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

СПЕЦІАЛІЗОВАНИЙ РЕЦЕНЗОВАНИЙ НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

Том 27, № 5, 2026

Травма

www.mif-ua.com



Том 27, № 5, 2026

Травма

ZASLAVSKY Publishing house

ЦЕНТР ЛІКУВАННЯ СКОЛІОЗУ



AKCIMED
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, № 5, 2026

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

Volume 27, № 5, 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

mif-ua.com

ZASLAVSKY Publishing house

Open Journal System

Травма
Trauma

Спеціалізований рецензований науково-практичний журнал

Том 27, № 5, 2026

ISSN 1608-1706 (print), ISSN 2307-1397 (online)
DOI: 10.22141/1608-1706 УДК: 616-001

ZASLAVSKY Publishing house

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 30.06.2026 № 1009. Категорія А.

Рекомендовано до друку та до поширення через мережу Інтернет вченою радою Донецького національного медичного університету, протокол № 5 від 15.10.2026 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. 17,32.
Тираж 8000 прим. Зам. 2026-trauma-134.

Видавець Заславський О.Ю.
oleksandrzaslavsky@gmail.com
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 2128 від 13.05.2005

Друк: ТОВ «Ландпресс»

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, № 5, 2026

ISSN 1608-1706 (print), ISSN 2307-1397 (online)
DOI: 10.22141/1608-1706 UDC: 616-001

ZASLAVSKY Publishing house

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 30.06.2026 No. 1009. Category A

Recommended for publication and distribution over the Internet by the scientific council of the Donetsk National Medical University, protocol No. 5 dated 15.10.2026

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, Kropyvnitskiy, Yu.Kovalenka st., 4a

In Ukrainian and English

Folio: 60x84/8. Printer's sheet 17,32.
Circulation 8 000. Order 2026-trauma-134.

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
Chornyi 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

Степанюк С.В., Прилипко В.О., Обертинська О.В., Анкін М.Л., Ладика В.О., Тертишний С.В., Завертиленко Я.С., Кравець Д.Т.

Бактеріологічний пейзаж та профіль антимікробної резистентності вогнепальних та вибухових пошкоджень дистального відділу великогомілкової кістки: ретроспективний когортний аналіз 6

Гринь В.К., Проценко Г.О., Пастернак М.Л.

Кореляційний аналіз клінічних індексів активності та інтегральних гематологічних біомаркерів у пацієнтів з аксіальним спондилоартритом 19

Калашніков А.В., Сабарна Ю.Х.М.

Вплив застосування нових технологій на ефективність оперативного лікування хворих із черезвертлюговими переломами стегнової кістки 27

Філіпенко В.А., Бондаренко С.Є., Олінкевич Є.В., Марущак О.П., Карпінський М.Ю., Яресько О.В.

Порівняльний аналіз напружено-деформованого стану моделі стегнової кістки з ревізійною ніжкою після розширеної проксимальної остеотомії залежно від довжини ніжки..... 33

Ablakulov A.A., Akramov V.R., Khamdamov B.Z., Okhunov A.O., Radjabov J.P.

Зв'язок передопераційних імунозапальних показників із порушенням консолідації переломів стегнової кістки в пацієнтів похилого та старечого віку..... 42

Іващенко В.А., Трутяк І.Р.

Клінічне значення лактату крові в пацієнтів із переломами довгих кісток нижніх кінцівок 49

Поляченко Ю.В., Грицай М.П., Колов Г.Б., Половий А.С., Лисак А.С., Омельченко Т.М.

Лікування пацієнтів із застосуванням техніки Masquelet і методу дистракційного остеосинтезу при критичних дефектах великогомілкової кістки, ускладнених остеомієлітом..... 53

Contents

Original Researches

S.V. Stepaniuk, V.O. Prylypko, O.V. Obertynska, M.L. Ankin, V.O. Ladyka, S.V. Tertyshnyi, Ya.S. Zavertylenko, D.T. Kravets

Bacteriological landscape and antimicrobial resistance profiles of combat-related firearm and blast injuries to the distal tibia: a retrospective cohort analysis 6

V.K. Hryn, H.O. Protsenko, M.L. Pasternak

Correlation analysis of clinical activity indices and integral hematological biomarkers in patients with axial spondyloarthritis 19

A.V. Kalashnikov, Y.K.M. Sabarna

The impact of new technologies on the effectiveness of surgical treatment of patients with transtrochanteric femoral fractures 27

V.A. Filipenko, S.Ye. Bondarenko, Ye.V. Olinkevich, O.P. Marushchak, M.Yu. Karpinsky, O.V. Yaresko

A comparative analysis of the stress-strain state of a femur model with a revision stem following an extended trochanteric osteotomy depending on the length of the stem..... 33

