісткового дефекту. Водночас детальний аналіз клінічних випадків виявив певне зниження частоти виконання пластики м'яких тканин у групі постраждалих із дефектами розміром 15,00–19,99 см, що було зумовлено загальним станом постраждалих.

Найбільша потреба у пластичі м'яких тканин існувала у групі постраждалих з розміром дефекту кісток більше за 20 см, у якій всі постраждалі потребували такої пластики. На другому ранговому місці знаходяться постраждалі з дефектом 10,00–14,99 см (86,11 %), на

третьому ранговому місці — постраждалі з кістковими дефектами 15,00–19,99 см — 84,21 % за питомою вагою постраждалих даної групи. Постраждалі з кістковими дефектами до 5,00 см потребували пластики м'яких тканин лише у 20,00 % випадків.

Для визначення вірогідності впливу розміру дефекту кістки на виникнення потреби в пластичі м'яких тканин був проведений поліхоричний аналіз розподілу даних табл. 2 і 3. У результаті аналізу встановлено, що між ознакою розміру кісткового дефекту в постраждалих з дефектами довгих кісток унаслідок бойових дій та потребою в пластичі м'яких тканин існує позитивний ($\phi^2 = 0,2542$), сильний ($C = 0,4502$) та високовірогідний зв'язок ($\chi^2 = 35,85$), а вищевикладені положення перебувають у межах поля вірогідності.

Зважаючи на те, що показники рангових місць табл. 2 і 3 не повністю збігаються, ми визнали за доцільне провести розрахунок, оцінювання та аналіз клінічних результативних ризиків виникнення потреби в пластичі м'яких тканин у постраждалих з дефектами довгих кісток унаслідок сучасних бойових дій, що формуються під впливом фактора ризику «розмір кісткового дефекту» (табл. 4).

Таким чином, найбільший клінічний результативний ризик (який можливо було розрахувати) виникнення потреби у пластичі м'яких тканин у постраждалих з дефектами довгих кісток унаслідок бойової травми мають постраждалі з розміром кісткового дефекту 10,00–14,99 см, на другому

Таблиця 2. Інтегральний аналіз розподілу постраждалих за розміром дефекту довгих кісток залежно від потреби у пластичі м'яких тканин

Розміри дефекту кісток (см)	Пластика м'яких тканин				Загальний масив	
	Так		Ні			
	Питома вага (%)	Ранг	Питома вага (%)	Ранг	Питома вага (%)	Ранг
2,5–4,99	5,21	4	44,44	1	17,73	3
5,0–9,99	42,71	1	37,78	2	41,13	1
10,0–14,99	32,29	2	11,11	3	25,53	2
15,0–19,99	16,67	3	6,67	4	13,48	4
Понад 20	3,12	5	0	0	2,13	5
Загалом	100,00	–	100,00	–	100,00	–

Таблиця 3. Інтегральний розподіл масиву вивчення за ознакою потреби в пластичі м'яких тканин у групах залежно від розміру дефекту

Розміри дефекту кісток (см)	Пластика м'яких тканин				Загалом (%)
	Так		Ні		
	Питома вага (%)	Ранг	Питома вага (%)	Ранг	
2,50–4,99	20,00	5	80,00	1	100,00
5,00–9,99	70,69	4	29,31	2	100,00
10,00–14,99	86,11	2	13,89	4	100,00
15,00–19,99	84,21	3	15,78	3	100,00
Понад 20	100	1	0	5	100,00

ранговому місці перебувають постраждалі з кістковим дефектом 15,00–19,99 см. Варто зауважити, що, починаючи з розміру кісткового дефекту більше 5,00 см, ризик виникнення потреби в пластиці м'яких тканин за якісною характеристикою є катастрофічним, а до 5,00 см — суттєвим. Таким чином, відповідно до концепції управління ризиками, усі постраждалі з дефектами довгих кісток унаслідок

бойової травми більше 5,00 см мають абсолютні показання до виконання пластики м'яких тканин, а до 5,00 см — відносні показання.

Для визначення впливу локалізації кісткового дефекту як клініко-анатомічного чинника проведено аналіз потреби в оперативному втручанні для пластики м'яких тканин залежно від локалізації дефекту. Результати наведено в табл. 5.

Таблиця 4. Аналіз клінічних результативних ризиків потреби в пластиці м'яких тканин

Ризикстворюючий фактор «розмір кісткового дефекту» (см)	Кількісний показник ризику (%)	Якісна характеристика ризику	Ранг
2,50–4,99	0,25	Суттєвий	4
5,00–9,99	2,41	Катастрофічний	3
10,00–14,99	6,20	Катастрофічний	1
15,00–19,99	5,33	Катастрофічний	2
Понад 20	Розрахувати неможливо	Катастрофічний	–

Таблиця 5. Інтегральний аналіз розподілу постраждалих за локалізацією дефекту довгих кісток залежно від потреби у пластиці м'яких тканин

Локалізація дефекту	Пластика м'яких тканин				Загалом (%)
	Так		Ні		
	Питома вага (%)	Ранг	Питома вага (%)	Ранг	
Плече	6,25	3	11,11	3	7,80
Передпліччя	9,38	2	6,67	4	8,51
Стегно	3,12	4	48,89	1	17,73
Гомілка	81,25	1	33,33	2	65,96
Загалом	100,00	–	100,00	–	100,00

Таблиця 6. Інтегральний аналіз розподілу постраждалих за потребою у пластиці м'яких тканин залежно від локалізації дефекту

Локалізація дефекту	Пластика м'яких тканин		Загалом (%)
	Так	Ні	
	Питома вага (%)	Питома вага (%)	
Плече	54,55	45,45	100,00
Передпліччя	75,00	25,00	100,00
Стегно	12,00	88,00	100,00
Гомілка	83,87	16,12	100,00

Таблиця 7. Аналіз клінічних результативних ризиків виникнення потреби у пластиці м'яких тканин, зумовлених ризикстворюючим фактором «локалізація кісткового дефекту»

Ризикстворюючий фактор «локалізація кісткового дефекту»	Кількісний показник ризику (%)	Якісна характеристика ризику	Ранг
Плече	1,20	Катастрофічний	3
Передпліччя	3,00	Катастрофічний	2
Стегно	0,14	Несуттєвий	4
Гомілка	5,20	Катастрофічний	1

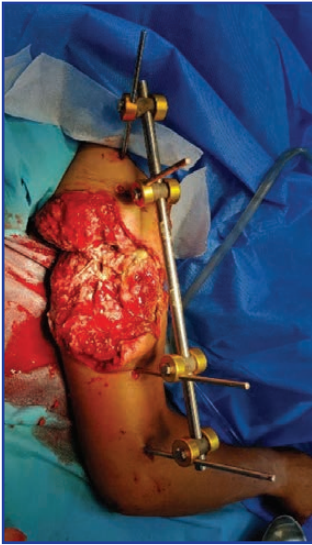


Рисунок 1. Надвеликий дефект м'яких тканин правого плеча



Рисунок 2. Рентгенограма плечової кістки



Рисунок 3. Планування, маркування клаптя

Аналіз даних табл. 5 засвідчує, що найбільше потребували пластики м'яких тканин постраждалі з дефектами кісток гомілки — 81,25 % за питомою вагою даної групи, що на 15,29 % в абсолютному значенні інтенсивного показника (або на 23,18 % показника базового рівня) більше за показник загального масиву. На другому ранговому місці перебувають постраждалі з дефектами кісток передпліччя — 9,38 %, що на 0,87 % в абсолютному значенні інтенсивного показника (або на 10,22 % показника базового рівня) більше за показник розподілу в загальному масиві. Постраждалі з дефектами стегнової кістки унаслідок бойової травми потребували оперативних втручань для проведення пластики м'яких тканин лише у 3,21 % обсягу потреби, що на 14,61 % в абсолютному значенні інтенсивного показ-

ника (або на 82,40 % показника базового рівня) менше за показник загального масиву. У групі постраждалих, яким було виконано пластику м'яких тканин, співвідношення максимального та мінімального показника варіаційного ряду становить 24,04, що вказує на дуже високу дисипацію розподілу та опосередковано на його вірогідність.

Таким чином, можна стверджувати, що потреба у виконанні оперативних втручань для проведення пластики м'яких тканин суттєво залежить від локалізації кісткового дефекту.

Для верифікації клініко-анатомічної ознаки «локалізація дефекту» проведений інтегральний аналіз розподілу масиву вивчення за цією ознакою у групах потреби в оперативному лікуванні (пластиці м'яких тканин), дані наведено в табл. 6.

Як свідчать дані табл. 6, найвищу потребу в оперативних втручаннях для пластики м'яких тканин мали постраждалі з дефектами кісток гомілки (83,87 %). Друге рангове місце за цим показником посідали постраждалі з дефектами кісток передпліччя (75,00 %). Найнижчу потребу в проведенні пластики м'яких тканин виявлено у постраждалих із дефектами стегнової кістки внаслідок бойової травми (12,00 %).

Таким чином, кожна локалізація дефекту довгих кісток унаслідок сучасної бойової травми має свій показник потреби у виконанні оперативних втручань для пластики м'яких тканин.

Для визначення вірогідності впливу клініко-анатомічної ознаки «локалізація кісткового дефекту» ми провели поліхоричний аналіз даних табл. 5, 6. У результаті було встановлено, що між локалізацією дефекту довгих кісток унаслідок сучасної бойової травми та виникненням потреби у пластиці м'яких тканин існує позитивний ($\phi^2 = 0,3407$), сильний ($C = 0,5041$) та високовірогідний зв'язок ($\chi^2 = 48,05$), а вищевикладені положення перебувають у межах поля вірогідності.

Для визначення та оцінки клінічних ризиків виникнення показань до пластики м'яких тканин, пов'язаних із локалізацією кісткового дефекту як ризикстворюючим чинником, проведено їх верифікацію та аналіз. Результати наведено в табл. 7.

Аналіз даних, наведених у табл. 7, засвідчив, що у постраждалих із дефектами довгих кісток, отриманими внаслідок сучасної бойової травми, катастрофічний рівень ризику виникнення потреби у пластиці м'яких тканин спостерігається при локалізації дефекту в ділянці плеча, передпліччя та гомілки. Найвищий рівень ризику виявлено при дефектах кісток гомілки, друге місце за його величиною посідають дефекти кісток передпліччя, третє — дефекти плечової кістки. Такі кількісні та якісні характеристики клінічного результативного ризику обґрунтовують абсолютні показання до виконання оперативних втручань для пластики м'яких тканин. Натомість при дефектах стегнової кістки клінічний результативний ризик виникнення потреби у пластиці м'яких тканин є несуттєвим, що зумовлює відносні показання до виконання таких оперативних втручань.



Рисунок 4. Місце дефекту м'яких тканин після пластики



Рисунок 5. Автодермопластика



Рисунок 6. Шість тижнів після травми

Для ілюстрації вищевикладених положень та результатів досліджень ми вважали за доцільне навести клінічні приклади дефектів м'яких тканин і результатів оперативних втручань щодо пластики м'яких тканин.

Клінічний приклад 1. Постраждалий чоловік 36 років отримав мінно-вибухове ізольоване поранення плеча. Багатоуламковий перелом плечової кістки з кістковим дефектом близько 10 см, з надвеликим дефектом м'яких тканин (якісна характеристика). Четверта доба після поранення (рис. 1, 2). На 8-му добу після госпіталізації виконано пластику дефекту м'яких тканин правого плеча (рис. 3, 4) з одночасним встановленням цементного спейсера.

На 12-ту добу після пластики дефекту м'яких тканин виконано автодермопластику (рис. 5). Рани загоїлися за 6 тижнів.

Клінічний приклад 2. Постраждалий чоловік 48 років отримав поєднане поранення внаслідок мінно-вибухової травми. Проникне поранення грудної клітки з гемопневмотораксом. Відкритий переломом плеча та кісток гомілки. При надходженні (5-та доба) на гомілку наявний дефект м'яких тканин та кістковий дефект 3,5 см (рис. 7, 8). Після дебридменту рани на 12-ту добу виконано пластику дефекту м'яких тканин суральним

клаптом (рис. 9) з одночасним встановленням цементного спейсера.

Післяопераційний період — без особливостей. Вигляд рани через 2 місяці після оперативного лікування показано на рис. 10.

Обговорення

У результаті дослідження встановлено, що більшість постраждалих з дефектами довгих кісток унаслідок сучасної бойової травми (68,09 %) потребує виконання пластики дефекту м'яких тканин. Такі дані певною мірою корелюють з даними світових джерел наукової інформації, але суттєво уточнюють їх [9, 11, 12]. Проведений аналіз засвідчив, що між розміром дефекту кістки та потребою у пластиці м'яких тканин існує позитивний, сильний та високовірогідний зв'язок. Хоча спостерігається певне зростання потреби в пластиці м'яких тканин зі збільшенням розміру кісткового дефекту, однак така тенденція не має лінійного характеру. Таким чином, було доведено, що розмір кісткового дефекту є ризикстворюючим фактором при виникненні потреби у проведенні оперативних втручань у постраждалих із дефектами довгих кісток унаслідок сучасної бойової травми. Отримані результати є унікальними, оскільки в доступних сві-



Рисунок 7. Дефект м'яких тканин

тових наукових джерел з цього питання наявні лише поодинокі повідомлення [12].

Під час дослідження проведено розрахунок, верифікацію та аналіз клінічних результативних ризиків виникнення потреби у виконанні оперативних втручань у постраждалих з дефектами довгих кісток унаслідок сучасної бойової травми. У результаті ризикорієнтованого аналізу вперше у світі визначено показання до виконан-

ня оперативних втручань для пластики м'яких тканин. Доведено, що при розмірі кісткового дефекту від 5,00 см клінічний результативний ризик набуває катастрофічного рівня, що обґрунтовує абсолютні показання до виконання пластики м'яких тканин. При розмірі кісткового дефекту менше ніж 5,00 см клінічний результативний ризик є суттєвим, що обґрунтовує відносні показання до виконання такого оперативного втручання.

Результати даного дослідження дозволили встановити вплив локалізації кісткового дефекту та виникнення потреби у виконанні пластики м'яких тканин. Встановлено, що розподіл масиву дослідження за ознакою локалізації кісткового дефекту має об'єктивний і вірогідний характер, а зв'язок за такою ознакою і потребою у виконанні пластики м'яких тканин є позитивним, сильним та високовірогідним. Вищевикладене дозволило визначити локалізацію кісткового дефекту як ризикстворюючий фактор виникнення потреби оперативних втручань у постраждалих з пошкодженнями кінцівок унаслідок сучасної бойової травми. Такі результати є унікальними внаслідок того, що вперше доведено локалізацію кісткового дефекту як ризикстворюючий фактор (як наслідок і формування показань до проведення оперативних втручань). До даного часу такі дослідження не проводилися.

У результаті аналізу клінічного результативного ризику виникнення потреби у пластиці м'яких тканин залежно від ризикстворюючого фактора «локалізація кісткового дефекту» встановлено, що при локалізації кісткового дефекту в ділянці плеча, передпліччя та гомілки ризик має катастрофічний характер, що зумовлює абсолютні показання до оперативного втручання для пластики м'яких тканин. При локалізації кісткового дефекту на стегновій кістці ризик є несуттєвим, що визначає відносні показання до виконання пластики м'яких тканин.

Узагальнюючи наведені результати, слід зазначити, що розмір і локалізація кісткового дефекту є ризикстворюючими факторами виникнення потреби в оперативних втручаннях для пластики м'яких тканин. Саме це визначає характер показань до виконання таких втручань у постраждалих із дефектами довгих кісток унаслідок сучасних бойових пошкоджень.

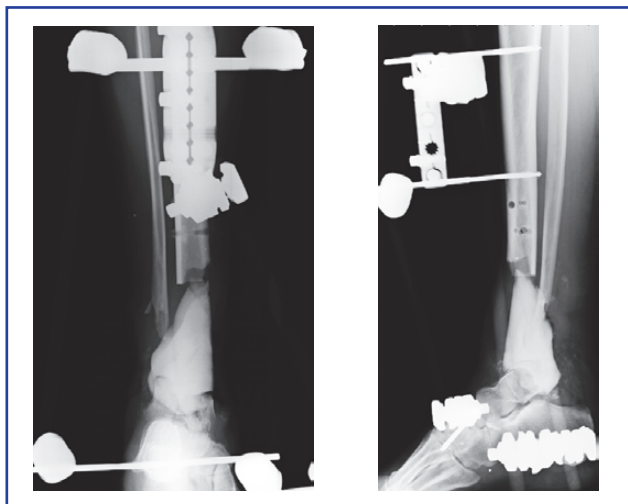


Рисунок 8. Рентгенограма кісток правої гомілки



Рисунок 9. Пластика дефекту м'яких тканин

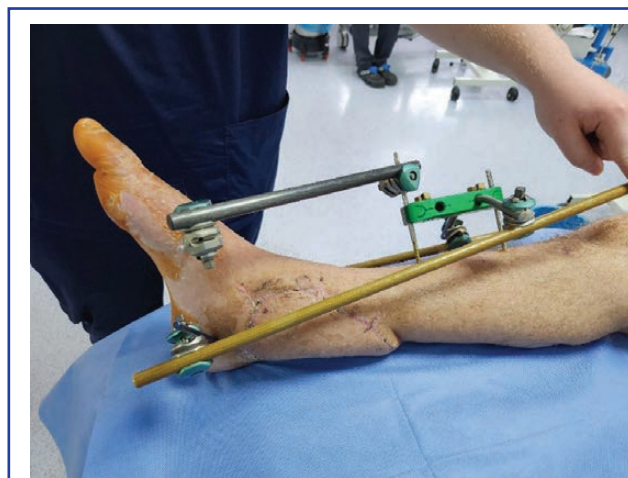


Рисунок 10. Місце пластики дефекту м'яких тканин через 2 місяці

ВИСНОВКИ

1. Розміри та локалізація кісткового дефекту є ризикстворюючими факторами виникнення потреби у пластиці м'яких тканин у постраждалих з дефектами довгих кісток, які виникли унаслідок сучасних бойових дій.

2. Клінічний результативний ризик виникнення потреби в пластиці м'яких тканин у постраждалих з дефектами довгих кісток унаслідок сучасних бойових дій є суттєвим при розмірах до 5,00 см та катастрофічним при розмірах більше за 5,00 см, що визначає відповідно відносні чи абсолютні показання до виконання оперативних втручань з приводу пластики м'яких тканин.

3. Клінічний результативний ризик у виникненні потреби в пластиці м'яких тканин є катастрофічним при дефектах кісток плеча, передпліччя та гомілки та є несуттєвим при локалізації дефекту на стегні. Це визначає також абсолютні чи відносні показання до виконання оперативних втручань з приводу пластики м'яких тканин.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Інформація про фінансування. Самофінансування.

Внесок авторів. Гур'єв С.О. — концепція і дизайн дослідження; Гаріян С.В. — аналіз отриманих даних, написання тексту; Кушнір В.А. — обробка матеріалів; Цибульський О.С. — збирання матеріалів.

Список літератури

1. Trutyak I, Los D, Medzyn V, Trunkvalter V, Zuckovsky V. Treatment of combat surgical trauma of the limbs in the conditions of modern war. *Proc Shevchenko Sci Soc Med Sci*. 2022 Dec 30;69(2). <https://doi.org/10.25040/ntsh2022.02.16>.
2. Guryev S, Hariyan S, Kushnir V, Tsybul'skyi O. Analysis of the practical application of surgical treatment technologies in victims with long bone defects depending on the size of the defect. *Trauma*. 2026;27(1):43-47. <https://doi.org/10.22141/1608-1706.1.27.2026.1065>.
3. Khomenko IP, Korol SO, Khalik SV, et al. Clinical and Epidemiological analysis of the structure of combat surgical injury during Antiterrorist operation / Joint Forces Operation. *Ukrainian Journal of Military Medicine*. 2021;2(2):5-13. [https://doi.org/10.46847/ujmm.2021.2\(2\)-005](https://doi.org/10.46847/ujmm.2021.2(2)-005).

4. Guryev S, Hariyan S, Kushnir V, Tsybul'skyi O. Application of surgical technologies for the treatment of victims with long bone defects due to modern combat trauma. *Orthopaedics traumatology and prosthetics*. 2025;(4):25-30. <https://doi.org/10.15674/0030-59872025425-30>.

5. Denysiuk MV, Dubrov SO, Cherniaiev SV, Sereda SO, Zaikin YM. Structure of traumatic injuries and experience in the treatment of the wounded patients, as a result of hostilities in the first days of Russia's attack on Ukraine. *Pain, Anaesthesia and Intensive Care*. 2022;(1):7-12. *Ukrainian*. doi: 10.25284/2519-2078.1(98).2022.256092.