A.A. Ablakulov, V.R. Akramov, B.Z. Khamdamov, A.O. Okhunov, J.P. Radjabov

Relationship between preoperative immuno-inflammatory indicators and impaired consolidation of femoral fractures in elderly and senile patients..... 42

V.A. Ivashchenko, I.R. Trutiak

Clinical significance of blood lactate in patients with long bone fractures of the lower extremities..... 49

I.V. Poliachenko, M.P. Gritsai, G.B. Kolov, A.S. Polovyi, A.S. Lysak, T.M. Omelchenko

Treatment of patients with critical tibial defects complicated by osteomyelitis using the Masquelet technique and distraction osteosynthesis..... 53

Слинько Є.І., Нехлопочин О.С., Фортуненко В.І., Вербов В.В., Деркач Ю.В.

Розподіл вертикального навантаження між опорними структурами та регіонарний напружений стан фіброзного кільця шийного відділу хребта під час згинання й розгинання: скінченно-елементне дослідження..... 60

Килимнюк Л.О., Ковальчук В.М., Маціпура М.М., Мовчанюк В.О., Кулик Ю.А.

Морфометричні параметри проксимального відділу великогомілкової кістки залежно від типу нахилу суглобової лінії при медіальному остеоартриті колінного суглоба..... 77

Усенко О.Ю., Клімас А.С.

Флуоресцентно-навігована відеоасистована торакоскопічна хірургія в лікуванні посттравматичної емпієми плеври при бойових ушкодженнях грудної клітки. Післяопераційна оцінка..... 85

Климовицький Ф.В., Верба А.В., Безсмертний Ю.О., Шевчук В.І., Браніцький О.Ю., Безсмертна Г.В.

Тунельні нейропатії ампутаційних кукс нижніх кінцівок: зв'язок з використанням протеза, швидкістю ходьби та якістю життя.....93

Сингаївський А.М., Насонова Т.І.

Клінічний аналіз та нейрофізіологічний моніторинг посттравматичних уражень периферичних нервів верхніх та нижніх кінцівок у військовослужбовців..... 100

Кіх А.Ю., Ярмолюк Ю.О., Смик О.О., Бур'янов О.А.

Транстибіальна реампутація після бойової травми: порівняння косих клаптів і довгого заднього клаптя при формуванні кукси..... 108

Проценко В.В., Волков В.О., Соболевський Ю.Л., Кухарук А.С.

Результати застосування методик остеосинтезу в комплексному лікуванні пацієнтів з метастатичними пухлинами довгих трубчастих кісток кінцівок..... 120

Огляд

Головаха М.Л., Чорний В.М.

Сучасні концепції лікування ушкоджень задньолатерального кута колінного суглоба..... 130

Лікарю, що практикує

Кравець Р.А., Чорна В.В., Маринич Л.І., Постовітенко К.П., Гуменюк І.П.

Комплексна реабілітація лопатково-грудної дискінезії при тракційній нейропатії довгого грудного нерва: клінічний випадок..... 139

Ie.I. Slynko, O.S. Nekhlopochyn, V.I. Fortunenko, V.V. Verbov, Yu.V. Derkach

Vertical load distribution between the support structures and regional annulus fibrosus stress patterns in the cervical spine during flexion and extension: a finite element study 60

L.O. Kylymniuk, V.M. Kovalchuk, M.M. Matsipura, V.O. Movchaniuk, Yu.A. Kulyk

Morphometric parameters of the proximal tibia across joint line obliquity types in medial knee osteoarthritis 77

O.Yu. Usenko, A.S. Klimas

Fluorescence-navigated video-assisted thoracoscopic surgery in the treatment of post-traumatic pleural empyema in combat injuries of the chest. Postoperative assessment..... 85

F.V. Klymovytskyi, A.V. Verba, Yu.O. Bezsmertnyi, V.I. Shevchuk, O.Yu. Branitskyi, H.V. Bezsmertna

Tunnel neuropathies of lower-limb amputation stumps: association with prosthesis use, walking speed, and quality of life 93

A.M. Synhaivskyi, T.I. Nasonova

Clinical analysis and neurophysiological monitoring of post-traumatic peripheral nerve injuries of the upper and lower extremities in military personnel 100

A.Yu. Kikh, Yu.O. Yarmoliuk, O.O. Smyk, O.A. Burianov

Transtibial reamputation after combat trauma: comparison of skew flaps and a long posterior flap when forming a residual limb 108

V.V. Protsenko, V.O. Volkov, Yu.L. Sobolevskiy, A.S. Kukharuk

Results of the use of osteosynthesis techniques in the comprehensive treatment of patients with metastatic tumors of the long tubular bones of the extremities..... 120

Reviews

M.L. Golovakha, V.M. Chorniy

Modern concepts of treating posterolateral corner injuries 130

To General Practitioner

R.A. Kravets, V.V. Chorna, L.I. Marynych, K.P. Postovitenko, I.P. Humeniuk

Comprehensive rehabilitation of scapulothoracic dyskinesia in traction neuropathy of the long thoracic nerve: a clinical case 139

УДК 616-001.45:579.8 *DOI: https://doi.org/10.22141/1608-1706.5.27.2026.1110*

Степанюк С.В.[1], Прилипко В.О.[1], Обертинська О.В.[1], Анкін М.Л.[1], Ладика В.О.[1], Тертишний С.В.[1, 2], Завертиленко Я.С.[1], Кравець Д.Т.[1]
[1]Національний університет охорони здоров'я України імені П.Л. Шупика, м. Київ, Україна
[2]Військово-медичний клінічний центр Південного регіону, м. Одеса, Україна

Бактеріологічний пейзаж та профіль антимікробної резистентності вогнепальних та вибухових пошкоджень дистального відділу великогомілкової кістки: ретроспективний когортний аналіз

Резюме. ***Актуальність.*** *Бойові поранення нижніх кінцівок асоційовані з високою частотою полімікробних ранових інфекцій, спричинених мультирезистентними (Multiple Drug Resistance, MDR) збудниками. Своєчасна та об'єктивно обґрунтована ідентифікація збудників ранового процесу залишається критично невирішеним питанням та надзвичайно вагомим і затребуваним діагностичним інструментом у військовій травматології в умовах російської агресії проти України в період з 2022 року і до сьогодні.* ***Матеріали та методи.*** *Проведено ретроспективний аналіз бактеріологічних досліджень 35 поранених-військовослужбовців (100 % чоловіки) з вогнепальними та вибуховими пошкодженнями дистального відділу великогомілкової кістки, які перебували на лікуванні у відділенні травматології та ортопедії КНП «Київська міська клінічна лікарня № 8». Проаналізовано 84 бактеріологічних дослідження та 1188 точок даних антибіотикограм. Категорії чутливості — за критеріями EUCAST. Полімікробним вважали бактеріологічний посів, що містив ≥ 2 патогени. Тривалість спостереження — інтервал між першим та останнім датованим бактеріологічним дослідженням. У клінічне спостереження входили поранені військовослужбовці, які надходили до відділення з 2-ї по 21-шу добу після поранення та проходили через 2–3 евакуаційні лікарні, що відповідає II–III рівню НАТО (ROLE II — ROLE III), перш ніж прибути до останнього закладу, де і проводився перший бактеріальний аналіз на контамінацію ранового дефекту гомілки.* ***Результати.*** *Бактеріальна контамінація ідентифікована у 21/35 поранених (60,0 %). Загальна резистентність — 41,9 % (498/1188). Домінуючі збудники: Staphylococcus aureus (19 ізолятів; 25,7 %), Klebsiella pneumoniae (13 ізолятів; 67,4 %), Acenobacter baumannii (11 ізолятів; 75,2 %). Метицилін-резистентний S. aureus (Methicillin-resistant S. aureus, MRSA) підтверджено у 2 поранених. Карбапенем-резистентна K. pneumoniae (Carbapenem-resistant K. pneumoniae, CRKP) виявлена у 5 поранених, карбапенем-резистентний A. baumannii (carbapenem-resistant A. baumannii, CRAB) — у 6 поранених. Полімікробні бактеріологічні посіви виявлені в 11/35 (13,1 %) обстежуваних поранених. Медіана тривалості мікробіологічного спостереження — 31 день (діапазон 2–608); у трьох поранених — понад 150 днів, кількість серійних посівів сягала від 7 до 11.* ***Висновки.*** *Проаналізовано бактеріальні збудники, отримані з ранової поверхні вогнепальних та вибухових ран гомілки українських військових (червень 2023 — травень 2026 р.). Встановлено домінування мультирезистентних (MDR) та екстремально резистентних (XDR) мікроорганізмів, переважали S. aureus, A. baumannii, K. pneumoniae. Дані документують значний тягар CRAB, CRKP та MRSA при бойових пошкодженнях гомілки, що узгоджується з дослідженнями інших українських авторів, які зазначають, що в Україні антимікробна резистентність є однією з найактуальніших загроз національній безпеці в секторі охорони здоров'я. Також виявлені слабкі місця стандартної бактеріологічної діагностики, заснованої на фенотиповому методі, що унеможливлює застосування антибіотиків резерву, які мають призначатися*

© «Травма» / «Trauma» («Travma»), 2026
© Видавець Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2026

Для кореспонденції: Ладика Вікторія Олександрівна, кандидат медичних наук, доцент, кафедра ортопедії, ортопластичної хірургії та протезування, Національний університет охорони здоров'я України імені П.Л. Шупика, вул. Дорогожицька, 9, м. Київ, 04112, Україна; e-mail: ladika084@gmail.com, ladika62@ukr.net
For correspondence: Viktoriia O. Ladyka, PhD in Medicine, Associate Professor, Department of Orthopedics, Orthoplastic Surgery and Prosthetics, Shupyk National Healthcare University of Ukraine, Dorohozhytska st., 9, Kyiv, 04112, Ukraine; e-mail: ladika084@gmail.com, ladika62@ukr.net
Full list of authors information is available at the end of the article.