6. Guryev S, Kushnir V, Hariyan S, Tsybul'skyi O. Clinical and anatomical structure of long bone defects in terms of age aspect. *Trauma*. 2025;26(5):353-359. <https://doi.org/10.22141/1608-1706.5.26.2025.1048>.

7. Tertyshnyi S, Khomenko I, Gumenyuk K, Korol S, et al. A meta-analysis of the soft tissue defects classification and justification of the optimal surgical reconstruction method. *USMYJ*. 2021 Mar 1 [cited 2026 Jun 21];121(1):112-23. Available from: <https://mmj.nmuofficial.com/index.php/journal/article/view/141>.

8. Koshtura V, Levchuk N, Makarenko O. Clinical characteristics of combat-related soft tissue injuries of the extremities under the conditions of chronic stress. *Actual Problems of Modern Medicine: Bulletin of Ukrainian Medical Stomatological Academy*. 2026;26(1):224-233. <https://doi.org/10.31718/2077-1096.26.1.224>.

9. Shaprynskyi YV, Myrhorodskyi DV. Peculiarities of choosing reconstruction method of defect soft tissues in case of lower limb wounds. *Hospital Surgery. Journal Named by L.Ya. Kovalchuk*. 2024;(2):14-19. <https://doi.org/10.11603/2414-4533.2024.2.14841>.

10. Akdeniz H, Dikmen A. Non-microsurgical salvage of complex soft tissue defects in the lower extremity with transposition fasciocutaneous flaps. *Eur J Plast Surg*. 2024;47:81. <https://doi.org/10.1007/s00238-024-02222-0>.

11. Takamura KM, Yoo JJ. Plastic Reconstruction of Upper Extremity Defects in Necrotizing Soft Tissue Infections. *Bioengineering*. 2025;12(7):718. <https://doi.org/10.3390/bioengineering12070718>.

12. Nordback PH, Hakkarainen M, Mattila S. A treatment algorithm for reconstruction of soft tissue defects in the hand: a narrative review. *Ann Transl Med*. 2023 Oct 25;11(11):390. doi: 10.21037/atm-23-201.

Отримано/Received 11.06.2026

Рецензовано/Revised 07.07.2026

Прийнято до друку/Accepted 15.07.2026

Information about authors

S.O. Guryev, MD, DSc, PhD, Professor, Deputy Director for Science, Ukrainian Scientific and Practical Center of Emergency Medical Care and Disaster Medicine of MHU, Kyiv, Ukraine; e-mail: gurevsergej1959@gmail.com; phone: +380 (67) 735-15-09; <https://orcid.org/0000-0003-0191-945X>

S.V. Hariyan, PhD in Medicine, Head of the Orthopedic and Traumatology Department, Municipal Non-Profit Enterprise "Ternopil Regional Clinical Hospital" of the Ternopil Regional Council, Ternopil, Ukraine; e-mail: drhariyan@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-2662-5756>

V.A. Kushnir, MD, DSc, PhD, Senior Research Fellow, Chief Research Fellow, Ukrainian Scientific and Practical Center of Emergency Medical Care and Disaster Medicine of MHU, Kyiv, Ukraine; e-mail: kv78@i.ua; phone: +380 (97) 548-51-38; <https://orcid.org/0000-0003-4569-7246>

O.S. Tsybul'skyi, Orthopedic and traumatologist, municipal non-profit enterprise "Ternopil Regional Clinical Hospital" of the Ternopil Regional Council, Ternopil, Ukraine; e-mail: tsybul'skyi.oleksandr@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0009-5310-3621>

Conflicts of interests. Authors declare the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

Information about funding. Self-financing.

Authors' contribution. S.O. Guryev — concept and design of the study; S.V. Hariyan — analysis of the data obtained, writing the text; V.A. Kushnir — processing of materials; O.S. Tsybul'skyi — collection of materials.

S.O. Guryev¹, S.V. Hariyan², V.A. Kushnir¹, O.S. Tsybulsky²

¹Ukrainian Scientific and Practical Center of Emergency Medical Care and Disaster Medicine of MHU, Kyiv, Ukraine

²Ternopil Regional Clinical Hospital, Ternopil, Ukraine

Long bone defects in victims with modern combat trauma. Risk-based determination of the need for soft tissue plastic surgery depending on the size and location of the bone defect

Abstract. Background. Modern combat trauma of the extremities is characterized by a significant amount of damage to both bones and soft tissues. Bone defects are one of the most severe and common complications of modern combat trauma of the extremities. Such injuries are accompanied by significant soft tissue defects. The purpose was to evaluate the necessity and feasibility of soft tissue plastic surgery in victims with long bone defects due to modern combat trauma. **Materials and methods.** This retrospective cohort research is based on the study and analysis of 141 cases of limb injuries due to modern combat trauma with the presence of long bone defects. The inclusion criterion was the presence of combat damage to the limbs with defects of long bones and soft tissues. **Results.** The study found that the vast majority of victims (68.09 %) with long bone defects caused by combat trauma require surgical interventions for soft tissue plastic surgery. It was revealed that the soft tissue plastic surgery was mostly required in victims with long bone defects measuring 5–9.99 cm (42.71 % of victims by the specific weight in this group), and the least soft tissue plastic surgery was required by patients with long bone defects of up to 5 cm (5.21 %). A trend towards increasing need for soft tissue plastic surgery with increasing bone defect size has been established. Starting from a bone defect size of more than 5 cm, the risk of the need for soft tissue plastic

surgery is catastrophic in terms of qualitative characteristics, and up to 5.0 cm, it is significant. It was also found that the greatest need for surgical interventions for the purpose of soft tissue plastic surgery was in victims with defects in the tibia (83.87 %) and forearm (75.00 %) bones, and the least need was in victims with defects in the femur bone caused by combat trauma (12.00 %). It has been proven that the size and location of the bone defect are risk factors in terms of the need for surgical interventions for soft tissue plastic surgery. **Conclusions.** 1. The size and location of the bone defect are risk factors for the need for soft tissue plastic surgery in victims with long bone defects as a result of modern hostilities. 2. The clinical outcome risk of the need for soft tissue plastic surgery in victims with long bone defects resulting from modern warfare is significant for sizes up to 5 cm and catastrophic for sizes over 5 cm, which determines the relative or absolute indications for soft tissue plastic surgery, respectively. 3. The clinical outcome risk of the need for soft tissue reconstruction is catastrophic for defects of the shoulder, forearm, and lower leg and is insignificant for defects of the hip. This also determines the absolute or relative indications for soft tissue reconstruction.

Keywords: long bone defects; soft tissue defects; need; plastic surgery; victims; combat trauma

V.V. Petrushenko¹, V.V. Chorna¹, N.M. Ordatii¹, A.V. Ordatii²¹National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine²Military Medical Clinical Center of the Central Region, Vinnytsia, Ukraine

Traumatic brain injury in the context of contemporary challenges: epidemiology, mechanisms of injury, gender differences, and long-term consequences (a systematic review)

Abstract. Background. Traumatic brain injury is one of the leading causes of disability among military personnel, with mild forms accounting for over 80 % of cases and often accompanied by persistent cognitive, emotional, and behavioral impairments. The purpose was to summarize current evidence on the epidemiology, mechanisms of injury, gender differences, and long-term consequences of traumatic brain injury in military personnel worldwide, based on a meta-analysis of both international and domestic scientific studies. **Materials and methods.** A systematic review was conducted using meta-analysis of international and domestic studies, as well as content analysis of publications indexed in Scopus and PubMed. The literature search employed keywords: traumatic brain injury, military personnel, post-concussion syndrome, acubarotrauma, neurobehavioral and cognitive sequelae, suicidal behavior, epilepsy, dementia, disability, rehabilitation. A total of 51 articles published between 2018 and 2026 were included. **Results.** Blast and combined injuries lead to diffuse axonal damage, microvascular changes, and disruption of brain networks, increasing the risk of seizures, cognitive deficits, and dementia. Common psychiatric consequences include post-traumatic stress disorder, depression, anxiety disorders, and sleep disturbances, which worsen social adaptation, especially when combined with neurobehavioral changes. Women are more prone to severe cognitive and emotional symptoms. **Conclusions.** Long-term rehabilitation should be based on a biopsychosocial model and include multidisciplinary interventions: medical, cognitive, physical, psychotherapeutic, and social support. The scientific and practical significance of this study lies in the implementation of evidence-based protocols, national registries, and prevention programs to reduce disability and improve the quality of life of affected individuals.

Keywords: traumatic brain injury; military personnel; post-concussion syndrome; acubarotrauma; neurobehavioral and cognitive sequelae; post-traumatic stress disorder; suicidal behavior; epilepsy; dementia; disability; rehabilitation

Introduction

Traumatic brain injury (TBI) represents a significant global medical and social challenge, with approximately 2.5 million emergency department visits, 288,000 hospitalizations, and 56,000 deaths annually in the United States, and about 43.0 % of patients experiencing long-term disability. Mild TBI (mTBI) accounts for the majority of cases and is associated with high morbidity in children, adolescents, and older adults, exhibiting a bimodal age distribution.

Global data indicate a substantially higher prevalence of TBI in low- and middle-income countries due to increased risk of road traffic accidents and limited access to healthcare. Among civilians, the most vulnerable groups are children under 4 years old (falls: 839 per 100,000), patents aged 15–24 years (road traffic accidents: 236 per 100,000), and adults over 75 years old (falls: 599 per 100,000). Males show a higher incidence of TBI, particularly in contact sports.

© «Травма» / «Trauma» («Травма»), 2026

© Видавець Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2026

Для кореспонденції: Кузьмов Роман Анатолійович, аспірант кафедри ендоскопічної та серцево-судинної хірургії, Вінницький національний медичний університет ім. М.І. Пирогова, вул. Пирогова, 56, м. Вінниця, 21018, Україна; e-mail: kuzmov1902@gmail.com; tel.: +380 (432) 55-39-10

For correspondence: Roman Kuzmov, Postgraduate Student, Department of Endoscopic and Cardiovascular Surgery, National Pirogov Memorial Medical University, Pyrohov st., 56, Vinnytsia, 21018, Ukraine; e-mail: kuzmov1902@gmail.com; phone: +380 (432) 55-39-10

Full list of authors information is available at the end of the article.

Among military personnel, TBI occurs more frequently than in civilian populations due to physically and psychologically hazardous conditions, including blast-related injuries. In the United States, from 2000 to 2019, over 413,000 service members were diagnosed with TBI, of which 83.0 % were mild. Women are less frequently affected by TBI but report more pronounced neurobehavioral symptoms following mTBI.

TBI is increasingly recognized as a chronic condition due to its long-term health consequences, including cognitive, motor, psychiatric, and sleep disturbances, resulting in impaired social and occupational functioning. In children, mTBI is associated with an increased risk of attention-deficit/hyperactivity disorder, anxiety disorders, post-traumatic stress disorder (PTSD), and social-behavioral problems. In adults, it is linked to depression, anxiety disorders, chronic pain, reduced social adaptation, and elevated risk of suicidal behavior.

Military studies indicate significant comorbidity of mTBI and PTSD, with negative impacts on social functioning, return to work, and community reintegration. The long-term outcomes of TBI depend on injury severity, exposure to high-energy blasts, proximity to the epicenter, age, sex, pre-existing health status, comorbidities, and lifestyle factors [1, 2].

Currently, it is critically important to study mTBI as a chronic condition, including vestibular and oculomotor consequences, to predict long-term outcomes, develop effective monitoring strategies, personalize treatment, and optimize the scope and focus of rehabilitation interventions [3–6].

Epidemiological data indicate pronounced gender differences in the prevalence of TBI: the incidence among men is approximately twice as high as among women. Although these figures encompass both military and civilian populations, they reflect a general trend, largely due to the higher representation of men in combat units and their more frequent engagement in operations in active combat zones.

Analysis of comorbid TBI and PTSD among veterans demonstrates complex gender-specific differences. Specifically, in the group with comorbid TBI + PTSD, no significant differences were found between men and women regarding meeting criteria for current PTSD. In contrast, among individuals with isolated PTSD, men more frequently met diagnostic criteria for the disorder.

Male veterans with PTSD exhibited a higher lifetime prevalence of alcohol and substance use disorders, as well as a higher prevalence of mild TBI. In the group of patients with isolated TBI, no gender differences in injury severity were observed. However, among veterans with comorbid PTSD and TBI, women had a higher likelihood of developing moderate to severe traumatic brain injury.

It is also noteworthy that female veterans without TBI or PTSD more frequently exhibited signs of major depressive disorder. Overall, the data confirm statistically significant gender differences in the prevalence of PTSD, alcohol use disorders, major depressive disorder, as well as in TBI severity, which should be considered when planning medical care and rehabilitation interventions [7].

TBI remains one of the leading medical challenges in modern military conflicts, despite rapid advances in weaponry, improvements in combat tactics, and the increasing

role of unmanned technologies. The reduction in overall number of injured personnel has not been accompanied by a proportional decrease in the incidence of TBI among service members, highlighting the continued relevance of this condition.

According to the U.S. Centers for Disease Control and Prevention, during 2000–2006, there was a significant increase in TBI cases, associated with the return of a large number of military personnel involved in overseas operations. Meanwhile, the U.S. Armed Forces Health Surveillance Center reported 375,230 TBI cases among military personnel between 2000 and 2016.

Mild TBI deserves particular attention, with prevalence among service members who participated in Operations Iraqi Freedom, Enduring Freedom, and New Dawn ranging from 15.2 to 22.8 %. The primary etiological factor in these cases was blast exposure, which can have cumulative effects with prolonged or repeated exposure.

Analysis of U.S. combat theater data from 2001–2012 showed that approximately 75.0 % of all TBI cases were classified as mild. Comprehensive assessment, considering injury severity and mechanism, indicated that the proportion of patients with mTBI reached 83.0 %, highlighting its dominant role in the profile of combat-related injuries [8].

According to surveys, 72.0 % of service members who participated in combat reported experiencing at least one mTBI during their lifetime. Vestibular disorders were recorded in 69.0 % of participants, with similar prevalence after blunt (59.0 %) and blast (47.0 %) injuries, while combined blunt and blast injuries were associated with the highest frequency (83.0 %). Analysis showed that even when accounting for PTSD, depression, and anxiety symptoms, vestibular dysfunction remained a direct and independent predictor of increased post-concussion symptoms and functional disability.

Vestibular dysfunction is a common consequence of combined blunt and blast injuries and constitutes an independent risk factor for poor long-term mental health. From a clinical perspective, vestibular rehabilitation can significantly reduce post-concussion symptoms, including balance disturbances and dizziness, underscoring its importance as a component of comprehensive treatment following mTBI [9].

The relevance of research on traumatic brain injuries is driven by modern military conflicts and the evolution of high-precision, high-power weaponry, which causes prolonged cognitive, psychological, and physical consequences, often resulting in persistent functional disability.

The purpose of this study was to summarize current evidence on the epidemiology, mechanisms of injury, gender differences, and long-term consequences of TBI among military personnel worldwide, based on a meta-analysis of both international and domestic scientific studies.

Materials and methods

A systematic review was conducted through meta-analysis of international and domestic studies, as well as content analysis of publications indexed in Scopus and PubMed. The literature search was performed using the following keywords: *traumatic brain injury, military personnel, post-*

concussion syndrome, acubarotrauma, neurobehavioral and cognitive sequelae, suicidal behavior, epilepsy, dementia, disability, rehabilitation. A total of 51 articles published between 2018 and 2026 were included in the review.

Results and discussion

The causes of TBI can be classified as follows:

- non-combat blunt head trauma — resulting from motor vehicle accidents, falls, or crush injuries. This type typically affects the posterior region of the head, causing localized damage to brain tissue around the impact site, such as contusions or epidural hematomas, which may extend to distal regions relative to the point of contact. Rotational acceleration of the skull can lead to diffuse axonal injury;
- combat-related mechanical head trauma — caused by damage to skull and brain structures due to gunshot or shrapnel wounds;
- blast-induced injuries — resulting from the propagation of a supersonic pressure gradient following detonation of an explosive device, with sequential phases of high positive pressure followed by longer negative pressure. Secondary injury may occur through reflection of these waves from surrounding surfaces, such as walls or vehicles. The pressure wave can accelerate the brain, causing tissue compression and displacement, with additional trauma from contact with intracranial structures. Compression of fluid media within the body, particularly the brain, can lead to bubble formation and cavitation [10].

Polytrauma involving multiple body regions is common, which complicates overall clinical status and progression. Blast injury — also referred to in the international literature as blast-induced or explosive trauma — is caused by the pressure wave and energy generated during an explosion, resulting in injury to multiple organ systems. Animal models simulating blast exposure have shown that the shock wave rapidly passes through the skull and brain, causing varying degrees of damage, including disruption of the blood-brain barrier and microvascular integrity, increased intracranial pressure, possible contusions, and axonal injury. These effects lead to deficits in synaptic excitability due to ultrastructural neuronal damage, triggering neuroinflammatory processes in the cortex and hippocampus, microglial activation, and generalization of inflammation [11].

The mechanism of TBI following blast exposure is divided into four phases:

- primary phase — caused by the physical forces generated by the explosive substance, with rapid transmission of the pressure wave through brain tissue;
- secondary phase — results from penetration of the skull by projectiles or fragments;
- tertiary phase — occurs due to contact or acceleration of the head and body movement induced by the blast wave;
- quaternary phase — includes any brain injury not covered by the first three phases, such as hemorrhagic shock, chemical, or thermal burns. The vast majority of blast-related TBIs occur during the first three phases [11].

There are five commonly recognized mechanisms of blast-related injuries; however, this study focuses on the primary mechanism — the direct effect of the overpressure

from the blast wave. Particular attention is given to the effects of sub-threshold overpressure, i.e., pressure levels that do not, by themselves, result in clinically diagnosed injury after a single blast but may exert a cumulative effect on brain function.

Studies indicate that even sub-traumatic overpressure exposure is associated with the emergence of negative symptoms and decreased cognitive performance in military personnel. Specifically, reports describe a syndrome sometimes referred to in the literature as “breacher’s brain”, which includes sleep disturbances, cognitive deficits, and headache. These symptoms may reflect changes in neuronal and vascular function induced by the mechanical forces of the blast wave, which do not reach the threshold of overt injury.

Factors modulating the severity of these effects include sleep quality and the duration of military service. Insufficient sleep and prolonged exposure to high-risk environments are believed to exacerbate cognitive impairments both in the acute post-exposure period and over the long term. This supports the hypothesis that neurocognitive changes following sub-threshold overpressure are multifactorial, depending on the interaction of physiological and environmental predictors. Sleep disturbances observed among military personnel — such as deprivation, superficial or fragmented sleep, and disrupted circadian rhythms — are further compounded by military service conditions. These disturbances provide a negative substrate for cognitive decline, emotional instability, development or exacerbation of somatic disorders, and increased resistance to psychotherapeutic and pharmacological interventions, cumulatively affecting brain structural integrity and amplifying the consequences of TBI.

Overall, combat situations — due to their unpredictability or chronic exposure — induce states of exhaustion accompanied by sleep disturbances, irritability, attention deficits, impaired concentration, and reduced memory performance, caused by prevailing inhibitory processes in the brain. These factors may increase the risk of injury, including TBI, among service members [12, 13].

Even in the absence of a diagnosed TBI, sub-threshold exposure to blast overpressure can result in persistent cognitive dysfunction and symptoms, underscoring the need for further research into underlying mechanisms and the development of strategies for early detection and prevention [14]. Longitudinal observation may reveal delayed manifestations of blast-related injury, reflecting post-traumatic changes in brain structures.

Study results indicated that mild TBIs caused by high-intensity blasts were associated with a significantly higher number of neurological symptoms upon return from deployment and approximately six months thereafter. While the overall intensity of symptoms decreased with a similar trajectory regardless of injury mechanism, marines exposed to high-intensity blasts continued to report elevated levels of neurological symptoms. Furthermore, those exposed to low-intensity blasts during service also exhibited persistent neurological symptoms post-demobilization.

These findings suggest that blast-induced brain injuries may differ from impact-related injuries and highlight the importance of thorough clinical evaluation and individu-

alized symptomatic management in military personnel exposed to blast trauma [15].

For a long time, the scientific community held the view that consciousness disturbances caused by TBI impede the formation of traumatic memories, thereby reducing the likelihood of developing PTSD. However, recent studies challenge this notion, demonstrating that PTSD can develop even in the presence of TBI.