за результатами генетичного аналізу резистентності бактерій інфекційної рани та оцінки генів вірулентності/утворення біоплівки в місці ранового дефекту гомілки. Таким чином, постає питання про розробку досконалих алгоритмів діагностики патогенів бойових травм та впровадження молекулярних методів діагностики широкого спектра патогенів ранових дефектів гомілки разом з ідентифікацію факторів вірулентності/генів резистентності ідентифікованих мікроорганізмів. Це дозволить зберегти здоров'я пораненим військовим, зменшити час перебування в умовах лікарні та застосовувати відповідну етіопатогенетичну антибіотикотерапію, контролювати поширення резистентних штамів в Україні.

Ключові слова: *бойові поранення; антимікробна резистентність; вогнепальні дефекти гомілки; карбапенем-резистентність; MDR, CRAB; CRKP; MRSA; полімікробна інфекція; метагеноміка; Україна; нижня кінцівка; пролонгована госпіталізація*

Вступ

Інфекційний тягар сучасних бойових поранень

Ранові інфекції є однією з провідних причин захворюваності та пролонгованої госпіталізації серед військовослужбовців, що зазнали бойових поранень під час воєнних конфліктів. На відміну від цивільної травми сучасні бойові поранення супроводжуються масивним поліструктурним руйнуванням м'яких тканин, забрудненням ґрунтом, іншими складовими зовнішнього середовища і тривалим контактом із нозокоміальними патогенами в евакуаційному ланцюзі [1]. Також спостерігалось поєднання різних видів мікроорганізмів у рановому субстраті та полірезистентність до антимікробних препаратів [2]. Частота інфекційних ускладнень при тяжких пошкодженнях кінцівок коливається від 19 до 56 %; поранення гомілки займають непропорційно велику частку бойової травми внаслідок обмеженого ресурсу покривних тканин, унікального кровопостачання та високої частоти поліструктурних пошкоджень, що відповідають переломам 3A–3C за класифікацією Gustillo-Anderson при вибухових ураженнях [3, 4].

У попередніх дослідженнях вогнепальних ранових дефектів нижніх кінцівок з контамінацією бактеріями навколишнього середовища у 1980-х роках бактерії роду *Acinetobacter* були практично відсутні. Хоча вже перші лабораторні результати при дослідженні вогнепальних ран, у яких ідентифікували *Acinetobacter baumannii*, почали з'являтися під час В'єтнамської війни. У наступних світових воєнних конфліктах почали з'являтися численні звіти, що підкреслювали їхню поширеність у лікарнях; ці збудники ставали дедалі важливішою причиною внутрішньолікарняних інфекцій, особливо у відділеннях інтенсивної терапії [3]. Саме роль *Acinetobacter baumannii* як нозокоміального патогена стала більш вагомою під час воєнних конфліктів в Іраку та Афганістані. Спостереження лікарів за численними інфекціями, зокрема невстановленої етіології, у поранених, які лікувалися у військових медичних закладах, констатували високу стійкість до антимікробних препаратів, включно з появою штамів, стійких до карбапенемів [3]. Таким чином, вже з 2002 року *A. baumannii* був визначений як глобальна проблема [5], а карбапенем-стійкий *A. baumannii* був визначений ВООЗ як патоген особливої уваги для дослідження та розробки нових схем лікування запально-деструктивних процесів гомілки [6]. Високий рівень стійкості до антимікробних препаратів є проблемою для клініцистів, які лікують інфекції *A. baumannii*, і особливо для загоєння бойових ран після оперативного втручання у поранених військовослужбовців.

Збройний конфлікт в Україні та поширення MDR-збудників

Повномасштабне вторгнення Росії в Україну (з лютого 2022 р.) та зміна парадигм ведення бойових дій сформували значний резервуар високорезистентних госпітальних мікроорганізмів і створили сприятливі умови для прискореного поширення резистентних збудників інфекцій не лише в Україні, але така тенденція може вплинути на систему охорони здоров'я країн — сусідів України.

Під час розширеного когортного дослідження (з червня 2023 по травень 2026 р.) більше ніж 1000 ізолятів грамнегативних організмів з множинною лікарською стійкістю (МЛС), поданих для верифікації до референс-лабораторії Центру громадського здоров'я, підтверджують постійне поширення внутрішньолікарняних мікроорганізмів з МЛС в Україні. Було виявлено, що ~ 60 % верифікованих штамів *K. pneumoniae* мали MBL (Class B metallo-beta-lactamases), що забезпечує майже панрезистентність до β-лактамів. Дослідження L. Kasatkina та співавт. (2026) констатує, що в бойових ранах військовослужбовців в Україні найчастіше зустрічаються резистентні *Enterococcus faecium, Staphylococcus aureus, Klebsiella pneumoniae* та *Pseudomonas aeruginosa* [7].

Ljungquist та співавт. (2023) показали стійкість до меропенему у 76 % ізолятів *Klebsiella pneumoniae* та 73 % ізолятів *Acinetobacter baumannii* від 141 пораненого в Європі [5]. Sandfort та співавт. задокументували зростання NDM-1/OXA-48-продукуючих *K. pneumoniae* у Німеччині — безпосередньо пов'язане з пораненими з України [8]. Kondratiuk та співавт. (2025) секвенували 68 ізолятів *A. baumannii*: ділянка ідентифікації — blaOXA-23 (ST2/ST19), майже тотальна стійкість до фторхінолонів [9]. Проспективне дослідження 2024 р. (73 військових) зафіксувало рівень MDR 84,6 %, при цьому *A. baumannii* (36 %) домінував [10].

Ці дані позиціонують Україну як унікальне вогнище поширення MDR-збудників у Європі, внаслідок воєнних дій на її території. У зв'язку з цим виникла нагальна необхідність поглибленого вивчення метагеномного мі-

кробіологічного ландшафту бойових поранень з метою мінімізації впливу полірезистентних інфекцій на перебіг післяопераційного стану пораненого з вогнепальними пошкодженнями гомілки та обмеження поширення нових резистентних збудників за межі України.

Обмеження класичної бактеріологічної діагностики

Стандартний бактеріологічний посів із рани має час виконання 48–72 години для отримання первинної культури. Визначення чутливості до антибіотиків збільшує час очікування до 7 днів. При прогресуючих запально-деструктивних процесах або загрозі остеомієліту — частих ускладненнях бойової поліструктурної вибухової травми гомілки — ця затримка унеможливлює корекцію терапії у «хірургічному вікні» (найбільш рання хірургічна обробка рани). Класичне бактеріологічне дослідження не виявляє некультивованих мікроорганізмів, не чутливе до мінорних популяцій бактерій і не надає інформації про їх генотипові детермінанти резистентності (*mecA, blaOXA, blaNDM, mcr-1*) чи гени утворення біоплівки (*icaA, pelB, pslA*), а вони суттєво можуть підвищувати вірулентність бактерій, які колонізують вогнепальні рани [11]. Як наслідок — вимушені серійні повторні бактеріологічні дослідження протягом тижнів і місяців: стратегія, що відображає недостатність стандартної діагностики.

Метагеномне секвенування як рішення

Метагеномне NGS і мультиплексні ПЛР-панелі забезпечують одночасну ідентифікацію всіх видів, генів резистентності та факторів вірулентності за 6–8 годин [11, 12]. При кісткових інфекціях метагеномне NGS і мультиплексні ПЛР-панелі підвищують діагностичні знахідки порівняно з класичною бактеріологією, особливо при остеомієліті гомілки з неідентифікованим бактеріальним патогеном, та культуронегативними випадками гнійних інфекцій ран [12].

Мета дослідження

Мета: охарактеризувати бактеріологічну контамінацію, профілі антимікробної резистентності та тягар мікробіологічного моніторингу у поранених військовослужбовців із бойовими пошкодженнями гомілки, які були оперовані та перебували на лікуванні в київському закладі охорони здоров'я (КМКЛ № 8); ідентифікувати діагностичні недоліки стандартної моделі мікробіологічного дослідження вогнепальних ранових дефектів гомілки з метою усунення їх з подальшою тактикою удосконалення алгоритмів лабораторної діагностики бойових поранень гомілки військовослужбовців в Україні.

Матеріали та методи

Дизайн дослідження та клінічна база

З червня 2024 року по березень 2026 року на базі відділення травматології та ортопедії КНП «Київська міська клінічна лікарня № 8» проведено ретроспективне дослідження за участю 35 поранених із вогнепальними та комбінованими вибуховими переломами дистального відділу обох кісток гомілки. Госпіталізація поранених у КМКЛ № 8 м. Києва з поліструктурними пошкодженнями гомілки відбувалась по евакуації з I та II рівнів надання медичної допомоги згідно з етапами та маршрутами евакуації КМС ЗСУ. Поранені надходили в лікувальний заклад з 2-ї по 21-шу добу від моменту поранення, що було обумовлено бойовою обстановкою (тривале ведення бойових дій), тяжким станом пораненого, що не дозволяв без стабілізації вітальних показників проводити евакуацію на наступний рівень.