This phenomenon can be explained by several mechanisms, including unconscious encoding of the affective and sensory components of the traumatic experience (visual images, odors), partial conscious recall of certain fragments of the event, and reconstruction of traumatic memory based on secondary information (accounts from witnesses or family members). Additionally, the retention of memory regarding the circumstances surrounding the traumatic event, which may themselves be highly distressing, plays an important role. In military personnel, this set of factors is more extensive, and the risk of developing PTSD depends not only on the severity of TBI but also on the conditions under which it occurred, the intensity of combat stress, and prior psycho-emotional experiences.

At the same time, clinical differentiation between the consequences of TBI and manifestations of acute stress reaction or PTSD is challenging. Immediate trauma effects, such as disorientation, confusion, attentional deficits, and somatosensory disturbances, can mimic symptoms of mild TBI or acute psychotraumatic reactions. In cases without loss of consciousness, these states are particularly difficult to distinguish, as impairments in event recall may result both from neurophysiological changes caused by TBI and from emotional and psychophysiological responses to psychological trauma. The coexistence of organic and psychogenic mechanisms necessitates a comprehensive clinical approach to the diagnosis and subsequent rehabilitation of military personnel with combat-related trauma [16].

Researchers have conducted studies to determine lesion localization in patients with similar clinical symptoms using neuroimaging methods, subsequently mapping these lesions onto a standard brain atlas. Further analysis using the human connectome revealed that lesions provoking epileptic seizures are integrated into a specific functional brain network. This network is characterized by negative functional correlation with cerebellar and basal ganglia regions, highlighting the critical role of subcortical structures in the generalization of focal seizures.

Moreover, alterations in gene expression regulation play a key role in the pathogenesis and progression of secondary generalized tonic-clonic seizures (SGTCS). The combined analysis of neuroimaging and transcriptomic data allows for the identification of the molecular basis underlying these functional changes [17, 18].

Brain lesions are one of the leading causes of epilepsy in adults. The localization and nature of the lesion are closely associated with subtypes of focal epilepsy, reflecting the structural etiology of the disorder. Studies indicate that the lesion site is a key factor in the development of epileptic activity. In particular, cortical lesions are more frequently associated with secondary generalized tonic-clonic seizures,

emphasizing the importance of neuroanatomical localization for predicting seizure type [19].

Brain lesions that provoke SGTCS are localized in specific regions functionally connected with the cerebellum, thalamus, anterior and midcingulate cortices, as well as the middle frontal gyrus. These identified areas demonstrate stability and specificity, underscoring their key role in the pathogenesis of SGTCS and potentially indicating target regions for therapeutic intervention. The formation of cortical scar tissue due to traumatic insults also serves as a precipitating factor for SGTCS.

Through the integration of neuroimaging data and transcriptomic analysis, we identified that local neuronal networks associated with SGTCS correspond to the expression of genes linked to epilepsy. These genes exhibit rich functional characteristics, suggesting the existence of multiscale molecular interactions in the development of SGTCS. The findings provide critical insights into the genetic and molecular mechanisms underlying specific brain regions associated with generalized seizures and open prospects for identifying novel therapeutic targets and developing interventional strategies [20].

Clinical trajectories of comorbidity were highlighted in a study assessing military personnel (mean age at last follow-up: 41.5 ± 8.1 years; 91.0 % male). Optimized clustering revealed four main clinical outcome subtypes:

- cluster 1: multidomain, resilient to cognitive dysfunction, neurobehavioral, and psychological symptoms — 43.0 % of participants;
- cluster 2: resilient to cognitive dysfunction but with elevated neurobehavioral and psychological symptoms — 42.0 %;
- cluster 3: severe cognitive dysfunction with moderately elevated neurobehavioral and psychological symptoms — 5.0 %;
- cluster 4: moderate cognitive dysfunction with severe neurobehavioral and psychological symptoms — 10.0 % of participants.

Among patients in the resilient group, 36.0 % had a history of mTBI due to blast exposure. Longitudinal analysis indicated that clusters exhibited significant temporal differences, particularly in brain volumes. The smallest brain volumes were observed in the cluster with severe cognitive dysfunction and moderately elevated neurobehavioral and psychological symptoms, especially in the cerebellum and brainstem. These data emphasize the importance of assessing not only the heterogeneity of brain injuries but also the diversity of mild TBI outcomes, including cognitive, neurobehavioral, and psychological manifestations that evolve over time [21].

Among 42,000 military personnel with mTBI, 77.6 % had at least one comorbid condition. The cohort was predominantly male (81.4 %), aged 18–24 years (46.1 %), and of European ancestry (64.1 %). Within 180 days prior to mTBI, the most common conditions were sleep disturbances — 21.7 % (insomnia in 11.0 %, sleep apnea in 5.1 %), headache — 19.4 %, PTSD — 17.8 %, anxiety disorders — 11.3 %, depression — 6.1 %, and cervical disorders — 10.9 %. Following mTBI, PTSD prevalence increased to 26.0 % and depres-

sion to 9.2 %. Post-injury, there was a marked increase in visual disturbances (+327.2 %), cognitive impairments (+313.9 %), vestibular disorders (+192.6 %), headache and related symptoms (+152.2 %), and auditory disturbances (+72.9 %). Sleep disturbances exhibited moderate positive correlations with cognitive deficits, anxiety disorders, PTSD, and headache, highlighting the multidomain nature of comorbid outcomes following mTBI in military personnel [22].

Acute concussion is associated with a broad spectrum of somatic, cognitive, and behavioral symptoms. However, these manifestations are not specific to concussion and may reflect exacerbations of pre-existing somatic or psychiatric conditions. While most symptoms resolve within days or weeks, persistent manifestations beyond the typical recovery period may be influenced by comorbid conditions and psychosocial factors. In military personnel, the risk of developing additional somatic and psychiatric conditions is heightened by service-specific factors, including combat injuries and blast-related trauma, which are frequently accompanied by musculoskeletal injuries. Secondary acute stress reactions triggered by traumatic experiences, lack of adequate rest and nutrition, physical exertion, environmental constraints, additional noise exposure, and delayed access to qualified medical care in operational settings can further contribute to or exacerbate existing psychiatric disturbances, affecting overall clinical outcomes [23, 24].

A retrospective review of medical records from 40 military personnel who experienced acute concussion during deployment revealed that headache was the most common symptom (98.0 %), followed by insomnia, tinnitus, impaired attention, nausea, dizziness, anxiety, balance disturbances, depression, and hearing loss. The most frequent comorbid conditions were acute injuries, acute stress reactions, and recent overuse of medications. Chronic comorbidities and conditions included chronic headache, tinnitus, rapid fatigue and exhaustion, irritability, anxiety, depression, insomnia, and post-traumatic stress disorder. Service members with three or more comorbidities were more likely to require evacuation from the combat zone.

Prior to deployment, 63.0 % of personnel reported headaches, and 12.5 % had a documented history of migraine. Among those with pre-deployment headaches, 84.0 % exhibited migraine features or triggers, predominantly as infrequent episodes (60.0 %). Post-injury, daily post-traumatic headaches were observed in 68.0 % of participants and often corresponded to typical migraine phenotypes; 42.0 % received triptans, of which 75.0 % demonstrated a positive therapeutic response. Concussion in combat settings rarely occurs in isolation. Comorbidities are common and significantly influence clinical progression and recovery. Post-traumatic headaches frequently exhibit migraine phenotypes and may be modified by a prior history of migraine attacks. Comprehensive history-taking and detailed evaluation of comorbid conditions are essential for accurate symptom characterization, diagnostic optimization, and improved clinical management of military personnel following acute concussion [25].

Sleep disturbances are prevalent in military service and are generally exacerbated during combat due to increased operational demands, stress factors, and physical injuries. In particular, sleep disturbances are commonly observed following combat-related TBI. However, data on the prevalence of sleep disorders depending on the injury mechanism — high-intensity blast versus direct head impact — remain limited.

The prevalence of sleep disturbances in military personnel with probable TBI post-deployment is substantial, especially among those with PTSD or depressive disorders, reflecting the presence of insomnia as a symptom of these conditions. Individuals with blast-related concussion report sleep problems more frequently compared to those with injuries from direct impact. Comorbid psychiatric conditions, particularly PTSD and depression, as well as gender and socio-economic factors, significantly influence sleep disturbance manifestations. There is a synergistic interaction between blast-related TBI and PTSD, highlighting the high risk of sleep disorders among individuals with such combination of factors. These findings underscore the importance of a comprehensive approach to the assessment and management of sleep disturbances following TBI, taking into account TBI as one of the leading causes of morbidity and mortality among military personnel in modern conflicts, with blast injuries remaining the primary mechanism of injury. However, factors that increase the risk of mTBI following high-intensity blasts remain insufficiently studied. A study analyzed data from over 100,000 U.S. Marines assessed for health status after deployment in 2003 and 2008, with approximately 13,000 individuals included in the final analysis who had at least one documented qualifying exposure. The results indicated that blast exposure and high occupational stress were independent risk factors for mTBI, with the combination of both representing the strongest predictor of injury. This finding suggests that occupational stress may exacerbate the effects of blast trauma. Further research is focused on evaluating mTBI severity, symptom profiles, and long-term outcomes according to injury mechanism and occupational risk [27].

TBI studies have shown that the mechanism of injury — high-intensity blast versus direct head impact — significantly influences injury severity, symptom spectrum, and recovery trajectory. Health assessments of U.S. Marines (2008–2017) were analyzed, with concussions classified according to mechanism and symptom clusters: neurological, musculoskeletal, and immunological. Logistic regression indicated that even mild concussion, regardless of mechanism, was associated with a significant increase in symptom prevalence. Blast injuries were predominantly linked to neurological manifestations (tinnitus, hearing loss, headache, cognitive impairments), whereas impact injuries were associated with immunological symptoms (rashes, chest pain, respiratory difficulties). Independent of PTSD status, blast injury remained a risk factor for neurological disturbances. These findings underscore the critical role of injury mechanism in shaping physiological brain changes and may inform refinement of diagnostic criteria and development of targeted therapeutic strategies [28].

Research has also examined the impact of injury mechanism — high-powered blast or head impact — on persistent sleep disturbances in military personnel post-deployment. Self-reported sleep problems and associated risk factors were analyzed, including concussion, PTSD, depression, alcohol use, post-deployment sleep disturbances, and interactions with sex and pay grade. Almost all factors, except sex, were associated with increased likelihood of persistent sleep disturbances. The strongest association was observed between post-deployment sleep problems and persistent disturbances, with blast-related head injury having the most significant effect, particularly in combination with PTSD and depression. High-powered blast exposure was more strongly associated with persistent sleep disturbances than impact injuries, highlighting the need for targeted monitoring and intervention for affected personnel [29].

Blast exposure is an increasingly prevalent occupational hazard for military personnel in contemporary conflicts. Numerous preclinical and clinical studies demonstrate that blast waves directly affect brain structure and function, even in the absence of other injury mechanisms, such as impact or head acceleration/deceleration. Studies of low-level blast exposure, which does not induce head movement, have confirmed that the physical properties of the blast wave itself constitute a critical mechanism of injury. Similarly, studies of service members who violated safety protocols during explosive training revealed alterations in brain structure and function, gene expression, and blood biomarkers, indicating harmful effects even from low-level exposure. In humans, blast exposure is associated with changes in brain structure and function, cognitive impairment, and exacerbation of psychiatric and medical symptoms. These effects occur independently of the presence of PTSD or TBI, suggesting that blast exposure alone may represent an independent mechanism of neurotrauma, alongside blunt impact or head acceleration/deceleration [30].

The results demonstrated that exposure to high-intensity blasts was associated with multiple TBI diagnoses, conditions complicating TBI course, as well as psychiatric disorders. In contrast, low-intensity blast exposure was associated with only a single TBI diagnosis, several brain injury-related conditions, and two psychiatric disorders. Furthermore, a significant interaction between high- and low-intensity exposures was observed for certain TBI-related conditions and several psychiatric disorders, suggesting a potential cumulative effect [31].

TBI, most frequently resulting from high-intensity blast exposure, remains one of the leading causes of medical evacuation among U.S. military personnel during recent conflicts. Identifying risk factors for TBI is crucial for injury prevention and long-term health maintenance in service members. Previous self-report-based studies have suggested that low-level blast exposure may act as a risk factor, increasing susceptibility to TBI and associated symptoms.

This study conducted a large-scale population analysis across all military service branches to investigate the association between occupational risk of low-level blast exposure and clinically diagnosed TBI — including mild, moderate, severe, and penetrating injuries — as well as conditions

commonly accompanying concussion. Utilizing archival medical and occupational records from over two million service members spanning 2005–2015, the study found that occupational risk related to blast exposure correlated with increased likelihood of any TBI, cognitive impairments, hearing and speech problems, headache, psychiatric disorders (including anxiety, post-traumatic stress disorder, delirium, and dementia), substance and alcohol use disorders, tinnitus, fatigue, and migraine. The broad spectrum of blast-related outcomes highlights the need for a comprehensive approach to assessment and management. A thorough understanding of blast exposure effects not only improves medical support and preventive measures for military personnel but also informs evidence-based policy, tailored clinical protocols, and training programs aimed at maintaining health and operational readiness [32].

A study analyzing TBI outcomes among service members found that, among individuals aged 18–24 at the time of service completion, the majority were male (89.0 %), with 12.6 % having at least one documented TBI in medical records. The findings demonstrated a significant increase in the incidence of psychiatric disorders following TBI compared to corresponding time intervals in personnel without a history of TBI.

Notably, the most pronounced increases were observed in mood disorders (67.7 vs. 37.5 %) and substance use disorders (100 vs. 14.5 %). Analysis of temporal characteristics of suicidal behavior revealed that service members with a history of TBI experienced shorter times to suicidal events, both directly and indirectly mediated by comorbid psychiatric disorders. Specifically, for newly diagnosed adjustment disorders, time to suicidal event was 16.7 % shorter compared to individuals without TBI. Indirect effect analyses demonstrated statistically significant mediation, with the strongest influence observed for substance use disorders, where time to suicidal event was reduced by 63.8 % in service members with a history of TBI. A history of TBI is associated with increased risk of developing new psychiatric disorders and suicidal behavior through both direct and indirect mechanisms. These findings underscore the importance of a comprehensive approach to assessing cumulative risk resulting from multiple combat exposures and implementing evidence-based preventive and rehabilitative interventions targeting key pathophysiological mechanisms and comorbid psychiatric conditions [33, 34].

In a cohort of service members, predominantly from the Army (72.0 %) and Marine Corps (25.0 %), with a mean age of 25.5 ± 6.1 years, the prevalence of moderate-to-severe TBI was 31.6 %. The primary mechanism of injury was blast exposure, accounting for 78 % of cases. Additionally, 71 % of participants were diagnosed with at least one serious psychiatric disorder. Adjusted risk analyses demonstrated that TBI was associated with an increased likelihood of developing a range of psychiatric conditions, from a moderate increase in the incidence of anxiety disorders to a significant elevation in the risk of cognitive dysfunction. Overall, the presence of TBI correlated with a higher number of documented psychiatric diagnoses. These findings indicate that combat-related TBI exerts a complex negative impact on the mental health

of severely injured service members. In this context, timely identification and treatment of trauma-related psychiatric disorders are critically important to improve long-term outcomes during transitions to post-deployment care systems, including those within the Department of Defense, veterans' affairs agencies, and civilian healthcare systems [35].

PTSD and depression are among the most prevalent psychiatric disorders in service members and veterans. Studies indicate that 14–16 % of U.S. service members who participated in combat operations in Iraq and Afghanistan suffer from PTSD or depression. Other significant issues include suicide, TBI, and substance use disorders, which have far-reaching consequences for service members and their families. Active deployment and transition periods further increase the risk of psychiatric disorders. PTSD, first codified in DSM-III (1980), manifests as re-experiencing traumatic events, avoidance of triggers, hyperarousal, sleep disturbances, and cognitive impairments. In 10–20 % of cases, symptoms become persistent and impair functioning. Depression accounts for up to 9 % of outpatient military visits and includes depressed mood, anhedonia, sleep disturbances, appetite changes, psychomotor retardation, cognitive impairment, and suicidal ideation. Following deployment in Iraq and Afghanistan, depression prevalence increased from 11.4 to 15 %. Veterans are at elevated risk of suicide, with more than 6,000 deaths annually — 1.5 times higher than among non-veterans. Risk is particularly high during the first year post-discharge. Suicide rates in the U.S. Armed Forces doubled between 2000 and 2012 and have since stabilized at 19.7 per 100,000 people per year.

Alcohol and other substance misuse is common among service members and veterans, often driven by misperceptions of stress relief, improved sleep, analgesic effects, or social facilitation. Psychiatric and behavioral disorders due to alcohol or substance use are associated with a high risk of medical, psychiatric, interpersonal, and occupational consequences. Studies show that approximately 30 % of completed suicides and 20 % of risk-related deaths among service members are linked to alcohol or drug consumption. Dependence, the most severe stage of substance use disorders, is characterized by compulsive seeking and use of substances despite a desire to quit, resulting in significant social and physiological impairments. Vulnerability to alcohol misuse is observed in the context of a history of TBI, which, on a compromised organic substrate, leads to rapid, persistent, and irreversible changes, increasing disability and mortality. Overall, mental health among service members and veterans — including PTSD, depression, and suicide — is highly prevalent, closely linked to combat experience, and has long-term impacts. These findings underscore the need for comprehensive assessment, early diagnosis, and targeted interventions to mitigate risks for both service members and their families [36].

Elevated manifestations of hyperarousal and re-experiencing symptoms in the context of repetitive or blast-related mTBI have been associated with decreased cognitive performance, particularly in information processing speed, as reported by S.M. Jurick (2021). These findings support the synergistic impact of specific PTSD symptom clusters and

TBI characteristics on long-term cognitive deficits, emphasizing the importance of an integrated assessment of both mental health and neurocognitive status in veterans with brain injuries [37].

In veterans with mTBI and/or PTSD, cognitive test results demonstrate weaker correlations with daily functioning compared to mood indicators and post-concussive symptoms. It suggests that, in this population, cognitive deficits detected through formal neuropsychological assessments may not fully reflect real-world adaptive capacity. Instead, emotional state, including symptoms of depression, anxiety, and post-concussive manifestations, has a more direct influence on veterans' ability to perform everyday tasks, maintain social interactions, and integrate into civilian life. This phenomenon may be driven by the comorbidity of PTSD and mTBI, when psycho-emotional symptoms exacerbate subjective functional difficulties, even in the presence of relatively preserved cognitive performance. Therefore, evaluating cognitive function alone, without considering psycho-emotional state and post-concussive symptoms, may underestimate the real-world limitations experienced by veterans. These results highlight the need for a comprehensive approach to clinical assessment and rehabilitation that integrates cognitive, psychological, and functional evaluations to develop individualized recovery programs [38].

TBI is associated with an increased risk of cognitive impairment and neurodegenerative diseases, post-traumatic epilepsy, chronic traumatic encephalopathy, and dementia. Contemporary epidemiological studies indicate that a history of TBI is linked to nearly a 70.0 % lifetime increase in dementia risk. The risk is particularly high among younger individuals and males, suggesting potential influences of age, sex, and geographic factors. The consequences of TBI extend beyond cognitive deficits and include chronic motor, psychiatric, and social limitations that reduce quality of life. This underscores the urgent need for preventive measures aimed not only at reducing the incidence of TBI but also at minimizing long-term neurocognitive sequelae. To optimize early diagnosis and monitoring of TBI at the public health level, the implementation of systematic registries and advanced case-tracking methods is crucial. Such approaches enhance the quality of epidemiological data, ensure the generalizability of findings, and provide a foundation for targeted prevention and early intervention strategies aimed at reducing dementia risk following TBI [39].

Longitudinal studies on the adaptation of service members to civilian life indicate that military discharge represents a critical period of increased risk for psychiatric, neurobehavioral, and social functioning difficulties. Results demonstrate that veterans experience poorer overall disability outcomes, more pronounced neurobehavioral symptoms, and higher psychiatric burden — including PTSD and depression — compared to active-duty service members. Veterans with a history of mild TBI, particularly blast-related injury, are especially vulnerable. In this group, there is a higher likelihood of discharge within five years and more pronounced post-traumatic symptoms, suggesting a synergistic effect between injury characteristics and psychiatric burden. Meanwhile, cognitive performance in discharged

veterans remains relatively preserved, indicating a dissociation between neurobehavioral and cognitive deficits and their impact on daily functioning.

Successful adaptation to civilian life after military service depends on the complex interplay of multiple factors: prior psychiatric and emotional difficulties, availability of social (especially family) and community support, individual characteristics, and specific consequences of combat-related injuries, including mTBI. Veterans with a history of blast injury and persistent neurobehavioral symptoms may face substantial challenges in transitioning to civilian life due to changes in social structure, lifestyle, and personal identity. These findings highlight the need for a comprehensive approach to veteran support, integrating psychiatric, neurobehavioral, and social assessment, along with the development of individualized rehabilitation programs. Systematic monitoring and early intervention can mitigate long-term adverse effects of TBI and psychiatric disorders, facilitate reintegration, and improve post-service quality of life [40].

Service members and veterans face unique risk factors for cognitive impairment and dementia. Traumatic brain injury and post-traumatic stress disorder are more prevalent in military contexts, with moderate to severe TBI being associated with an increased risk of Alzheimer's disease, whereas the relationship between PTSD and dementia remains insufficiently explored. Blast injuries, combat exposure, and chemical exposures may interact with TBI and PTSD, exacerbating the risk of cognitive decline. Sleep disturbances, commonly accompanying TBI, PTSD, or combat experiences, may also increase the likelihood of dementia. Understanding the cognitive health of military personnel requires considering the multifactorial nature of risk and systematically investigating TBI, PTSD, combat deployments, and sleep disturbances, enabling the development of effective prevention and early intervention strategies [41].

Assessment of frontal lobe TBI outcomes in service members has traditionally focused on neurobehavioral, cognitive, and psychiatric measures; however, gross and fine motor function are also critically important for occupational performance. A longitudinal analysis of 19 cognitive and motor measures at 1, 5, and 10 years post-frontal TBI revealed persistent slowing of gross motor function (7-meter walk test) across all time points. Fine motor skills showed delayed performance at 1- and 5-year intervals, with partial recovery by 10 years. These subclinical but functionally significant changes highlight the importance of maintaining movement speed, coordination, and reaction time. Even minor motor slowing can increase injury risk and reduce operational effectiveness. The findings support the need for early interventions and rehabilitation programs to restore functional capacity and optimize combat readiness [42].

Brain injuries that provoke focal epileptic activity often initially localize to a limited cortical region, after which activity may spread to other cerebral regions and subcortical structures, including the thalamus, basal ganglia, and cerebellum. Numerous studies indicate that a key mechanism for the generalization of focal seizures is disruption of structural integrity and functional connectivity within thalamo-cortical circuits and basal ganglia. Such disruptions lead to

synchronization of pathological electrical activity between cortical and subcortical regions, promoting seizure propagation and the development of secondary generalized seizures [43, 44].

Theoretically, epileptic activity can arise in any brain region. If lesions maintain sufficient functional connections with distant regions, almost any epileptogenic neuronal population in the central nervous system may initiate symptomatic seizures and, under certain conditions, lead to SGTCS. In practice, however, not all lesions provoke SGTCS. Factors determining a lesion's capacity to trigger generalized seizures remain partially undefined and include lesion location, network topology, synaptic and neuronal organization, and interactions with subcortical structures. Lesions located within the same anatomical region do not always produce identical clinical symptoms. Specific symptoms may be associated with multiple anatomical areas, highlighting the complexity of mapping brain structure to clinical manifestations and the necessity of considering individual variability in functional networks when predicting lesion outcomes [45].

In a study by A.V. Shvets (2020), participants included service members engaged in combat operations during the Anti-Terrorist Operation/Joint Forces Operation (average deployment duration 15.5 ± 2.0 months, mean age 32.0 ± 1.3 years) who sustained mild closed TBI in 2019 and were treated at a military mobile hospital. Among them, 66.7 % also experienced barotrauma (first group), while the remainder had isolated TBI (second group). Anamnestically, 88 % had brief loss of consciousness up to 10 minutes; in cases combined with barotrauma, 91 % of injuries were due to mine or blast exposure. Post-treatment outcomes demonstrated significant improvement: normalization of cognitive function occurred in 86 % of participants in the first group. Moderate affective symptoms decreased from 43 to 4 % in the first group and from 36 to 7 % in the second group. Severe depression in the second group (14 %) resolved after rehabilitation, and anxiety symptoms were eliminated in all participants. The duration of treatment was 10–14 days. The study confirms that combined TBI and barotrauma lead to more pronounced cognitive and emotional disturbances, while comprehensive rehabilitation effectively mitigates these effects, improving functional status in service members [46].

As a result of the increasing frequency of local conflicts, the number of service members exposed to combat stress has significantly risen; more than half exhibit symptoms of PTSD, and one of the common comorbid injuries is TBI. Moderate to severe disability is observed in approximately 10 % of military personnel, with 62 % of cases related to physical conditions and 27 % to psychiatric disorders. Although TBI accounts for a smaller proportion of disability, it has a substantial impact on functional status, particularly when combined with mental health impairments. Due to limitations in pharmacotherapy, non-pharmacological interventions, including physiotherapy, play a critical role. Comprehensive rehabilitation incorporating high-intensity therapy reduces asthenoneurotic and asthenodepressive symptoms, decreases anxiety, improves neurological status,

vascular function, and cerebral perfusion, and normalizes electrophysiological brain activity. These results emphasize the importance of implementing comprehensive physiotherapeutic programs to reduce disability and enhance functional outcomes in service members recovering from combat-related injuries [47].

The consequences of TBI are multifactorial, determined by a complex interaction of psychophysiological, somatic, and neurological factors; the conditions under which the injury occurs (including combat context and barotrauma); previous TBIs and psychiatric disorders; and the cumulative effect of repeated injuries. Timeliness and completeness of medical care, particularly early rehabilitation, are critical, as are individual psychological characteristics, such as motivation for recovery and active engagement in the rehabilitation process. Clinical manifestations of TBI — like fatigue, cognitive impairments, anxiety and depressive disorders, sleep disturbances — significantly reduce quality of life and may trigger maladaptive coping strategies (e.g., psychoactive substance use, unsystematic analgesic intake), further exacerbating structural and functional CNS changes and increasing the risk of seizures and psychiatric disorders. Among military personnel, the consequences of TBI should be considered within a biopsychosocial framework that integrates organic, psychological, and social factors. Early identification of high-risk groups, inclusion of psychotherapeutic approaches in neurorehabilitation, and prevention of dependency behaviors are promising strategies to reduce symptom burden and improve long-term functional and social outcomes [12, 13].

The biopsychosocial model conceptualizes TBI consequences not as purely organic damage but as the result of interactions among three interrelated domains: biological, psychological, and social. This approach is particularly relevant for service members in whom neurological injuries are often accompanied by emotional, cognitive, and social sequelae of combat exposure. According to the Law of Ukraine “On rehabilitation in the healthcare sector”, multidisciplinary rehabilitation teams include specialists in physical and rehabilitation medicine, physiotherapists, occupational therapists, speech and language therapists, prosthetists and orthotists, psychologists, psychotherapists, rehabilitation nurses, assistants to physiotherapists and occupational therapists [48].

Rehabilitation of service members after TBI requires a comprehensive approach that accounts for the interaction of organic, psychological, and social factors. In this context, three interrelated components can be distinguished:

1. Biological one, which includes mechanical brain injuries, neurophysiological alterations, somatic symptoms, and secondary consequences (e.g., inflammatory processes, perfusion deficits, cognitive impairments). This component forms the primary organic basis of functional deficits following TBI and requires medical and physical interventions, including physiotherapy, occupational therapy, and pharmacological management [49].

2. Psychological one, which encompasses emotional responses to trauma, formation of post-traumatic memory, development of anxiety, depression, and PTSD, as well as

the patient's psychological adaptive resources. In military personnel, these processes are often complicated by comorbidity of TBI and PTSD, necessitating integrated psychotherapeutic interventions and assessment of psycho-emotional status [50].

3. Social one, which concerns the context of reintegration into life after combat, including family support, social integration, employment, access to rehabilitation programs, and community services. The social environment significantly influences motivation for recovery, level of social engagement, and overall quality of life in veterans [51].

The biopsychosocial approach relies on a multidisciplinary team of specialists working in close coordination: rehabilitation physicians, physiotherapists, psychologists, psychotherapists, occupational therapists, social workers, and other relevant professionals. This approach enables comprehensive assessment of patient needs and development of an individualized treatment plan that addresses not only restoration of physical function but also psycho-emotional stability and social adaptation.

In the context of military rehabilitation, integration of the biopsychosocial components contributes to a more accurate diagnosis of functional needs and neurological deficits, early identification and correction of mental health disorders, support of social adaptation following reintegration into civilian life, and reduction of the risk of maladaptation and development of dependent behaviors.

Conclusions

1. TBI accounts for over 80 % of cases among military personnel, causing persistent cognitive, emotional, and behavioral impairments that may last for years.

2. Blast and combined injuries lead to diffuse axonal damage, microvascular dysfunction, and alterations in brain networks, increasing the risk of cognitive and vestibular deficits, seizures, and dementia.

3. PTSD, depression, anxiety disorders, sleep disturbances, and substance abuse are frequently observed; female service members may exhibit more pronounced cognitive and emotional symptoms, highlighting the need for gender-specific approaches.

4. The biopsychosocial model and multidisciplinary rehabilitation — such as medical, cognitive, physical, psychotherapeutic, and social support — combined with national registries and evidence-based protocols contribute to reducing disability and socio-economic consequences.

Promising directions for future research include the development and evaluation of comprehensive biopsychosocial rehabilitation programs for military personnel with TBI, consideration of comorbidity with PTSD, cumulative effects of repeated injuries, and socio-psychological factors to improve long-term functional and social outcomes.

References

1. Chorna VV, Zavodyak AY, Ivashkevych EM, Sivak VM, Slobodyan VV, Lunko O. Severity of injuries in mine-explosive trauma depending on the location of the person at the time of the explosion. *Ukrainian Military Medical Journal*. 2023;4(3):70-77. doi: 10.46847/ujmm.2023.3(4)-070.

2. Chorna VV, Zavodyak AY, Plakhotniuk IM, Lypkan VM, Tomashevskiy AV, Kolomiets VV. Features of injuries from different types of weapons and the location of the person at the time of the explosion. *Zdorovia Natsii*. 2024;2(7):113-121. doi: 10.32782/2077-6594/2024.2/19.
3. Haarbauer-Krupa J, Pugh MJ, Prager EM, Harmon N, Wolfe J, Yaffe K. Epidemiology of Chronic Effects of Traumatic Brain Injury. *Journal of Neurotrauma*. 2021;38(23):3235-3247. doi: 10.1089/neu.2021.0062.
4. Capizzi A, Woo J, Verduzco-Gutierrez M. Traumatic Brain Injury: An Overview of Epidemiology, Pathophysiology, and Medical Management. *The Medical Clinics of North America*. 2020;104(2):213-238. doi: 10.1016/j.mcna.2019.11.001.
5. Bouldin ED, Swan AA, Norman RS, Tate DF, Tumminello C, et al. Health Phenotypes and Neurobehavioral Symptom Severity Among Post-9/11 Veterans with Mild Traumatic Brain Injury: A Chronic Effects of Neurotrauma Consortium Study. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*. 2021;36(1):10-19. doi: 10.1097/HTR.0000000000000574.
6. Swan AA, Kennedy E, Cooper DB, Amuan ME, Mayo J, et al. Comorbidity and polypharmacy impact neurobehavioral symptoms and symptom validity failure among post-9/11 veterans with mild traumatic brain injury. *Front Neurol*. 2023;14:1228377. doi: 10.3389/fneur.2023.1228377.
7. Epstein EL, Martindale SL, Va Mid-Atlantic Mirecc Workgroup, Miskey HM. Posttraumatic stress disorder and traumatic brain injury: Sex differences in veterans. *Psychiatry Research*. 2019;274:105-111. doi: 10.1016/j.psychres.2019.01.097.
8. Kong LZ, Zhang RL, Hu SH, Lai JB. Military traumatic brain injury: a challenge straddling neurology and psychiatry. *Military Medical Research*. 2022;9(1):2. doi: 10.1186/s40779-021-00363-y.
9. Denby E, Murphy D, Busuttill W, Sakel M, Wilkinson D. Neuropsychiatric Outcomes in UK Military Veterans with Mild Traumatic Brain Injury and Vestibular Dysfunction. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*. 2020;35(1):57-65. doi: 10.1097/HTR.0000000000000468.
10. Bryden DW, Tilghman JI, Hinds SR 2nd. Blast-Related Traumatic Brain Injury: Current Concepts and Research Considerations. *J Exp Neurosci*. 2019 Sep 12;13:1179069519872213. doi: 10.1177/1179069519872213.
11. Wang Z, Cheng F, Shi X, Dai J, Jin H, Liu Y. Advance on Blast-Induced Traumatic Brain Injury. *World Neurosurgery*. 2025;199:124115. doi: 10.1016/j.wneu.2025.124115.
12. Pashkovskiy SM, Ordatiy NM, Angelska VYu, Shemet VS, Humeniuk NI. Sleep disturbances as a therapeutic target in comprehensive rehabilitation of servicemen. *Zhurnal Suchasnoi Psykholohii*. 2026;1(40):59-67. doi: 10.26661/2786-7471/2026-1-7.
13. Pashkovskiy SM, Ordatiy NM, Angelska VYu, Shemet VS, Humeniuk NI, Smaglo DV. Medico-psychological aspects of rehabilitation of servicemen with combined somatic and neurological disorders. *Naukovi Perspektyvy*. 2025;6(60):1472-1484. doi: 10.52058/2708-7530-2025-6(60)-1472-1484.
14. LaValle CR, Carr WS, Egnoto MJ, Misistia AC, Sallib JE, et al. Neurocognitive Performance Deficits Related to Immediate and Acute Blast Overpressure Exposure. *Frontiers in Neurology*. 2019;10:949. doi: 10.3389/fneur.2019.00949.
15. Belding JN, Khokhar B, Englert RM, Fitzmaurice S, Thomsen CJ. The Persistence of Blast- Versus Impact-Induced Concussion Symptomology Following Deployment. *The Journal of Head Trauma Rehabilitation*. 2021;36(6): E397-E405. doi: 10.1097/HTR.0000000000000715.
16. Vasterling JJ, Jacob SN, Rasmussen A. Traumatic Brain Injury and Posttraumatic Stress Disorder: Conceptual, Diagnostic, and Therapeutic Considerations in the Context of Co-Occurrence. *J Neuropsychiatry Clin Neurosci*. 2018 Spring;30(2):91-100. doi: 10.1176/appi.neuropsych.17090180.
17. Chang BL, Walker MC, Kullmann DM, Schorge S. Deciphering temporal gene expression dynamics during epilepsy development using a rat model of focal neocortical epilepsy. *Epilepsia*. 2025 Jan;66(1):288-302. doi: 10.1111/epi.18169.
18. Li J, Seidlitz J, Suckling J, Fan F, Ji GJ, et al. Cortical structural differences in major depressive disorder correlate with cell type-specific transcriptional signatures. *Nat Commun*. 2021 Mar 12;12(1):1647. doi: 10.1038/s41467-021-21943-5.
19. Nordberg J, Schaper FLWVJ, Bucci M, Nummenmaa L, Joutsa J. Brain lesion locations associated with secondary seizure generalization in tumors and strokes. *Hum Brain Mapp*. 2023 Jun 1;44(8):3136-3146. doi: 10.1002/hbm.26268.
20. Sun Y, Hu H, Qin L, Chen Z, Su S, et al. Brain connectivity regions of lesions causing focal to bilateral tonic-clonic seizures correlates with gene expression. *Neurobiol Dis*. 2025 Oct 1;214:107031. doi: 10.1016/j.nbd.2025.107031.
21. Mac Donald CL, Barber J, Hunt D, Andre JB, Fann JR, et al. Long-Term Postdeployment Clinical Subtypes of Risk and Resiliency in Brain Injury and Neurodegeneration. *JAMA Netw Open*. 2025 Dec 1;8(12):e2547954. doi: 10.1001/jamanet-workopen.2025.47954.
22. Agimi Y, Hai T, Gano A, Stuessi K, Gold J, et al. Clinical Trajectories of Comorbidity Associated with Military-Sustained Mild Traumatic Brain Injury: Pre- and Post-Injury. *J Head Trauma Rehabil*. 2024 Nov-Dec 1;39(6):E564-E575. doi: 10.1097/HTR.0000000000000934.
23. Lototska-Dudyk UB, Krupka NO, Breydak OA, Chorna VV, Podolyan VM, Ivashkevych EM. Kharchuvannya viyskovosluzhbovtziv Zbroynykh Syl Ukrainy. Vinnytsia: FOP Korzun DY; 2023. 76 p. (in Ukrainian).
24. Lototska-Dudyk UB, Krupka NO, Chorna VV. The current state and organization of military nutrition of Ukrainian Armed Forces in the conditions of Russian aggression against Ukraine. *Naukovy visnyk Uzhhorodskoho universytetu. Seriya "Medytsyna"*. 2023;1(67):89-94. doi: 10.32782/2415-8127.2023.67.16 (in Ukrainian).
25. Scott BR, Uomoto JM, Barry ES. Impact of Pre-Existing Migraine and Other Co-Morbid or Co-Occurring Conditions on Presentation and Clinical Course Following Deployment-Related Concussion. *Headache*. 2020 Mar;60(3):526-541. doi: 10.1111/head.13709.
26. Harrison EM, Chung SY, Englert RM, Belding JN. The Effect of Concussion Mechanism of Injury on Sleep Problems in Active Duty Service Members Following Deployment. *Mil Med*. 2024 Jan 23;189(1-2):e141-e147. doi: 10.1093/milmed/usad197.
27. Belding JN, Fitzmaurice S, Englert RM, Lee I, Kowitz B, et al. Blast Exposure and Risk of Recurrent Occupational Overpressure Exposure Predict Deployment TBIs. *Mil Med*.

2020 Jun 8;185(5–6):e538–e544. doi: 10.1093/milmed/usz289.

28. Englert RM, Belding JN, Thomsen CJ. Self-Reported Symptoms in U.S. Marines Following Blast- and Impact-Related Concussion. *Mil Med.* 2023 Jul 22;188(7–8):e2118–e2125. doi: 10.1093/milmed/usad026.

29. Chung SY, Harrison EM, Englert RM, Belding JN. Effects of Blast- and Impact-Related Concussion on Persistent Sleep Problems. *J Head Trauma Rehabil.* 2025 Jan-Feb 01;40(1):E66–E74. doi: 10.1097/HTR.0000000000000974.

30. Rowland JA, Martindale SL. Considerations for the assessment of blast exposure in service members and veterans. *Front Neurol.* 2024 Apr 15;15:1383710. doi: 10.3389/fneur.2024.1383710.

31. Martindale SL, Kolaja CA, Belding JN, Liu L, Rull RP, et al. Blast exposure and long-term diagnoses among veterans: a millennium cohort study investigation of high-level blast and low-level blast. *Front Neurol.* 2025 Jul 31;16:1599351. doi: 10.3389/fneur.2025.1599351.

32. Belding JN, Englert R, Bonkowski J, Thomsen CJ. Occupational Risk of Low-Level Blast Exposure and TBI-Related Medical Diagnoses: A Population-Based Epidemiological Investigation (2005–2015). *Int J Environ Res Public Health.* 2021 Dec 8;18(24):12925. doi: 10.3390/ijerph182412925.

33. Brenner LA, Forster JE, Gradus JL, Hostetter TA, Hoffmire CA, et al. Associations of Military-Related Traumatic Brain Injury with New-Onset Mental Health Conditions and Suicide Risk. *JAMA Netw Open.* 2023 Jul 3;6(7):e2326296. doi: 10.1001/jamanetworkopen.2023.26296.

34. Zafonte RD, Daneshvar DH, Fisher L. Detangling the Association Between Traumatic Brain Injury, Mental Health, and Suicide in Active Duty Service Members. *JAMA Netw Open.* 2023 Jul 3;6(7):e2327644. doi: 10.1001/jamanetworkopen.2023.27644.

35. Chin DL, Zeber JE. Mental Health Outcomes Among Military Service Members After Severe Injury in Combat and TBI. *Mil Med.* 2020 Jun 8;185(5–6):e711–e718. doi: 10.1093/milmed/usz440.

36. Moore MJ, Shawler E, Jordan CH, Jackson CA. Veteran and Military Mental Health Issues. 2023 Aug 17. In: *StatPearls. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2026 Jan-. NBK572092.*

37. Jurick SM, Crocker LD, Merritt VC, Sanderson-Cimino ME, Keller AV, et al. Independent and Synergistic Associations Between TBI Characteristics and PTSD Symptom Clusters on Cognitive Performance and Postconcussive Symptoms in Iraqi and Afghanistan Veterans. *J Neuropsychiatry Clin Neurosci.* 2021 Spring;33(2):98–108. doi: 10.1176/appi.neuropsych.20050128.

38. Stika MM, Riordan P, Aaronson A, Herrold AA, Ellison RL, et al. Cognition and Other Predictors of Functional Disability Among Veterans with Mild Traumatic Brain Injury and Posttraumatic Stress Disorder. *J Head Trauma Rehabil.* 2021 Jan-Feb 01;36(1):44–55. doi: 10.1097/HTR.0000000000000611.