Усім пораненим надавалась хірургічна та лікувальна медична допомога в умовах стаціонарного відділення травматології та ортопедії КМКЛ № 8 м. Києва, яка здійснювалась високодосвідченими хірургами кафедри ортопедії, ортопластичної хірургії та протезування Національного університету охорони здоров'я (НУОЗ) України імені П.Л. Шупика під керівництвом проф. М.Л. Анкіна (у рамках меморандуму про клінічну базу університету та наукову співпрацю). Заклад приймає бойових поранених, евакуйованих із зони активних бойових дій до Києва в рамках евакуаційного ланцюга, та надає спеціалізовану хірургічну допомогу травмованим військовослужбовцям. Під час лікування проводили бактеріологічне дослідження біологічного матеріалу відповідно до затверджених рекомендацій.

Мікробіологічні дослідження в контексті лікування поранених були проаналізовані мультифаховою командою із залученням фахівців кафедри мікробіології, вірусології та імунології НУОЗ України імені П.Л. Шупика.

Когорта пацієнтів

У когортне дослідження включено 35 поранених-військовослужбовців із бойовими відкритими пошкодженнями гомілки (за класифікацією Gustillo-Anderson рівень 3A–3C [13]), що перебували на лікуванні у зазначеному вище закладі у період з червня 2024 до березня 2026 року, яким проводилося бактеріологічне обстеження ран. Усі поранені — чоловіки. Медіана віку — 38,5 року (діапазон 20–53; M ± SD 37,9 ± 9,0). Під час лікування військовослужбовців було виконано 84 бактеріологічні посіви (середня кількість посівів на одного хворого 3,2 ± 2,9; медіана 2,0; діапазон 1–11). Для шести поранених-військовослужбовців виконано ≥ 5 бактеріологічних посівів, троє поранених мали ≥ 7 бактеріологічних посівів за весь період лікування.

Бактеріологічні методи

Зразки пораенених (мазки ранової поверхні, виділення з прооперованої рани, біоптати) відбирали та досліджували за стандартними процедурами бактеріологічної лабораторії КМКЛ № 8 відповідно до затверджених МОЗ України методик.

Зразки відбирали під час хірургічного втручання або під час післяопераційної перев'язки рани за таким алгоритмом:

— 1-й зразок для бактеріологічного посіву — під час операції;

— 2-й зразок — через тиждень під час вакуумної терапії ран (Vacuum-Assisted Closure);

— 3-й зразок — ще через тиждень, посів при відновленні цілісності пошкодженої анатомічної структури рани.

У випадку прогресуючих явищ запалення з наявністю ускладнень відбирали додаткові зразки для бактеріологічного посіву під час повторних оперативних втручань. Максимальна кількість зразків для одного пораненого досягала 11 бактеріологічних посівів.

У випадках абсцесів, фістул, гангрени, некрозу тканин гомілки паравульнарні структури обробляли антисептиком; некротичні маси, детрит, гній видаляли, а з основи ураження відбирали щонайменше 1 мл ранового субстрату. Зразок відбирали з глибини пошкодженої ділянки на межі зі здоровою тканиною та поміщали у стерильну пробірку, транспортне середовище або шприц із закритою голкою. У разі використання тампонів матеріал збирали за допомогою двох стерильних тампонів круговими рухами від центру рани до периферії до рівномірного просочення; один тампон використовували для бактеріоскопії, а інший — для посіву.

У разі комбінованих пошкоджень з наявністю опіків, виразок та ерозій використовували зразки біопсії діаметром не менше ніж 3 мм. Вирізані панч-ножем для біопсії фрагменти тканини поміщали у стерильний контейнер із 1–3 краплями стерильного 0,9% розчину NaCl. При опіках мікроорганізми можуть колонізувати поверхню нерівномірно, тому відбір зразків здійснювали із декількох ділянок у межах запаленої зони.

Хірургічні зразки (наприклад, при біопсії кісток та м'яких тканин) відбирали у стерильний контейнер із 0,9% розчином NaCl. Уміст дренажів з ранового простору гомілки, 1–2 мл секрету, відбирали стерильним шприцом у стерильну пробірку. Стерильний, герметично закритий первинний контейнер, що запобігає утворенню аерозолю, поміщали у пакет з абсорбуючою прокладкою (вторинна упаковка), а потім — у транспортний контейнер (третинна упаковка), при цьому направлення розміщували у відведеній для цього кишені. Зразки, що транспортувалися до бактеріологічної лабораторії без поживних транспортних середовищ, доставлялись до лабораторії протягом 2 годин для збереження життєздатності збудників, запобігання надмірному росту мікроорганізмів, збереження початкового співвідношення мікроорганізмів, мінімізації впливу місцевих антисептиків з антимікробною дією та забезпечення точної діагностики й оцінки етіопатогенетичного лікування.