39. Gardner RC, Bahorik A, Kornblith ES, Allen IE, Plassman BL, Yaffe K. Systematic Review, Meta-Analysis, and Population Attributable Risk of Dementia Associated with Traumatic

Brain Injury in Civilians and Veterans. *J Neurotrauma.* 2023 Apr;40(7–8):620–634. doi: 10.1089/neu.2022.0041.

40. Coppel D, Barber J, Temkin NR, Mac Donald CL. Combat Deployed Service Members by Blast TBI and Service Separation Status 5-years Post-deployment: Comparison of Cognitive, Neurobehavioral, and Psychological Profiles of Those Who Left vs. Those Still Serving. *Mil Med.* 2024 Feb 27;189(3–4):e795–e801. doi: 10.1093/milmed/usad378.

41. Raza Z, Hussain SF, Ftouni S, Spitz G, Caplin N, et al. Dementia in military and veteran populations: a review of risk factors-traumatic brain injury, post-traumatic stress disorder, deployment, and sleep. *Mil Med Res.* 2021 Oct 13;8(1):55. doi: 10.1186/s40779-021-00346-z.

42. Coppel D, Barber J, Temkin NR, Mac Donald CL. Longitudinal Assessment of Selective Motor Dysfunction in Service Members with Combat-Related Mild TBI. *Mil Med.* 2025 Jun 30;190(7–8):e1534–e1542. doi: 10.1093/milmed/usae400.

43. Caciagli L, Allen LA, He X, Trimmel K, Vos SB, et al. Thalamus and focal to bilateral seizures: A multiscale cognitive imaging study. *Neurology.* 2020 Oct 27;95(17):e2427–e2441. doi: 10.1212/WNL.0000000000010645.

44. He X, Chaitanya G, Asma B, Caciagli L, Bassett DS, et al. Disrupted basal ganglia-thalamocortical loops in focal to bilateral tonic-clonic seizures. *Brain.* 2020 Jan 1;143(1):175–190. doi: 10.1093/brain/awz361.

45. Sheppard J, Wynford-Thomas R, Robertson NP. “Navigating the network”: localising the lesion with the advent of lesion network mapping. *J Neurol.* 2023 Dec;270(12):6207–6209. doi: 10.1007/s00415-023-12059-5.

46. Shvets AV, Podolyan YV, Holinko MI. Features of functional state restoration among military personnel after traumatic brain injury combined with acubarotrauma. *Zaporozhye Medical Journal.* 2020;22(3):329–337. doi: 10.14739/2310-1210.2020.3.204905 (in Ukrainian).

47. Babov KD, Zabolotna IB, Plakida AL, Volyanska VS, Babova IK, et al. The effectiveness of high-tone therapy in the complex rehabilitation of servicemen with post-traumatic stress disorder complicated by traumatic brain injury. *Neurol Sci.* 2023 Mar;44(3):1039–1048. doi: 10.1007/s10072-022-06510-0.

48. Law of Ukraine “On Rehabilitation in the Healthcare Sector” No. 1053-IX, as amended on 01 Jan 2026. Available from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1053-20#Text>.

49. Babakhanyan I, Sedigh R, Remigio-Baker R, Hungerford L, Bailie JM. Traumatic brain injury rehabilitation for warfighters with post-traumatic stress. *NeuroRehabilitation.* 2024;55(3):295–302. doi: 10.3233/NRE-230274.

50. Shvets AV, Horishna OV, Deputat YM, Rychka OV, Zhaldak AY, Kikh AY. Prognostic assessment of medical rehabilitation needs among Armed Forces of Ukraine servicemen based on the structure of their combat injuries. *Ukr J Milit Med.* 2022;3(3):110–7. doi: 10.46847/ujmm.2022.3(3)-110.

51. Mykhailenko YV. Psychological rehabilitation and social adaptation of servicemen with post-traumatic stress disorder (PTSD) in post-war society. Qualification work for the degree of Bachelor, spec. C4 “Psychology”. Mykolaiv: Petro Mohyla Black Sea National University; 2025. 96 p. (in Ukrainian).

Received 11.03.2026

Revised 20.04.2026

Accepted 04.05.2026

Information about authors

Viktoriia Petrushenko, MD, DSc, PhD, Professor, Rector, Department of Endoscopic and Cardiovascular Surgery, National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: rector_vnmnu@vnmnu.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-9255-403X>

Valentyna Chorna, MD, DSc, PhD, Captain of the Medical Service of Reserve, Associate Professor, Department of Disaster Medicine and Military Medicine, Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: valentina.chorna65@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-9525-0613>

N. Ordatii, PhD, Assistant at the Department of Medical Psychology and Psychiatry, National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: nordatii@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-8100-2790>

Anatolii Ordatii, PhD, Military Clinical Medical Center of the Central Region, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: ordatii79@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0007-6657-3812>

Conflicts of interests. Authors declare the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

Information about funding. This study was conducted without external funding.

Authors' contribution. V.V. Petrushenko, V.V. Chorna — conceptualization and study design, data collection and analysis, responsibility for statistical analysis, manuscript writing, critical review, final approval of the manuscript; N.M. Ordatii — conceptualization and study design, critical review, final approval of the manuscript; A.V. Ordatii — critical review, final approval of the manuscript.

Петрушенко В.В.¹, Чорна В.В.¹, Ордатій Н.М.¹, Ордатій А.В.²

¹Вінницький національний медичний університет ім. М.І. Пирогова, м. Вінниця, Україна

²Військово-медичний клінічний центр Центрального регіону, м. Вінниця, Україна

Черепно-мозкова травма в умовах сучасних викликів: епідеміологія, механізми ушкодження, гендерні відмінності та довгострокові наслідки (систематичний огляд)

Резюме. Актуальність. Черепно-мозкова травма є однією з провідних причин інвалідності серед військовослужбовців, причому легкі форми становлять понад 80 % випадків і часто супроводжуються тривалими когнітивними, емоційними та поведінковими порушеннями. **Мета:** узагальнити сучасні дані щодо епідеміології, механізмів ушкодження, гендерних відмінностей і довгострокових наслідків черепно-мозкової травми у військовослужбовців в усьому світі на основі метааналізу зарубіжних та вітчизняних наукових досліджень. **Матеріали та методи.** Системний огляд виконаний шляхом метааналізу зарубіжних і вітчизняних робіт, а також контент-аналізу публікацій у наукових базах Scopus, PubMed. Літературний пошук здійснювався за допомогою ключових слів (traumatic brain injury, military personnel, post-concussion syndrome, acubarotrauma, neurobehavioral and cognitive sequelae, suicidal behavior, epilepsy, dementia, disability, rehabilitation). До цього огляду ввійшла 51 стаття, опублікована у 2018–2026 рр. **Результати.** Вибухові й комбіновані травми призводять до дифузного аксонального ураження, мікросудин-

них змін і порушень мозкових мереж, що підвищує ризик судом, когнітивного дефіциту та деменції. Частими психічними наслідками є посттравматичний стресовий розлад, депресія, тривожні розлади й порушення сну, які погіршують соціальну адаптацію, особливо в поєднанні з нейроповедінковими змінами; жінки схильні до більш виражених когнітивних та емоційних симптомів. **Висновки.** Довгострокова реабілітація повинна базуватися на біопсихосоціальної моделі і включати мультидисциплінарну допомогу: медичну, когнітивну, фізичну, психотерапевтичну й соціальну підтримку. Наукова та практична значущість дослідження полягає у впровадженні доказових протоколів, національних реєстрів і програм профілактики для зниження інвалідності й покращення якості життя постраждалих.

Ключові слова: черепно-мозкова травма; військовослужбовці; постконтузійний синдром; акубаротравма; нейроповедінкові та когнітивні наслідки; посттравматичний стресовий розлад; суїцидальна поведінка; епілептичні прояви; деменція; інвалідизація; реабілітація

DOI: <https://doi.org/10.22141/1608-1706.4.27.2026.1102>

V.O. Kuprii¹, O.A. Burianov¹, V.A. Ponyatovskyi¹, V.A. Dubok², A.P. Kusiak³,
Iu.M. Nasieka^{4,5}, V.S. Chornyi^{1,6}

¹Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine

²Frantsevich Institute for Problems of Materials Science, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³Zhytomyr Ivan Franko State University, Zhytomyr, Ukraine

⁴V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

⁵National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

⁶State Institution "Institute of Traumatology and Orthopedics, NAMS of Ukraine", Kyiv, Ukraine

Biofilm infection of orthopedic implants: diagnosis, treatment, and prevention

Abstract. Biofilm infection of orthopedic implants is one of the most challenging problems in modern orthopedics and traumatology, as it combines microbial persistence, limited efficacy of systemic antibacterial therapy, chronic inflammation, impaired osseointegration, implant instability, and functional consequences of treatment. Microorganisms attach to the surfaces of endoprostheses, plates, screws, intramedullary rods, spinal systems, and other fixation devices, forming biofilms that are more tolerant to antibiotics and immune responses than free-living bacteria. This review purposed to summarize current data on the pathogenesis, microbiological spectrum, clinical forms, diagnosis, treatment, prevention, and antibiofilm coating strategies for orthopedic implants. A narrative literature search was performed in four bibliographic databases — PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar — and six publisher platforms: Elsevier, Springer Nature, Wiley, Oxford Academic, MDPI, and Frontiers. Eleven keyword groups were used in English and Ukrainian, publications from 2014 to 2026 were prioritized, and 37 sources were included after two-stage screening of titles/abstracts and full texts. The analysis showed that periprosthetic joint infection (PJI) and fracture-related infection (FRI) share the same biofilm mechanism but differ clinically because in FRI, the implant is also required to maintain fracture stability. Key diagnostic elements include deep tissue sampling, sonication of removed implants, histology, and standardized PJI/FRI criteria, whereas superficial swabs are insufficient for final therapeutic decision-making. Effective treatment requires surgical source control, stable fixation or implant revision, dead-space management, soft tissue coverage, and systemic and local antimicrobial therapy. The review identified 12 main groups of antibiofilm or antimicrobial coating strategies, including antibiotic-releasing systems, antibiotic-loaded hydrogels, gentamicin-coated nails, metal-ion coatings, calcium phosphate-/hydroxyapatite-based systems, antimicrobial peptides, chitosan, nanostructured surfaces, and smart pH- or enzyme-responsive coatings. Multifunctional coatings based on bioactive glass, calcium phosphate, hydroxyapatite, silver, antibiotics, hydrogels, or combined systems are especially promising because they can inhibit early bacterial adhesion, reduce biofilm formation, and support osseointegration. However, most available evidence remains preclinical or clinically limited, and further validation is required before routine use in orthopedic traumatology.

Keywords: biofilm; orthopedic implants; periprosthetic joint infection; fracture-related infection; antibiofilm coatings; review

Introduction

Orthopedic implants are an important component of modern musculoskeletal surgery and are used across all its fields. Endoprostheses, plates, screws, intramedullary rods, spinal systems, external and internal fixators can be used to restore limb anatomy, stability, support, and function. Implantation

of a foreign material creates a microenvironment in which the structure's surface can serve as a substrate for bacterial adhesion. After implantation, the material's surface is rapidly covered with plasma proteins, fibrin, extracellular matrix, and cellular components. This conditioning layer can help microorganisms attach to the tissue and begin biofilm formation.

© «Травма» / «Trauma» («Травма»), 2026

© Видавець Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2026

Для кореспонденції: Чорний Володимир Сергійович, кандидат медичних наук, доцент, кафедра травматології та ортопедії, Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, бульв. Тараса Шевченка, 13, м. Київ, 01601, Україна; e-mail: oncoortoped@gmail.com

For correspondence: Volodymyr S. Chornyi, PhD in Medicine, Associate Professor, Department of Traumatology and Orthopedics, Bogomolets National Medical University, Taras Shevchenko boulevard, 13, Kyiv, 01601, Ukraine; e-mail: oncoortoped@gmail.com

Full list of authors information is available at the end of the article.

Unlike acute soft tissue infection, implant-associated infection can be latent, chronic, or recurrent. This is due not only to the pathogen's virulence but also to the biofilm's unique features. The biofilm protects bacteria from antibacterial agents, phagocytosis, complement, and other immune responses. Therefore, the typical *in vitro* susceptibility of a pathogen to an antibiotic does not always reflect the drug's actual efficacy once a biofilm has formed.

In clinical practice, biofilm infection can occur in periprosthetic joint infection (PJI), infection after osteosynthesis, fracture-related infection (FRI), infection of other implants, or infection around external fixation devices. Although the general biofilm mechanism is the same, this is not the case in the clinical context. In periprosthetic infection, the problem is infection of a permanent implant, whereas a fixator is a temporary but valuable tool for stabilizing a fracture. Therefore, premature removal of the fixator can lead to loss of stability, nonunion, and the need for complex reconstruction.

The problem is also important because even with surgical intervention and antibiotics, implant-associated infection is not eliminated. When a biofilm forms, treatment often requires repeated interventions, prolonged antibacterial therapy, revision osteosynthesis or arthroplasty, soft tissue reconstruction, and local antimicrobial measures. For FRIs, international recommendations focus on debridement of the fracture, its stabilization, and control of bone and soft tissue defects.

What is the scientific novelty and relevance of this review? Most reviews address either periprosthetic joint infection or biofilm formation in general. At the same time, for orthopedic traumatology it is important to analyze biofilm infection both as a microbiological problem and as a function of three components: the microorganism, the implant surface, and osseointegration. This three-component model demonstrates why, in FRI, treatment cannot be limited to eliminating pathogens alone.

It is relevant to combine three areas: modern biofilm infection of orthopedic implants, the features of FRI in traumatology, and the possibilities of various antibiofilm coatings. This is especially relevant for the development of bioactive glass materials and calcium phosphate (CaP) and hydroxyapatite (HA) coatings with antimicrobial agents, as these coatings can also be used to modify bacterial attachment, biofilm formation, and osseointegration.

It is important to evaluate them in a broader context: cytocompatibility, effect on osteoblasts, coating stability, mechanical properties of the bone-implant system, antibacterial properties, potential for clinical application, and level of evidence.

The purpose. This review article aims to analyze the existing scientific literature on biofilm infections of orthopedic implants in orthopedics and traumatology, regarding pathogenesis, microbiological spectrum, clinical forms, diagnostic criteria, treatment options, and prevention. An additional aim is to analyze antibiofilm coatings for orthopedic implants in terms of their mechanisms of action, advantages, limitations, level of evidence, and potential applications in traumatology.

Materials and methods

The research was performed as a narrative literature review of biofilm infection of orthopedic implants. The literature search was conducted in the PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar databases, as well as in the scientific collections of the publishers Elsevier, Springer Nature, Wiley, Oxford Academic, MDPI, and Frontiers. The following search terms and their combinations (in English and Ukrainian) were used: “biofilm”, “orthopedic implant”, “periprosthetic joint infection”, “fracture-related infection”, “implant-associated infection”, “sonication”, “antibacterial coating”, “antibiofilm coating”, “calcium phosphate coating”, “bioactive glass”, and “osseointegration”. Publications in English and Ukrainian were included in the analysis. Original clinical studies, experimental works, systematic reviews, meta-analyses, consensus documents, and clinical guidelines were considered. Preference was given to sources from the last 5–10 years (2014–2026); however, earlier fundamental works were also included when of methodological or conceptual significance. Source selection was carried out in two stages, based on relevance and scientific significance: titles and abstracts were assessed first, followed by full texts, in accordance with the inclusion and exclusion criteria. As a result of the selection, 37 sources were included in the review, among them classic works on biofilms, the Infectious Diseases Society of America (IDSA) guidelines on periprosthetic infection, the European Bone & Joint Infection Society (EBJIS) definition of PJI, consensus documents on FRI, and studies on the sonication of removed implants [1–16].

Inclusion criteria: relevance to orthopedic implant-associated infection; data on biofilm, diagnosis, treatment, prevention, or implant coatings; scientific significance of the source. Exclusion criteria: publications without an abstract, duplicates, sources without a clear methodology, works unrelated to orthopedic implants, or studies that did not provide data relevant to the review topic.

Since the article is a narrative rather than a systematic review, a quantitative meta-analysis was not performed. The subject matter was used to categorize the sources into the following areas: biofilm pathogenesis, microbiological spectrum, clinical types of infection, diagnosis, treatment, prevention, and antibiofilm coatings.

Results

Biofilm: definition and pathogenesis

A biofilm is a community of microorganisms attached to a biological or artificial surface within an extracellular polymeric matrix. The matrix consists of polysaccharides, proteins, lipids, extracellular DNA, ions, and other components that provide mechanical stability, protection, intercellular communication, and attachment to the surface.

Biofilm formation occurs in stages. The first step is the initial adhesion of bacteria to the implant surface. This process depends on the material's properties: roughness, hydrophilicity, electrostatic charge, chemical composition, and micro- and nanotopography. After implantation, the surface of the structure is rapidly covered with plasma proteins and extracellular matrix, thereby promoting bacterial

recruitment. The second stage is irreversible adhesion, during which microorganisms begin to produce a matrix and form microcolonies. The third stage is biofilm maturation with the formation of a complex 3D structure. At this stage, some cells may disperse, creating conditions for the spread or recurrence of infection [1, 2, 13].

It is important to distinguish between antibiotic resistance and antibiotic tolerance in a pathogen. Resistance is due to genetically fixed mechanisms that allow bacteria to grow in the presence of an antibiotic. Tolerance in a biofilm can develop without genetic resistance and may be explained by low metabolic activity, limited drug diffusion, persister cells, and the protective role of the matrix. Current research emphasizes that persister cells can radically alter their metabolic pathways, evading the effects of even the newest antibiotics, thereby necessitating the development of innovative coatings that target these resistant subpopulations [13]. For example, in a clinical setting, an antibiotic shows activity on a standard antibiogram but fails to eliminate the infection in the presence of an implant [2, 17].

In addition to its microbiological aspects, a biofilm also affects the tissue response. Prolonged inflammation around the implant interferes with local vascularization, osteoblast activity, bone remodeling, and the formation of a stable bone-implant contact. In traumatology, this is especially important, since the infectious environment can impair reparative osteogenesis, increase the risk of nonunion, and cause mechanical damage to the fixator.

In biofilm infections, the interactions among bacteria, immune cells, and the implant surface become more complex. Neutrophils and macrophages can play important roles in local inflammation, but microorganisms cannot be completely removed from the surface. This creates a paradox: the inflammatory response persists, yet effective control of the infection cannot be achieved. This is why biofilm infection usually has no pronounced symptoms or a wave-like course.

Microbiological spectrum

The common pathogens of orthopedic implant infections are staphylococci, especially *Staphylococcus aureus*, and coagulase-negative staphylococci (*Staphylococcus epidermidis*). *S. aureus* more often presents with a more acute

course, a strong local inflammatory reaction, a purulent process, and early postoperative infections. Coagulase-negative staphylococci are responsible for low-symptom, chronic, and severe infections [13, 17], as well as infections caused by *Enterococcus faecalis*, Gram-negative bacteria — in particular *Pseudomonas aeruginosa* and members of the *Enterobacterales* — and fungal pathogens (*Candida* spp). In traumatology, the pathogen spectrum is broader because of open fractures, primary wound contamination, necrotic tissue, repeated surgery, and external fixation.

Polymicrobial infections require special attention. They are more common in open fractures, severe soft tissue damage, after repeated revision interventions, or in patients with a prolonged hospital stay. In such situations, a superficial swab cannot be a reliable basis for choosing therapy. Care should be taken to obtain several deep-tissue samples using sterile instruments before starting or changing antibacterial therapy [7].

Not only the type of pathogen is important but also its ability to form a biofilm. Microorganisms with low virulence can cause slow infections with minor laboratory changes, whereas highly virulent pathogens present a more acute picture of purulent inflammation. Interpretation of microbiological results should take into account the clinical situation, the number of positive samples, histological correspondence, and confirmatory criteria of infection.

Clinical forms of implant-associated infections

The most studied form of biofilm infection is periprosthetic joint infection. It occurs after hip, knee, shoulder, or other joint replacement surgery. Depending on the time of onset, the virulence of the pathogen, and the route of infection, PJI may have an acute postoperative, chronic low-grade, or hematogenous course. EBJIS proposed a three-tier diagnostic system: infection is unlikely — all criteria negative; infection is likely — two positive criteria; infection is confirmed — at least one confirmatory criterion present. An important nuance regarding “likely”: clinical signs or elevated C-reactive protein (CRP) alone are insufficient — they must be combined with another positive test (synovial fluid, microbiology, histology, or radionuclide examination) [11, 12, 14].

Fracture-related infection is another important form of infection. It is a response to osteosynthesis and is associated

Table 1. Comparison of periprosthetic joint infection and fracture-related infection

Criterion	PJI	FRI
Primary implant	Joint endoprosthesis	Plate, screw, rod, nail, fixation device
Implant function	Replacement of joint function	Fracture stabilization
Key problem	Infected permanent implant	Infected fixator required for healing
Biofilm	On endoprosthesis components	On the fixator, necrotic bone, and in soft tissue cavities
Surgical strategy	DAIR, one-stage or two-stage revision	Retention, replacement, or removal depending on healing
Diagnostic criteria	EBJIS, IDSA, ICM	FRI consensus criteria
Feature	The implant is usually permanent	The fixator can be removed after healing

Notes: DAIR — debridement, antibiotics, and implant retention; ICM — International Consensus Meeting.

with fracture fixators. In FRI, unlike PJI, the implant is not only a substrate for the biofilm but also a device for fracture healing. Therefore, the decision on its removal or retention should be made taking into account the stability of fixation, bone consolidation, the condition of the soft tissues, and the virulence of the bacteria [6–10, 15].

International recommendations for FRI propose two main surgical procedures: debridement with implant retention and implant removal/replacement. If the fracture has not united but the fixation is stable, debridement can be performed while retaining the construct. If the fracture has united, removal of the implant facilitates elimination of the biofilm. If the fixation is unstable, the construct should be revised, or the fixation method replaced [8, 15].

Other groups include infections of spinal implants, pins, and external fixation rods, as well as post-reconstructive infections of bone defects. In all these cases, the biofilm complicates elimination of the pathogen. Still, the choice of treatment depends on the location, the function of the implant, the possibility of its removal, and the risk of loss of stability.

Diagnosis

Diagnosis of biofilm infection of orthopedic implants should be made at multiple levels. No single clinical, laboratory, or instrumental indicator can definitively confirm or exclude infection. This is especially relevant in low-grade infections, when fever, marked leukocytosis, or elevated C-reactive protein may be absent.

For FRI, an international group of experts proposed dividing the criteria into confirmatory and suggestive ones. Confirmatory criteria indicate the presence of infection. These include a fistula or wound defect communicating with the bone/implant, pus, isolation of the same pathogen from at least two deep samples, and histological (or microscopic)

evidence of infection. Suggestive criteria indicate infection but do not confirm it on their own; further investigation is required [7].

If a deep tissue sample is taken, microbiological analysis should be performed. Superficial swabs should not be used when making the final choice of antibiotic therapy, as they may reflect colonization of the wound or skin. It is best to obtain several individual samples from different areas of the infectious focus using sterile instruments. Sample collection should be performed before initiating empirical antibacterial therapy, unless sepsis or another emergency is present.

Sonication of removed implants is a useful method for diagnosing biofilm infection. The method involves ultrasonic treatment of the implant in a sterile fluid, thereby releasing microorganisms from the biofilm. The classic study by Trampuz et al. showed that sonication of removed hip and knee endoprostheses can be useful for detecting infection in complex cases [4].

Molecular methods, such as polymerase chain reaction (PCR), multiplex PCR, 16S rRNA sequencing, and metagenomic sequencing, can be useful when culture is negative. However, they must be interpreted with caution due to the risk of contamination when identifying DNA from nonviable bacteria, the difficulty of interpreting polymicrobial results, and the lack of full standardization in routine orthopedic practice.

Imaging methods also play an important role. X-ray and computed tomography can assess fixation stability, as well as osteolysis, sequestra, nonunion, or implant malposition. Magnetic resonance imaging (MRI) with metal-artifact reduction techniques can be useful for evaluating soft tissues, abscesses, and osteomyelitis, but this depends on the type of implant, the imaging protocols, and the level of interpretive experience.

Table 2. Main diagnostic approaches to biofilm infection in orthopedics

Method	Assessment	Advantages	Disadvantages
Clinical examination	Pain, fistula, discharge, instability	Available, initial stage	Low specificity in chronic forms
CRP, erythrocyte sedimentation rate, leukocytes	Systemic inflammatory response	Simple, dynamic monitoring	May be normal in low-grade infection
X-ray/computed tomography	Osteolysis, instability, nonunion	Important for mechanical assessment	Does not always distinguish infection from an aseptic process
Magnetic resonance imaging with metal-artifact reduction	Soft tissues, abscess, osteomyelitis	More suitable for soft tissues	Artifacts, availability
Deep tissue cultures	Pathogen and susceptibility	Basis of etiological therapy	False-negative results after antibiotics
Sonication	Microorganisms from the biofilm	Better able to detect biofilm pathogens	Requires implant removal
Histology	Neutrophil infiltration, microorganisms	Confirmation of deep infection	Depends on the protocol
PCR/16S/metagenomics	Microbial DNA	Useful in culture-negative cases	Contamination, complex interpretation

Treatment

Treatment of biofilm infection of orthopedic implants must be thorough. Intensive antibacterial therapy without surgical control of the source of infection is often insufficient because the biofilm protects microorganisms from the effects of the drugs. The treatment strategy should include surgical debridement, removal of necrotic tissue, assessment of implant stability, correction of fixation, management of dead space, soft tissue coverage, and systemic and local antimicrobial therapy [8–10, 16].

In PJI, several main strategies include DAIR, one- and two-stage revision, resection arthroplasty, suppressive antibacterial therapy in selected cases. The use of these strategies depends on symptom duration, implant stability, soft tissue condition, pathogen type, antibiotic susceptibility, and the patient's overall condition [5]. In addition, unconventional therapies are increasingly being considered, particularly the use of bacteriophages or enzymatic disruptors of the biofilm matrix as adjuncts for complex and resistant forms of periprosthetic infection [18].

In the case of FRI, the approach depends heavily on the degree of fracture union. If the fracture has united, removal of the implant can eliminate the surface on which biofilm forms. If the fracture has not united but the fixation is stable, debridement with retention of the construct can be considered. If the fixation is unstable, revision, replacement of the fixator, or other stabilization is required [8, 16].

Antibacterial therapy should be etiological. If there is no immediate need for treatment, empirical microbiological examination of deep tissue samples should be initiated. Once culture results are obtained, treatment should be adjusted according to the antibiogram. The consensus on systemic therapy of FRI states that the duration and composition of antibacterial treatment are determined by the

surgical strategy, in which the implant is retained, replaced, or removed [10]. Recent algorithms emphasize the importance of the earliest possible stabilization and transition to adaptive therapy, based on standardized preclinical biofilm assessment models approved by the latest international consensus [15, 16].

Local antimicrobial therapy is important in cases of soft tissue and bone defects, severe damage to the surrounding soft tissues, or a high risk of recurrence. It is not intended to replace systemic therapy and surgical source control but can be an important part of a comprehensive strategy. The use of local antibiotic carriers enables high drug concentrations in the infection zone, which is especially important under conditions of impaired vascularization [9, 19].

Prevention of biofilm infection

Prevention of biofilm infection of orthopedic implants should not be considered a separate measure but a multi-level strategy covering the preoperative, intraoperative, and postoperative stages. This is especially critical in orthopedic traumatology, where the likelihood of infection depends not only on the presence of an implant but also on the nature of the injury, the degree of soft tissue damage, wound contamination, the stability of fixation, the volume of necrotic tissue, and the patient's general condition.

The first stage of prevention is managing the patient's condition before surgery, if possible. The risk of infection increases with diabetes, smoking, anorexia, obesity, immunosuppression, anemia, vascular disorders, prolonged hospital stay, and previous surgeries. In traumatology, this stage is often limited by the urgency of the intervention, but even under such conditions it is important to assess the overall risk of infection, the severity of soft tissue damage, and the need for staged surgery, temporary external fixation, or ear-

Table 3. Multilevel prevention of biofilm infection of orthopedic implants

Prevention measure	Advantage/goal	Limitations
Preoperative assessment of risk factors, glycemic control, anemia correction, nutritional support	To reduce systemic susceptibility to infection	In trauma, there is often no time for full optimization
Antibiotic prophylaxis: timely administration of systemic antibiotics before incision	To reduce early bacterial contamination	Does not act fully on an established biofilm
Surgical technique: atraumatic handling, hemostasis, and minimization of operative time	Reduction of tissue ischemia and bacterial adhesion	Depends on the complexity of the injury
Debridement: removal of necrotic tissue, reduction of bacterial load	Necrosis and the presence of cavities sustain infection	Excessive resection may create a defect
Stable fixation: adequate osteosynthesis, avoidance of micromotion	Stability promotes union and infection control	In severe infections, replacement of the construct may be required
Soft tissue coverage: early wound closure, flap surgery if necessary	Vascularized tissues improve delivery of immune cells and antibiotics	Requires a multidisciplinary approach
Local antimicrobial agents: hydrogels, cement, calcium sulfate, antibiotic-coated rods	High local drug concentration	Risk of uneven release or resistance
Antibiofilm coatings: bioactive glass, silver (Ag), iodine, CaP/HA, antibiotics, nanostructures, smart coatings	Inhibition of early adhesion and biofilm formation	Most evidence is preclinical or limited clinical

ly involvement of a plastic surgeon to close soft tissue defects.

The second level is intraoperative prevention. It includes timely systemic antibiotic prophylaxis, minimization of surgical duration, adherence to asepsis, careful handling of soft tissues, adequate hemostasis, reduction of devitalized tissue volume, stable fixation, and anatomically justified wound closure. For open fractures, early debridement, removal of nonviable tissue, reduction of bacterial load, appropriate choice of stabilization method, and closure of soft tissue defects are especially important, and, if necessary, the use of vacuum-assisted closure systems.

The third level is the local antimicrobial strategy. Its rationale is to create a high concentration of the antimicrobial agent directly in the risk zone, where systemic antibiotic therapy may be insufficient because of ischemia, scar tissue, necrosis, the presence of cavities, or impaired microcirculation. For this purpose, antibiotic-impregnated cement, calcium sulfate carriers, bioceramics, hydrogels, rods with antibacterial coatings, and other local delivery systems are used [9, 19].

In the context of prevention, it is important to consider local antibiotic therapy as a supplement to high-quality surgery, not as a replacement. No coating, powder, cement, or hydrogel can compensate for inadequate debridement, unstable fixation, or an unclosed soft tissue defect. A modern approach should combine reduction of bacterial load, a stable mechanical environment, vascularized soft tissue coverage, and local antimicrobial protection in high-risk patients.

Antibiotic-releasing hydrogel coatings are of particular interest. In a multicenter randomized study, Malizos et al. reported that a fast-resorbable antibiotic-loaded hydrogel coating applied during internal osteosynthesis of closed fractures was associated with a reduced rate of postoperative infections without any detected negative effect on fracture union [20]. However, these results cannot be automatically extrapolated to all types of fractures and implants, so additional studies in high-risk traumatology groups are needed.

Antibiofilm coatings for orthopedic implants

Antibiofilm coatings for orthopedic implants are one of the best ways to prevent implant-associated infections [21]. They are based on the idea that the first 24 hours after implantation are a critical period during which competition occurs between bacterial adhesion and the integration of body cells. If bacteria initially colonize the implant surface, a biofilm forms that is much less accessible to antibiotics and the immune response. However, if the surface promotes osseointegration while simultaneously inhibiting bacterial adhesion, the risk of infection is theoretically reduced [22–25].

The ideal coating for orthopedic traumatology should have the following functions:

- inhibit bacterial adhesion;
- prevent biofilm maturation;
- be biocompatible;
- not interfere with osteoblast function;
- not impair the mechanical properties of the implant;
- have predictable release of the active agent;

— not contribute to the development of antimicrobial resistance.

For metal fracture fixators, the coating is also important to avoid compromising the primary stability of fixation and to prevent interference with reparative osteogenesis [26–29].

Antibiofilm coatings are currently classified into anti-adhesive, contact-active, releasing, bioactive, osteointegrative, combined, and stimulus-responsive, each characterized by distinct antimicrobial mechanisms. In a systematic review, Kaspiris et al. examined contact and releasing-type antimicrobial coatings for orthopedic implants. Analysis of the results from *in vitro* and *in vivo* studies showed that coated implants exhibit a broad spectrum of antimicrobial activity, manifested as reduced bacterial growth, inhibition of biofilm formation, and preservation or even enhancement of osseointegration processes [22, 29, 30].

Anti-adhesive coatings are useful for reducing the initial attachment of bacteria to the implant surface. They can work by changing the hydrophilicity, charge, or micro- or nanotopography of the surface. The advantage is the absence of direct antibiotic pressure, but the main limitation is insufficient efficacy at high bacterial loads and in the presence of significant wound contamination.

Contact-active coatings are bactericidal because bacteria come into direct contact with the surface. These include surfaces with antimicrobial peptides, quaternary ammonium compounds, cationic polymer groups, or other functional molecules. Their advantage is lower systemic release of the active substance. Contact-active coatings may be less effective when proteins, cell debris, or fibrin are present on the surface.

Releasing coatings contain antibiotics, metal ions, or other antimicrobial agents that gradually penetrate the surrounding tissues. Their advantage is the ability to create a high local drug concentration, much higher than the systemic level. Antibiotic hydrogels, gentamicin-coated nails, antibiotic-containing polymer coatings, silver-containing coatings, and iodine coatings are examples of this method [31]. However, the main problem is control of release: too rapid release can provide a short-term prophylactic effect, whereas subtherapeutic concentrations at the end can theoretically promote the acquisition of resistance by microorganisms [20, 22–24, 29, 32].

Silver-based coatings are among the most studied. Silver ions exhibit broad-spectrum antimicrobial activity and can target bacterial membranes, proteins, enzymes, DNA, and other components. However, silver has a narrow therapeutic window: its antimicrobial activity must be sufficient to inhibit bacteria but not cytotoxic to bone tissue cells. A systematic literature review by Li et al. on the side effects of antibacterial coatings in orthopedics emphasizes that safety is not only a major issue in the treatment of infection but also a determinant of patient outcomes [33]. To overcome this limitation, current developments focus on creating multilayer silver coatings that optimize the ion-release profile, providing a significant reduction in bacterial colonization without the risk of cytotoxicity to the surrounding tissues [34].

Iodine-containing coatings are widely used in antiseptics but are also associated with adverse reactions and the risk

of allergic reactions. Copper- and zinc-based coatings are known for their strong antimicrobial activity and osteomodulating effects but are still studied primarily in preclinical settings due to the risk of dose-dependent toxicity and the lack of clinical data. In orthopedics and traumatology, calcium phosphate-based coatings are especially useful, as they can not only deliver antimicrobial agents but also promote osseointegration. A strong bond between metal and bone tissue is key for fracture fixators in calcium phosphate-based coatings and is extremely important [25–28].

However, a calcium phosphate or hydroxyapatite base alone does not always provide a sufficient antibacterial effect. Therefore, the most promising systems are modified ones: HA/Ag, CaP/Ag, CaP/antibiotic, HA/zinc, HA/copper, CaSO₄/peptides, or multilayer coatings. This enables the combination of osteoconductive activity with local antibacterial action [26–28, 34, 35].

Analysis of trends in the development of antimicrobial surfaces over the past decade confirms a gradual transition from monotherapeutic solutions to the creation of so-called “smart” or stimulus-responsive surfaces that respond to changes in local pH or to bacterial enzymes [25, 29]. Therefore, for coatings of calcium-containing metal fixators, the best approach is to consider them not only as antibacterial but as bifunctional or multifunctional; a coating that prevents early bacterial adhesion, prevents biofilm formation, promotes osseointegration, improves the mechanical stability of the bone-implant system, and does not harm bone cells.

Discussion

Bioactive glass S53P4 deserves special attention. It is a synthetic bone-graft substitute that combines osteoconductive and antibacterial properties. Bioactive glass has its own antimicrobial action without the use of antibiotics. The peculiarity is that pH and osmotic pressure damage bacterial cells and inhibit their growth by disrupting their membranes. Another important aspect is the absence of resistance development by microorganisms, confirmed in particular for *S.aureus* and *S.epidermidis*, *Pseudomonas aeruginosa*, and *Acinetobacter baumannii* [36].

There is a need to expand research and the evidence base with high-quality randomized studies, since the available data come mainly from *in vitro* work. An important aspect of fractures is the combination of the osteostimulating and antibacterial effects of S53P4 in complex cases, in bone defects during reconstruction, and as a first stage in preventing biofilm formation [37].

Antibiofilm coatings are a promising direction but should not be considered a replacement for the principles of high-quality surgery. Their role is to reduce the risk of bacterial adhesion and biofilm formation, especially in high-risk patients. The most promising for traumatology are multifunctional coatings that combine antibacterial and osteointegrative properties. In such situations, calcium phosphate antimicrobial agents and bioactive glass have a strong theoretical and experimental basis for further study and for several experimental models, since they have been little studied in

Table 4. Types of antibiofilm coatings: mechanism of action, advantages, limitations, and level of evidence

Coating type	Mechanism of action	Advantages	Limitations	Level of evidence
Antibiotic release	Local release of antibiotics	High local concentration	Burst release, risk of resistance	Moderate
Antibiotic-loaded hydrogel	Resorbable gel with antibiotic	Versatility of application	Short duration of action	Moderate
Gentamicin-coated nail	Gentamicin polymer coating	Standardized system	Fixed antibiotic	Moderate
Silver-containing coatings	Ag ⁺ , membrane and DNA damage	Broad spectrum	Cytotoxicity, argyria	Moderate
Iodine-containing coatings	Antiseptic oxidative effect	Broad spectrum	Allergic reactions	Low/moderate
Copper/zinc-containing coatings	Ionic effect, oxidative stress	Antimicrobial potential	Dose-dependent toxicity	Low
CaP/HA	Osteoconduction	Osseointegration	Weak intrinsic antibacterial effect	Moderate for osseointegration
HA/Ag or CaP/Ag	Osteoconduction + Ag ⁺	Promising for fixators	Balance of Ag and cytocompatibility	Low/moderate
Antimicrobial peptides	Membrane damage	Potential against biofilms	Degradation, cost	Low
Chitosan	Cationic interaction with the membrane	Biocompatibility	Mechanical stability	Low/moderate
Nanostructured	Change of topography	Antibiotic-free prevention	Complex standardization	Low
Smart coatings	Release triggered by pH/enzymes	Personalized concept	Preclinical level	Low

this context. Great attention should be paid to the translational validity of experimental models. Determining the zone of inhibition of bacterial growth *in vitro* is insufficient to assess a coating's clinical potential. For a reliable assessment of osseointegration under conditions of biofilm infection, it is advisable to use standardized *in vivo* models with prior sample-size calculation, clearly defined endpoints, and assessment of mechanical stability, histological bone-implant contact, bacterial load, and local toxicity. For traumatology, it is also important to study the effect of the coating on bacterial adhesion, mature biofilm formation, osteoblast viability, histological bone-implant contact, pull-out strength, local toxicity, and coating stability after mechanical loading.

The practical significance of this review is its emphasis on the need for early detection of biofilm in implant-associated infections. For the clinician, it is important to obtain not only superficial swabs or nonspecific laboratory markers but also deep tissue samples, histology, and sonication, and to use standardized PJI/FRI criteria.

For the traumatologist, infection control and fracture stability are not the same thing. Osteosynthesis, tissue necrosis, dead space, and soft tissue coverage defects can lead to persistent infection despite appropriately selected antibiotic therapy.

A relevant direction is the study of coatings not only for antibacterial activity but also for various other parameters: biofilm formation, cytocompatibility, osseointegration, mechanical properties, morphometry, and systemic effect.

Periprosthetic and fracture-related infections share the same biofilm mechanism but differ in clinical presentation. The modern understanding of biofilm infection of orthope-

dic implants should shift from the simple bacteria-antibiotic model to a more complex one, bacteria-biofilm-implant-tissue environment-mechanical stability. This model better explains why clinical elimination of infection is often impossible without surgical source control and why the stability of fixation in FRI has both mechanical and infectious significance. This interaction is best regarded as a conceptual model of biofilm infection of orthopedic implants (Fig. 1).

Study limitations

The review has several limitations. First, it is a narrative rather than a systematic review; therefore, it does not include a formal PRISMA scheme, risk-of-bias assessment, or quantitative meta-analysis. The literature on antibiofilm coatings is heterogeneous; most studies are conducted *in vitro* or in animal models, and there is a lack of high-quality randomized clinical trials. Variations in biofilm models, microbial strains, implant materials, and endpoints complicate comparison of coatings.

Nevertheless, the limitations of these studies point to the need for further research to standardize experimental models and endpoints and to move from a purely antibacterial assessment to a full assessment of the implant-biofilm-bone tissue system.