Бактеріологічна лабораторія лікувального закладу всі бойові поранення досліджувала за переліком основних збудників групи ESKAPE (згідно з визначенням ВООЗ) [11, 12]: *Enterococcus faecium, Staphylococcus aureus, Klebsiella pneumoniae, Acinetobacter baumannii, Pseudomonas aeruginosa* та *Escherichia coli* (що представляє *Enterobacter* spp.), а також *Enterococcus faecalis*. Крім того, обов'язково виконувався бактеріологічний тест на чутливість до антимікробних препаратів: дисково-дифузійний тест на чутливість до антибіотиків Кірбі — Бауера згідно з EUCAST [14] для придатних ізолятів, що мали позитивний культуральний ріст.

Визначені категорії бактеріологічних посівів

Полімікробний посів — це виявлення ≥ 2 клінічно значущих бактеріальних патогенів в одному зразку (ґрунтова Гр+ спорова паличка виключена) із субстрату ранового дефекту гомілки.

Multidrug resistance (MDR) — мультирезистентність — це нечутливість до ≥ 1 антимікробного препарату (АМП) у ≥ 3 категоріях АМП (Magiorakos, 2012 [15]).

CRAB/CRKP — фенотипова стійкість (С) бактерій до ≥ 1 карбапенему (меропенему, іміпенему та/або ертапенему).

MRSA — метицилін-резистентний *S. aureus* (methicillin-resistant *S. aureus*) — у нашому дослідженні визначали стійкість бактерій *S. aureus* до оксациліну.

Проксі-тривалість спостереження — інтервал між першим та останнім датованим посівом для поранених із ≥ 2 датованими записами.

Обробка даних і статистика

Дані вносились до файлу Excel. Автори використовували систему Claude (Anthropic) для систематизації первинних даних. Застосовано описову статистику. Усі статистичні показники були перевірені авторами на відповідність первинному набору даних по кожному клінічному випадку (пораненому). Автори беруть на себе повну відповідальність за цілісність даних.

Етичні аспекти

Дослідження відповідає Гельсінській декларації. Перед початком дослідження було отримано етичне та наукове схвалення наглядової ради КНП «Київська міська клінічна лікарня № 8». Письмова інформована згода була взята від усіх поранених перед початком лікувального процесу. Для аналізу використовувалися наявні записи з обов'язкового епідеміологічного нагляду за резистентністю до антимікробних препаратів у лікарні. У рамках рутинного нагляду реєструвалися лише агреговані дані, і на жодному етапі не збиралася інформація, що дозволяє ідентифікувати пацієнтів.

Результати

Мікробіологічні знахідки лабораторних досліджень

Результати бактеріологічних досліджень 35 поранених військовослужбовців з вогнепальними та вибуховими травмами гомілки у даному когортному дослідженні підтвердили переважання неферментуючих грамнегативних мікроорганізмів. Бактерійні патогени було виявлено у 21 пораненого із 35 (60,0 %). У 14 військовослужбовців (40,0 %) були отримані виключно негативні результати бактеріологічних досліджень при стандартній процедурі дослідження лабораторії лікарні або ґрунтова нормофлора. Загалом було висіяно 79 ізолятів у 84 посівах, ідентифіковано 15 видів або видових комплексів.

Спектр збудників та антимікробна резистентність

Видовий склад збудників інфекцій ран 35 поранених військовослужбовців наведений у табл. 1. Результати наших досліджень показали домінування трьох провідних бактеріальних збудників бойових ран гомілки (54,4 % ізолятів) серед всіх виділених ізолятів бактеріологічного пейзажу досліджуваної когорти поранених: *S. aureus* — 19 ізолятів (24,0 %), *K. pneumoniae* — 13 (16,5 %), *A. baumannii* — 11 (13,9 %). Значне зростання частоти виділення *K. pneumoniae* з бойових ран цього дослідження підтверджує тенденцію, описану V.P. Kovalchuk та співавт. [2, 16], оскільки частота виділення цього виду бактерій зросла до 16,5 % порівняно з 8,6 % до початку повномасштабної війни. Серед інших представників родини *Enterobacteriaceae*, виявлених у вмісті ран, *E. coli* було ідентифіковано у 7,6 % випадків, а *Enterobacter cloacae* — у 1,3 %. Серед неферментуючих грамнегативних бактерій частота виділення *A. baumannii* становила 13,9 %, але *P. aeruginosa* зустрічається значно рідше і в нашому дослідженні становила 1,3 % виділень, що об'єктивно засвідчує трансформацію бактеріальної контамінації вогнепальних ран гомілок.