Research perspectives

Future research should focus on three directions. First, it is important to improve the diagnosis of biofilm infections at early stages: sonication should be standardized, molecular methods should be used in clinical settings, and biomarkers

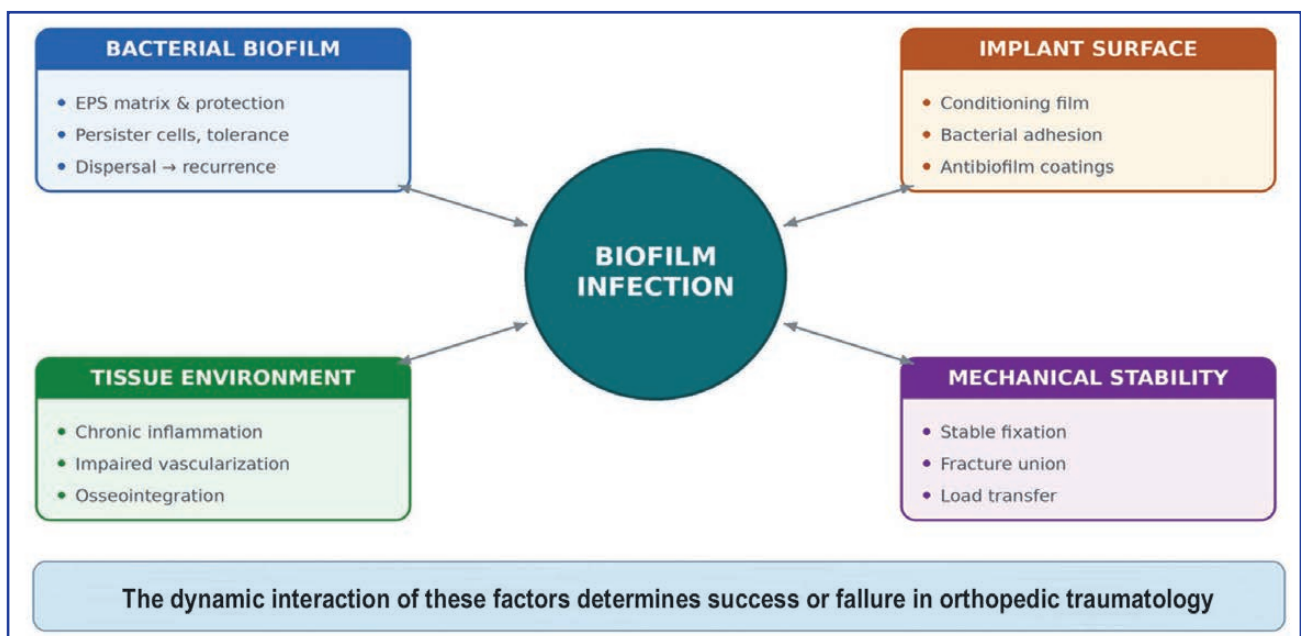


Figure 1. Conceptual model of biofilm infection of orthopedic implants. Biofilm infection is viewed as the result of the interaction of four interrelated components — the bacterial biofilm, the implant surface, the tissue environment, and the mechanical stability of fixation. A disturbance in one of the links (biofilm persistence, implant instability, or tissue devitalization) sustains a vicious circle of infection. In contrast, multifunctional antibiofilm coatings, stable fixation, and wound control promote biofilm suppression, osseointegration, and preservation of limb function

Note: EPS — extracellular polymeric substances.

should be developed to distinguish aseptic inflammation from low-grade infection. The second direction is the personalization of treatment. For FRI, it is important to know whether it is safe to retain the implant or replace it, what the optimal duration of antibacterial therapy is, and how to balance infection control with the reconstruction of bone defects. The third direction is the development of next-generation coatings. The most promising are not only antibacterial but also multifunctional coatings that simultaneously act as anti-adhesives, locally antimicrobially, and biocompatibly, while supporting osseointegration and ensuring the mechanical stability of the bone-implant system.

Conclusions

Biofilm infection of orthopedic implants is a complex clinical and biological process that determines the chronic course, recurrence, and treatment of implant-associated infections. An important pathogenetic feature is the formation of a microbial community on the implant surface, which confers on microorganisms increased tolerance to antibacterial therapy and immune responses. Periprosthetic and fracture-related infection share the same biofilm mechanism but differ in clinical logic. Antibiofilm coatings are a promising approach to prevention, but most technologies have predominantly preclinical or limited clinical evidence. Multifunctional coatings are promising in traumatology, particularly those based on bioactive glass, calcium phosphate, or hydroxyapatite matrices with antimicrobial agents; however, their clinical efficacy requires further validation. The proposed conceptual model emphasizes the need for simultaneous control of the biofilm, implant condition, tissue environment, and mechanical stability of fixation.

Ethical approval. Not required, as the article is a literature review and does not involve studies with patients or experimental animals.

Informed consent. Not applicable.

References

1. Costerton JW, Stewart PS, Greenberg EP. Bacterial biofilms: a common cause of persistent infections. *Science*. 1999;284(5418):1318-1322. doi: 10.1126/science.284.5418.1318.
2. Donlan RM, Costerton JW. Biofilms: survival mechanisms of clinically relevant microorganisms. *Clin Microbiol Rev*. 2002;15(2):167-193. doi: 10.1128/CMR.15.2.167-193.2002.
3. Zimmerli W, Trampuz A, Ochsner PE. Prosthetic-joint infections. *N Engl J Med*. 2004;351(16):1645-1654. doi: 10.1056/NEJMra040181.
4. Trampuz A, Piper KE, Jacobson MJ, Hanssen AD, Unni KK, Osmon DR, et al. Sonication of removed hip and knee prostheses for diagnosis of infection. *N Engl J Med*. 2007;357(7):654-663. doi: 10.1056/NEJMoa061588.
5. Osmon DR, Berbari EF, Berendt AR, Lew D, Zimmerli W, Steckelberg JM, et al. Diagnosis and management of prosthetic joint infection: clinical practice guidelines by the Infectious Diseases Society of America. *Clin Infect Dis*. 2013;56(1):e1-e25. doi: 10.1093/cid/cis803.
6. Metsemakers WJ, Morgenstern M, McNally MA, Moriarty TF, McFadyen I, Scarborough M, et al. Fracture-related infection: a consensus on definition from an international expert group. *Injury*. 2018;49(3):505-510. doi: 10.1016/j.injury.2017.08.040.
7. Govaert GAM, Kuehl R, Atkins BL, Trampuz A, Morgenstern M, Obremskey WT, et al. Diagnosing fracture-related infection: current concepts and recommendations. *J Orthop Trauma*. 2020;34(1):8-17. doi: 10.1097/BOT.0000000000001614.
8. Metsemakers WJ, Morgenstern M, Senneville E, Borens O, Govaert GAM, Onsea J, et al. General treatment principles for fracture-related infection: recommendations from an international expert group. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2020;140(8):1013-1027. doi: 10.1007/s00402-019-03287-4.
9. Metsemakers WJ, Fragomen AT, Moriarty TF, Morgenstern M, Egol KA, Zalavras C, et al. Evidence-based recommendations for local antimicrobial strategies and dead space management in fracture-related infection. *J Orthop Trauma*. 2020;34(1):18-29. doi: 10.1097/BOT.0000000000001615.
10. Depypere M, Kuehl R, Metsemakers WJ, Senneville E, McNally MA, Obremskey WT, et al. Recommendations for systemic antimicrobial therapy in fracture-related infection: a consensus from an international expert group. *J Orthop Trauma*. 2020;34(1):30-41. doi: 10.1097/BOT.0000000000001626.
11. McNally M, Sousa R, Wouthuyzen-Bakker M, Chen AF, Soriano A, Vogely HC, et al. The EBJIS definition of periprosthetic joint infection. *Bone Joint J*. 2021;103-B(1):18-25. doi: 10.1302/0301-620X.103B1.BJJ-2020-1381.R1.
12. Sousa R, Ribau A, Alfaro P, Burch MA, Ploegmakers J, McNally M, et al. The European Bone and Joint Infection Society definition of periprosthetic joint infection is meaningful in clinical practice: a multicentric validation study with comparison with previous definitions. *Acta Orthop*. 2023;94:8-18. doi: 10.2340/17453674.2023.5670.
13. Liu X, Ma P, Liu X, Liu S, Liu X, Wang R, Gao H. Resistance mechanisms of bacterial biofilms on orthopedic implants and research progress on novel anti-biofilm coatings. *Front Bioeng Biotechnol*. 2026;14:1707232. doi: 10.3389/fbioe.2026.1707232.
14. Jeyaraman M, Migliorini F, Schäfer L, Jeyaraman N. Management of Periprosthetic Joint Infections: A Multidisciplinary Approach. *Antibiotics*. 2026;15(6):614. doi: 10.3390/antibiotics15060614.
15. Matsuo T, Thompson AL, Yuan BJ, et al. The latest approaches to fracture-related infection. *Curr Infect Dis Rep*. 2025;27(1):15. doi: 10.1007/s11908-025-00864-0.
16. Jennings JA, Abdelbary H, Abdulla FS, et al. 2025 International Consensus Meeting on Musculoskeletal Infection: summary from Biofilm Workgroup on treatment of biofilm-related infection and preclinical models. *J Orthop Res*. 2026;44(3):e70169. doi: 10.1002/jor.70169.
17. Arciola CR, Campoccia D, Speziale P, Montanaro L, Costerton JW. Biofilm formation in *Staphylococcus* implant infections: a review of molecular mechanisms and implications for biofilm-resistant materials. *Biomaterials*. 2012;33(26):5967-5982. doi: 10.1016/j.biomaterials.2012.05.031.
18. Yang S, Abu Mukh A, Abdelatif E, Schmidt A, Ba-tailler C, Ferry T, et al. Bacteriophage therapy as an innovative strategy for the treatment of periprosthetic joint infection:

a systematic review. *Int Orthop*. 2024;48(11):2809–2825. doi: 10.1007/s00264-024-06295-1.

19. Mills H, Donnelly L, Platt S. Locally delivered antibiotics in fracture-related infection. *Cureus*. 2024;16(11):e73210. doi: 10.7759/cureus.73210.

20. Malizos K, Blauth M, Danita A, Capuano N, Mezzoprete R, Logoluso N, et al. Fast-resorbable antibiotic-loaded hydrogel coating to reduce post-surgical infection after internal osteosynthesis: a multicenter randomized controlled trial. *J Orthop Traumatol*. 2017;18(2):159–169. doi: 10.1007/s10195-017-0442-2.

21. Akshaya S, Rowlo PK, Dukle A, Nathanael AJ. Antibacterial coatings for titanium implants: recent trends and future perspectives. *Antibiotics*. 2022;11(12):1719. doi: 10.3390/antibiotics11121719.

22. Chen X, Zhou J, Qian Y, Zhao L. Antibacterial coatings on orthopedic implants. *Mater Today Bio*. 2023;19:100586. doi: 10.1016/j.mtbio.2023.100586.

23. Akay S, Yaghmur A. Recent advances in antibacterial coatings to combat orthopedic implant-associated infections. *Molecules*. 2024;29(5):1172. doi: 10.3390/molecules29051172.

24. Li B, Thebault P, Labat B, Ladam G, Alt V, Rupp M, et al. Implants coating strategies for antibacterial treatment in fracture and defect models: A systematic review of animal studies. *J Orthop Translat*. 2024;45:24–35. doi: 10.1016/j.jot.2023.12.006.

25. Liu F, Xue Y, Zhou Y, Zhang J, Wang A, Shi R. Trends and advances in antimicrobial surface modification for orthopedic implants (2014–2024). *Tissue Eng Part C Methods*. 2025;31(1). doi: 10.1089/ten.tec.2024.0266.

26. Zhang BG, Myers DE, Wallace GG, Brandt M, Choong PF. Bioactive coatings for orthopedic implants: recent trends in development of implant coatings. *Int J Mol Sci*. 2014;15(7):11878–11921. doi: 10.3390/ijms150711878.

27. Drevet R, Fauré J, Benhayoune H. Bioactive calcium phosphate coatings for bone implant applications: a review. *Coatings*. 2023;13(6):1091. doi: 10.3390/coatings13061091.

28. Su Y, Cockerill I, Zheng Y, Tang L, Qin YX, Zhu D. Biofunctionalization of metallic implants by calcium phosphate coatings. *Bioact Mater*. 2019;4:196–206. doi: 10.1016/j.bioactmat.2019.05.001.

29. Aboaziza Y, Aghaian E, Hillock R. Emerging surface coating innovations for orthopedic implants: a review. *J Orthop Exp Innov*. 2026;7(1). doi: 10.60118/001c.146425.

30. Kaspiris A, Vasiliadis E, Pantazaka E, Lianou I, Melissaridou D, Savvidis M, et al. Current progress and future perspectives in contact and releasing-type antimicrobial coatings of orthopedic implants: a systematic review analysis emanated from in vitro and in vivo models. *Infect Dis Rep*. 2024;16(2):298–316. doi: 10.3390/idr16020025.

31. Wang M, Zheng Y, Yin C, Dai S, Fan X, Jiang Y, et al. Recent progress in antibacterial hydrogel coatings for targeting biofilm to prevent orthopedic implant-associated infections. *Front Microbiol*. 2023;14:1343202. doi: 10.3389/fmicb.2023.1343202.

32. De Meo D, Cera G, Pica R, Perfetti F, Martini P, Perciballi B, et al. Antibiotic-loaded coatings to reduce fracture-related infections: retrospective case series of patients with increased infectious risk. *Antibiotics*. 2023;12(2):287. doi: 10.3390/antibiotics12020287.

33. Li H, Wang D, Zhang W, Xu G, Xu C, Liu W, et al. Potential side effects of antibacterial coatings in orthopedic implants: a systematic review of clinical studies. *Front Bioeng Biotechnol*. 2023;11:1111386. doi: 10.3389/fbioe.2023.1111386.

34. Speijker LTD, Fechter J, Bargon R, Dingemans J, Arts JJ, Savelkoul PHM, van Loo IHM. Silver multilayer coating on orthopedic implant material of different alloys and surfaces significantly reduces bacterial colonization. *Front Cell Infect Microbiol*. 2025;15:1707694. doi: 10.3389/fcimb.2025.1707694.

35. Morimoto T, Hirata H, Eto S, Hashimoto A, Kii S, Kobayashi T, et al. Development of silver-containing hydroxyapatite-coated antimicrobial implants for orthopedic and spinal surgery. *Medicina*. 2022;58(4):519. doi: 10.3390/medicina58040519.

36. Zhou P, Garcia BL, Kotsakis GA. Comparison of antibacterial and antibiofilm activity of bioactive glass compounds S53P4 and 45S5. *BMC Microbiol*. 2022;22(1):212. doi: 10.1186/s12866-022-02617-8.

37. Gonzalez Moreno M, Butini ME, Maiolo EM, Sessa L, Trampuz A. Antimicrobial activity of bioactive glass S53P4 against representative microorganisms causing osteomyelitis. *Colloids Surf B Biointerfaces*. 2020;189:110853. doi: 10.1016/j.colsurfb.2020.110853.

Received 07.05.2026

Revised 24.06.2026

Accepted 10.07.2026

Information about authors

Valentyn O. Kuprii, PhD-student, Department of Traumatology and Orthopedics, Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine; e-mail: drkuprii@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3026-5053>
Oleksandr A. Burianov, MD, DSc, Professor, Head of the Department of Traumatology and Orthopedics, Bogomolets National Medical University; State Institution "Institute of Traumatology and Orthopedics, NAMS of Ukraine", Kyiv, Ukraine; e-mail: katraum@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-2174-1882>

Vadim A. Ponyatovskiy, PhD, Associate Professor, Department of Microbiology, Virology and Immunology, Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine; e-mail: vponiatovskiy@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-1503-3935>

Vitalii A. Dubok, DSc (Chemistry), Professor, Leading Researcher, Frantsevich Institute for Problems of Materials Science, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: vdubok17@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3494-7775>

Andrii P. Kusyak, PhD (Chemistry), Senior Lecturer, Department of Chemistry, Zhytomyr Ivan Franko State University, Zhytomyr, Ukraine; e-mail: a_kusyak@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0003-1005-5497>
Iurii M. Nasieka, DSc (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Department of Kinetic Phenomena and Polaritons, V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine; Senior Lecturer, Education and Research Institute of Energetics, Automation and Energy Efficiency, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-3431-8856>
Volodymyr S. Chornyi, PhD, Associate Professor, Department of Traumatology and Orthopedics, Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine; e-mail: oncoortoped@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3679-0783>

Conflicts of interests. Authors declare the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

Information about funding. The study received no external funding.

Authors' contribution. The manuscript's concept, literature search, source analysis, writing, and editing were performed by the authors in accordance with the journal's requirements.

Купрій В.О.¹, Бур'янов О.А.^{1,6}, Понятовський В.А.¹, Дубок В.А.², Кусяк А.П.³, Насека Ю.М.^{4,5}, Чорний В.С.^{1,6}

¹Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, м. Київ, Україна

²Інститут проблем матеріалознавства імені І.М. Францевича НАН України, м. Київ, Україна

³Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир, Україна

⁴Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України, м. Київ, Україна

⁵Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

⁶Державна установа «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», м. Київ, Україна

Біоплівкова інфекція ортопедичних імплантатів: діагностика, лікування та профілактика

Резюме. Біоплівкова інфекція ортопедичних імплантатів є однією з найскладніших проблем у сучасній ортопедії та травматології, оскільки вона поєднує мікробну персистенцію, обмежену ефективність системної антибактеріальної терапії, хронічне запалення, порушення остеоінтеграції, нестабільність імплантатів і функціональні наслідки лікування. Мікроорганізми прикріплюються до поверхонь ендопротезів, пластин, гвинтів, інтрамедулярних стрижнів, спінальних систем та інших фіксуючих пристроїв, утворюючи біоплівки, які є більш стійкими до антибіотиків та імунних реакцій, ніж вільноживучі бактерії. Цей огляд має на меті узагальнити поточні дані про патогенез, мікробіологічний спектр, клінічні форми, діагностику, лікування, профілактику і стратегії антибіоплівового покриття ортопедичних імплантатів. Пошук літератури проведено в чотирьох бібліографічних базах даних — PubMed, Scopus, Web of Science і Google Scholar — та шести видавничих платформах: Elsevier, Springer Nature, Wiley, Oxford Academic, MDPI і Frontiers. Використано одинадцять груп ключових слів англійською та українською мовами, публікації з 2014 по 2026 рік були пріоритетними, а 37 джерел включено після двохетапного скринінгу назв/анотацій та повних текстів. Аналіз показав, що перипротезна інфекція суглоба (PJI) та інфекція, пов'язана з переломом (FRI), характеризуються однаковим механізмом утворення біоплівки, але відрізняються клінічно, оскільки при FRI імплантат також необхідний для підтримки стабільності перелому. Ключові діагностичні еле-

менти включають глибокий забір тканин, ультразвукову обробку видалених імплантатів, гістологію та стандартизовані критерії PJI/FRI, тоді як поверхневі мазки недостатні для остаточного прийняття терапевтичного рішення. Ефективне лікування вимагає хірургічного контролю джерел, стабільної фіксації або ревізії імплантатів, усунення «мертвого простору», покриття м'яких тканин і системної та місцевої антимікробної терапії. В огляді було визначено 12 основних груп стратегій антибіоплівового або антимікробного покриття, включаючи системи, що вивільняють антибіотики, гідрогелі з антибіотиками, цвяхи, покриті гентаміцином, покриття на основі іонів металів, системи на основі фосфату кальцію/гідроксиапатиту, антимікробні пептиди, хітозан, наноструктуровані поверхні, а також «розумні» покриття, чутливі до змін pH або ферментів. Багатофункціональні покриття на основі біоактивного скла, фосфату кальцію, гідроксиапатиту, срібла, антибіотиків, гідрогелів або комбінованих систем є особливо перспективними, оскільки вони можуть пригнічувати ранню адгезію бактерій, зменшувати утворення біоплівки й підтримувати остеоінтеграцію. Однак більшість доступних даних залишаються доклінічними або клінічно обмеженими, і перед рутинним використанням в ортопедичній травматології потрібна подальша валідація.

Ключові слова: біоплівка; ортопедичні імплантати; перипротезна інфекція; інфекція, пов'язана з переломом; антибіоплівові покриття; огляд

Хвисяук М.І., Хвисяук О.М.

Навчально-науковий інститут післядипломної освіти Харківського національного медичного університету, м. Харків, Україна

Витоки української вертеб্রології (харківська школа)

Резюме. Формування вертеб্রології в Україні нерозривно пов'язане з діяльністю харківської школи ортопедії та травматології, яка заклала наукові й клінічні основи сучасної діагностики та лікування патології хребта. У статті проаналізовано історичні витoki, основні етапи становлення та ключові наукові досягнення харківської школи у формуванні української вертеб্রології. Проведено історико-аналітичний огляд розвитку клінічних, експериментальних і наукових досліджень у галузі патології хребта, виконаних співробітниками Харківського НДІ ортопедії і травматології та кафедри травматології й ортопедії у 1960–1980-х роках. У результаті спільної роботи були розроблені оперативні доступи до всіх відділів хребта, впроваджені нові методи діагностики та патогенетично обґрунтовані підходи до лікування туберкульозного спондиліту, дегенеративних захворювань, нестабільності, травматичних ушкоджень, пухлин і деформацій хребта. Створено класифікації дегенеративної патології, запропоновано нові методики реконструктивних і стабілізуючих операцій, розроблено імплантати та фіксуючі конструкції. Організація спеціалізованих клінічних підрозділів, відкриття першої в Україні клініки хірургії хребта та кафедри вертеб্রології забезпечили розвиток спеціалізованої медичної допомоги й підготовку висококваліфікованих фахівців. Теоретичні, експериментальні та клінічні дослідження, виконані харківською школою у 1960–1980-х роках, стали підґрунтям становлення вертеб্রології як самостійного напрямку ортопедії та травматології в Україні.

Ключові слова: вертеб্রологія; патологія хребта; огляд

Вертеб্রологія зародилася на межі ортопедії і травматології з нейрохірургією та неврологією як спеціальність, що вирішує науково-практичні проблеми захворювань та пошкоджень кінцівок, таза та хребта.

На початку 60-х років ХХ століття в Україні практично не існувало науково обґрунтованих методів лікування ушкоджень і захворювань хребта. Однією з основних причин була неможливість виконання хірургічних втручань на передніх частинах хребтового стовпа, у яких переважно локалізується патологічний процес, а також відсутність об'єктивних методів візуалізації та діагностики патологічних змін у паравертебральних тканинах.

Водночас у Європі та Північній Америці вертеб্রологія активно розвивалася з початку ХХ століття, зокрема для вирішення проблем при остеохондрозі хребта, туберкульозному спондиліті та пухлинах. Розроблялися нові засоби діагностики та хірургічного лікування. Засновниками цього напрямку хірургії були

Дж.Е. Голдтуайт (США), Дж.С. Міддлтон і Дж.Г. Тічер (Велика Британія), В. Путті (Італія), Т. Алажуанін і Д. Пті-Дютайї (Франція).

У 1934 р. В.Дж. Мікстер і Дж.С. Барр (США) опублікували результати 19 оперативних втручань на поперековому відділі хребта, виконаних у пацієнтів із передопераційним діагнозом грижі міжхребцевого диска [1]. Основним недоліком таких операцій була післяопераційна нестабільність оперованих хребтових сегментів, яка в окремих випадках призводила до ще тяжчих клінічних проявів.

Варто зазначити, що співробітники Харківського науково-дослідного інституту ортопедії та травматології ім. проф. М.І. Ситенка вивчали травми хребта від перших років існування установи [2]. У 1936 р. вихованець харківської школи ортопедії, учень К.Ф. Вегнера професор В.Д. Чаклін виконав першу у світі операцію переднього міжтілового спондилодезу поперекового відділу хребта.

Для вирішення цієї проблеми у Харкові в 60-х роках минулого століття за ініціативою О.О. Коржа було об'єднано зусилля фахівців Харківського науково-дослідного інституту ортопедії та травматології ім. проф. М.І. Ситенка та кафедри ортопедії та травматології Українського інституту удосконалення лікарів. Метою даного об'єднання було теоретичне обґрунтування та клінічна оцінка патогенетичних аспектів діагностики та лікування захворювань та пошкоджень хребта, розробка показань та протипоказань до різних способів лікування.

Основним завданням досліджень була розробка оперативних доступів до передніх частин хребтового стовпа, у яких найчастіше локалізується патологічний процес, та способів діагностики патології міжхребцевих дисків, деформацій хребетного каналу та патології нервово-судинних утворень.

Розробку оперативних доступів було доручено аспірантам кафедри Р.Р. Талишинському, М.І. Хвисяку, В.М. Козицькому, Б.А. Осипіву, які в 1961–1968 роках обґрунтували доступи практично до всіх відділів хребта — від верхньошийного до крижового [3–5]. Водночас розроблялися та експериментально вивчалися контрастні методи дослідження хребта — веноспондилографія, епідурографія, пневмографія, дискографія, функціональна рентгенографія [6, 7].

Паралельно з цими експериментальними і теоретичними дослідженнями починаючи з 1965 р. проф. О.О. Корж та доц. М.І. Хвисяк епізодично проводили операції на хребті при туберкульозному спондиліті, спондилолітезі, пухлинах. До 1970 р. вже був накопичений певний досвід хірургічного лікування цих патологій. Було створено базис для подальшої планової роботи.

З метою концентрації та об'єднання результатів клінічних та теоретичних досліджень у 1971 р. було вирішено за участі талановитих ортопедів-травматологів, аспірантів, клінічних ординаторів створити творчий колектив вертебологів, у складі якого в подальші роки працювали О.О. Корж, М.І. Хвисяк, Г.І. Фадєєв, М.О. Корж, О.І. Продан, Г.Х. Грунтовський, О.С. Чичунов, С.Д. Шевченко, В.О. Радченко, М.І. Завеля, Є.М. Маковоз, Є.Б. Волков, М.Ф. Капрош, О.А. Бур'янов, О.М. Козирев, О.М. Мезенцев, О.М. Хвисяк, Г.Г. Голка, В.М. Шимон, а також співробітники наукових лабораторій О.П. Тимошенко, Н.В. Дедух, Ю.П. Делевський, Л.Н. Лигун та інші.

Починаючи з 1971 р. у клінічному відділенні для дорослих було відокремлено 4 палати для пацієнтів з захворюваннями та пошкодженнями хребта. У 1976 р. в Українському інституті удосконалення лікарів була створена перша в Україні клініка хірургії хребта, а в 1977 р. — кафедра травматології та вертебології. Ці структури стали вертебральним науковим центром, у якому за тісної участі співробітників лабораторії патоморфології та технічних служб постійно обговорювалися та розроблялися проблеми вертебології. Вперше в Україні розпочалося планомірне вивчення основних аспектів патології хребта.

Не перелічуючи велику кількість розроблених методів і способів лікування та діагностики, наво-

димо тільки основні напрямки, які тоді були актуальними.

Однією з основних соціальних та медичних проблем у ті роки в Україні був туберкульозний спондиліт — найпоширеніша і найскладніша деформація з хронічним прогресуючим довічним перебігом. Антибактеріальне та загальнозміцнювальне лікування в умовах кістково-туберкульозних санаторіїв лише стримувало прогресування захворювання, не забезпечуючи повноцінного одужання. Паліативні хірургічні втручання (абсцесектомія, некректомія, декомпресія спинного мозку) проводилися лише при інтоксикації, норицях та паралітичних формах захворювання шляхом задньобічної декомпресії (геміламінектомія, ламінектомія). Фіксацію хребта здійснювали шляхом заднього автокісткового спондилодезу. Ці операції призводили лише до тимчасового поліпшення.

За ініціативою О.О. Коржа та М.І. Хвисяка вперше в Україні було розроблено й впроваджено в клінічну практику метод радикального хірургічного лікування туберкульозного спондиліту. Метод передбачав виконання переднього оперативного доступу з резекцією туберкульозних вогнищ у тілах хребців, видаленням вільних кісткових секвестрів, казеозних мас із туберкульозного абсцесу та порожнини хребетного каналу. Такий підхід був можливий за умови ураження 2–3 хребців [8]. Здійснювався передній спондилодез автотрансплантатом із крила клубової кістки. Гіпсовий корсет та антибактеріальна терапія протягом 3 місяців призводили до утворення кісткового блоку та ліквідації ознак туберкульозного запалення. У 95–97 % випадків наставало одужання.

Другою проблемою була дистрофічна деструкція хребтного сегмента.

До 60–70-х років минулого століття даних про остеохондроз хребта в Україні не було. Хворі з діагнозом «радикуліт» лікувалися у неврологічних стаціонарах чи амбулаторно.

Завдяки проведенню комплексних клінічних, контрастних рентгенологічних та патоморфологічних досліджень вперше в Україні під керівництвом М.І. Хвисяка було вивчено особливості дистрофічно уражених дисків у різних вікових групах [9, 10]. Виділено три основні види захворювання: спондилодискоз — передніх частин хребтового стовпа, спондилоартроз — ураження задніх частин, спондилоосегментоз — тотальне ураження сегмента. За формою ураження виділені вогнищеві (локальні) та розлиті (тотальні) ураження. За розташуванням вогнища деструкції в диску виділено дисквертебральний, дискпаравертебральний та дискмедулярний типи захворювання. Залежно від характеру пошкодження виділено компенсовану та декомпенсовану (нестабільну) форми захворювання.

Вивчено характер дистрофічної деструкції при спондилоартрозі, особливості деформації суглобової щільності, ступеня склерозу та деформації суглобових поверхонь, характер та напрямок остеопітів [11–14]. Виділено види спондилоосегментозу — дискартрогенний та дискартроостеогенний, особливості функціо-

нальних порушень у сегменті (зокрема, нестабільність у вигляді ретро- або антеролістезу).

Було обґрунтовано клініко-рентгенологічні прояви при будь-якій локалізації процесу (шийній, грудній, поперековій), вікові особливості хвороби [13–18].

Розроблено патогенетично обґрунтовані способи консервативного [19] (медикаментозна терапія, тракція, мануальна терапія, фізіотерапія) та оперативного лікування з дотриманням принципу радикальності (видалення переміщених фрагментів), стабільності (застосування авто- та алотрансплантатів, металевих та керамічних фіксаторів), профілактичності — створення нормальних біомеханічних параметрів хребта [20].

Вивчено особливості утворення кісткового блоку на місці оперативного втручання при застосуванні кісткових автотрансплантатів, алотрансплантатів та їх поєднання, встановлено закономірність утворення хибного суглоба на місці трансплантації при нестабільному стані хребетного сегмента, зокрема при спондилолістезі. Розроблено низку фіксаторів та імплантів для хребта.

Вперше в Україні виявлено та вивчено таку патологію хребта, як нестабільність [21].

Стабільність — це анатомічно зумовлена сталість структури та функції хребетного сегмента. Внаслідок впливу травми, деструкції або дистрофічного процесу з'являються структурні руйнування та невластиві нормі рухи — переміщення хребця у горизонтальній площині, деформація прилеглих кісткових поверхонь, деформація хребетного каналу, біомеханічні порушення у сегменті з виникненням нестабільності та подразненням чи стисненням навколо- та внутрішньохребтових судинно-нервових структур.

Патологічна рухливість становить суть нестабільності. Були вивчені окремі види нестабільності (дистрофічна, диспластична, посттравматична), моносегментарна (дискогенна, дискартрогенна, дискартроостеогенна) та полісегментарна форма нестабільності [22, 23].

Розроблено способи консервативної та оперативної стабілізації хребта при різноманітних видах нестабільності, зокрема стабілізації кістковими трансплантатами, спеціальними металевими та керамічними імплантатами та пластинами, які перешкоджають прогресуванню зміщень та надійно стабілізують хребці [24–27].

Встановлено особливості хірургічного лікування аномальної (диспластичної) нестабільності. Диспластичний спондилолістез, почавшись у дитячому віці, без усунення зазвичай прогресував до спондилоптозу. Способи заднього та переднього спондилодезу, запропоновані В.Д. Чакліним і О.О. Коржем, у разі наявності зміщення хребців не запобігали його подальшому прогресуванню. Це пояснювалося тим, що сформований кістковий блок у таких випадках зазнавав переважно зсувних, а не осьових навантажень, що призводило до його лізису та втрати стабільності.

У зв'язку з цим О.О. Корж та М.І. Хвисьюк розробили спосіб відкритого вправлення та стабілізації хребта з особливостями резекції залежно від ступеня зміщення тіла, деформації хребетного каналу на рівні зміщення

та переднього спондилодезу кістковими трансплантатами або різними імплантатами. При цьому значною мірою усувалася деформація входу в малий таз, нормалізувалася біомеханіка поперекового відділу, значно зменшувалася деформація тулуба [28–31].

Ушкодження хребта, особливо ускладнені, завжди є тяжкою проблемою. Лікування неускладнених пошкоджень хребта проводилося хірургами у хірургічних відділеннях за місцем проживання. Основною рисою ускладненого пошкодження вважався спінальний шок у гострому періоді — 4–5 тижнів. У цей час будь-які маніпуляції вважалися недоцільними. Близько 70 % хворих із пошкодженням шийного відділу хребта гинули протягом перших місяців після травми. Декомпресія спинного мозку, що виконується за допомогою ламінектомії, лише частково вирішувала проблему пошкодження, залишаючи патогенетичну суть травми — пошкодження тіл хребців та міжхребцевих дисків, зв'язок, деформації хребетного каналу. Навіть при відновленні функції спинного мозку зазначені пошкодження зумовлювали подальше виникнення посттравматичної нестабільності хребетного сегмента з властивими для неї клінічними проявами. Вперше було зроблено висновки, що спінальний шок — не причина всіх розладів, а наслідок. Причиною є деформація хребетного каналу та стиснення спинного мозку.

У зв'язку з цим проф. М.І. Хвисьюком розроблено метод одномоментного відкритого вправлення у перші дні після травми. Переднім доступом з видаленням пошкоджених ділянок тіла хребця та диска, декомпресією нервових структур проводилася тракція та відкрите вправлення під візуальним та рентгенологічним контролем та передній спондилодез. У перші дні після операції створювалися умови для відновлення спинного мозку, протягом 1,5–2 місяців формувалася кістковий блок з відновленням опорної функції. Це дозволяло проводити реабілітаційне лікування з перших днів після операції. Термін «спінальний шок» втратив свою актуальність. Летальність у гострому періоді після травм різко знизилася [32–35].

Розроблено декілька способів операції залежно від локалізації травми, характеру та термінів пошкодження. Запропоновано реконструктивно-відновлювальні операції з кістковою пластиною, реконструкцією біомеханіки та опірності хребта при застарілих травмах [36–40].

Пухлини хребта були та залишаються окремою проблемою. Внаслідок клініко-анатомічних особливостей та труднощів радикального хірургічного лікування дана група хворих найчастіше належала до категорії безнадійних. Запізнена діагностика, тяжкість перебігу як злоякісних, так і доброякісних пухлин (стиснення спинного мозку — паралічі, пролежні, розлад функції тазових органів), неможливість реалізації принципу радикальності через небезпеки хірургічних втручань — характерна риса лікувальної допомоги таким хворим.

Проф. О.О. Корж та М.І. Хвисьюк, маючи великий досвід хірургічного лікування при різних видах деструкції хребта, розробили та успішно здійснювали радикальне видалення доброякісних пухлин у ме-

жах ураження, починаючи з глибини і до периферії, при мінімальній травматизації оболонки пухлини і максимально можливому гемостазі, за необхідності заміщаючи дефект кісткової тканини різними трансплантатами. При злоякісних пухлинах рекомендували дотримуватись принципу радикальності лікування (можливе максимальне субтотальне видалення пухлини, декомпресія судинно-нервових утворень, ретельний гемостаз, стабілізація імплантатами та подальша багаторазова хіміо- та променева терапія). Також було розроблено особливості хірургічної тактики та техніки залежно від гістологічного типу й локалізації пухлини (остеоїд-остеоми, остеохондроми, саркоми, гемангіо-ендотеліоми тощо) [41–43].

Для усунення деформації хребта та грудної клітки при сколіозі розроблено спосіб заднього спондилодезу з одночасною реконструкцією грудної клітки (О.О. Корж, С.Д. Шевченко). Суть способу — задній спондилодез у поєднанні з кістково-надкістковим м'язовим клаптом, резекцією ребер; спондилодез з ув'язаного боку та корекція грудного відділу. Розроблено спеціальний коригуючий пристрій, набір інструментів та пристроїв. Ця операція забезпечує досягнення корекції до 80 %, зниження термінів перебування хворих у стаціонарі та значне поліпшення результатів хірургічного лікування [44–47].

Ми навели лише приклади вирішення найважливіших проблем патології хребта, що існували на той час. Конкретні наукові та практичні розробки висвітлені в сорока шести авторських свідоцтвах, п'ятнадцяти монографіях та учбових посібниках, двохсот семи наукових публікаціях у медичних журналах, матеріалах з'їздів та конференцій, а також у

захищених сорока кандидатських та дванадцяти докторських дисертаціях.

Таким чином, наукові теоретичні та практичні дослідження та вирішення актуальних проблем патології хребта у 60–80-ті роки минулого століття, відкриття спеціалізованих відділень у НДІ та лікарнях, підготовка лікарів-спеціалістів для практичної охорони здоров'я дають підстави вважати, що в Україні в рамках ортопедії та травматології було створено нову медичну спеціальність — вертебрологію. Можна упевнено стверджувати, що фундаторами вертебрології в Україні були професори О.О. Корж та М.І. Хвисьок.

Вертебрологія розвивалася завдяки впровадженню запропонованих нами ідей та розробці нових, що базувались на новітніх наукових та технологічних досягненнях [48–61].

Сьогодні вертебрологи мають у своєму розпорядженні сучасні методи діагностики, зокрема МРТ, КТ та УЗД. Арсенал хірургічних втручань значно розширився завдяки впровадженню методик транспедикулярної фіксації, навігаційних систем для їх виконання, ендопротезування міжхребцевих дисків, а також широкого спектра малоінвазивних оперативних втручань. Вертебрологія продовжує динамічно розвиватися, відкриваючи нові можливості для діагностики та лікування патології хребта.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів та власної фінансової зацікавленості при підготовці даної статті.

Список літератури знаходиться в редакції

Отримано/Received 19.05.2026

Рецензовано/Revised 30.06.2026

Прийнято до друку/Accepted 03.07.2026 ■

Information about authors

M.I. Khvysyuk, MD, DSc, PhD, Professor at the Department of traumatology, anesthesiology and military surgery Educational and Scientific Institute of Postgraduate Education, Kharkiv National Medical University, Kharkiv, Ukraine

O.M. Khvysyuk, MD, DSc, PhD, Professor at the Department of traumatology, anesthesiology and military surgery Educational and Scientific Institute of Postgraduate Education, Kharkiv National Medical University, Kharkiv, Ukraine; e-mail: tay_kh@ukr.net; phone: +380 (50) 853-14-28; <https://orcid.org/0000-0002-4826-6567>

Conflicts of interests. Authors declare the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

M.I. Khvysyuk, O.M. Khvysyuk

Educational and Scientific Institute of Postgraduate Education, Kharkiv National Medical University, Kharkiv, Ukraine

Origins of Ukrainian vertebrology (Kharkiv school)

Abstract. The formation of vertebrology in Ukraine is inextricably linked with the activities of the Kharkiv school of orthopedics and traumatology, which laid the scientific and clinical foundations of modern diagnosis and treatment of spinal pathology. The article analyzes the historical origins, main stages of formation and key scientific achievements of the Kharkiv school in the formation of Ukrainian vertebrology. A historical and analytical review on the development of clinical, experimental and scientific research in the field of spinal pathology carried out by employees of the Kharkiv Research Institute of Orthopedics and Traumatology and the Department of Traumatology and Orthopedics in the 1960s–1980s was conducted. As a result of joint work, operative accesses to all parts of the spine were developed, new diagnostic methods and pathogenetically substantiated

approaches to the treatment of tuberculous spondylitis, degenerative diseases, instability, traumatic injuries, tumors and spinal deformities were introduced. Classifications of degenerative pathology were created, new methods of reconstructive and stabilizing operations were proposed, implants and fixing structures were developed. The organization of specialized clinical departments, the opening of the first spine surgery clinic in Ukraine and the Department of Vertebrology ensured the development of specialized medical care and the training of highly qualified specialists. Theoretical, experimental and clinical studies carried out by the Kharkiv school in the 1960s–1980s became the basis for the formation of vertebrology as an independent direction of orthopedics and traumatology in Ukraine.

Keywords: vertebrology; spine pathology; review



AKSİMED
КЛІНІКА СУЧАСНОЇ НЕВРОЛОГІЇ

РЕАБІЛІТАЦІЯ ПІСЛЯ ІНСУЛЬТІВ І ТРАВМ

НЕВРОЛОГІЧНА КЛІНІКА "АКСІМЕД"

ВУЛ. ТУМАНЯНА, 3 • AKSIMED.UA

(044) 390-00-55

20 РОКІВ
ДОСВІДУ



САМОЛІКУВАННЯ МОЖЕ БУТИ ШКІДЛИВИМ ДЛЯ ВАШОГО ЗДОРОВ'Я