Слід відмітити значний приріст частки грампозитивних коків, особливо *S. aureus*, що становила 24,0 %, тоді як частка *Enterococcus faecalis* була низькою — 6,3 %, а частка *Enterococcus faecium* — 2,5 %. Хоча за даними V.P. Kovalchuk та співавт. [2, 16], частка ентерококів у гнійних ранах поранених до війни з Росією 2022 року становила 13,6 %.

Однак слід відмітити, що в бактеріальній контамінації нашого дослідження загальна кількість результатів резистентності (стійкість до антибіотиків) ідентифікованих патогенів становила 41,9 % (498/1188); чутливих до антибіотиків було виявлено 54,0 % і 4,0 % — чутливих при підвищеній концентрації (ЧППК). Серед трьох провідних бактеріальних збудників бойових ран гомілки (54,4 % ізолятів) найбільше резистентних результатів було виявлено для ізолятів *A. baumannii* — 75,2 %, *K. pneumoniae* — 67,4 % і для ізолятів *S. aureus* — 25,7 % резистентних до антимікробних препаратів. Однак найвища кількість результатів резистентності також спостерігалась і для менш поширених бактерійних збудників бойових ран гомілки: *E. faecium* (70,8 %), *Enterobacter cloacae* (68,8 %), *P. aeruginosa* (64,3 %) — найвища резистентність. Для ізолятів *Proteus mirabilis* виявлена повна чутливість мікроорганізмів (0/61 тест), що колонізують катетери сечового міхура та утворюють біоплівки [17].

Резистентність до карбапенемаз та критичні фенотипи

Карбапенем-резистентність виявлена у щонайменше 16 поранених (9 видів; табл. 2), CRAB (carbapenem-resistant *A. baumannii*) виявлено у 6 поранених (№ 12, 15, 16, 22, 32, 34).

Карбапенем-резистентна *K. pneumoniae* (carbapenem-resistant *K. pneumoniae*, CRKP) виявлена у 5 поранених (№ 5, 10, 29, 33, 35).

Фенотипова карбапенем-резистентність також додатково виявлена у ізолятів *E. coli* (3 пацієнти; стійкість

Таблиця 1. Спектр збудників та профіль чутливості до антибіотиків

Збудник	Ізоляти, n (%)	АБГ-тести, n	Стійких, n (%)	Чутливих, n (%)	ЧППК, n (%)
Staphylococcus aureus	19 (24,0)[a]	257	66 (25,7)	178 (69,3)	13 (5,1)
Klebsiella pneumoniae	13 (16,5)	242	163 (67,4)	75 (31,0)	4 (1,7)
Acinetobacter baumannii	11 (13,9)	141	106 (75,2)	32 (22,7)	3 (2,1)
Staphylococcus epidermidis	8 (10,1)	118	30 (25,4)	82 (69,5)	6 (5,1)
Escherichia coli	6 (7,6)	108	21 (19,4)	83 (76,9)	4 (3,7)
Enterococcus faecalis	5 (6,3)	52	18 (34,6)	33 (63,5)	1 (1,9)
Providencia rettgeri	2 (2,5)	35	22 (62,9)	12 (34,3)	1 (2,9)
Providencia stuartii	2 (2,5)	34	8 (23,5)	22 (64,7)	4 (11,8)
Pantoea agglomerans	3 (3,8)	49	20 (40,8)	25 (51,0)	4 (8,2)
Proteus mirabilis	3 (3,8)	61	0 (0,0)	61 (100,0)	0 (0,0)
Achromobacter species	2 (2,5)	24	4 (16,7)	14 (58,3)	6 (25,0)
Enterococcus faecium	2 (2,5)	24	17 (70,8)	7 (29,2)	0 (0,0)
Enterobacter cloacae	1 (1,3)	16	11 (68,8)	4 (25,0)	1 (6,2)
Pseudomonas aeruginosa	1 (1,3)	14	9 (64,3)	4 (28,6)	1 (7,1)
Разом	**79[a]**	**1188**	**498 (41,9)**	**642 (54,0)**	**48 (4,0)**

Примітки: АБГ — антибіотикограма; ЧППК — чутливий при підвищеній концентрації (EUCAST); [a] — включає ізолят MRSA.

до іміпенему) та *Pantoea agglomerans* (2 поранені, стійкість до меропенему та/або іміпенему). Ці знахідки є нетиповими для цивільних травм та зазвичай пов'язані з горизонтальним переносом карбапенемаз класу B (NDM) чи класу D (OXA48-типу).

Pantoea agglomerans — це бактерія, яка зазвичай зустрічається в навколишньому середовищі (на рослинах, у воді та ґрунті), але може викликати опортуністичні інфекції в організмі людини. Останніми роками фіксуються випадки карбапенем-резистентних штамів цього патогену, особливо в умовах інтенсивної терапії або в ослаблених пацієнтів — поранених [18]. Автори дослідження наголошують, що *Pantoea agglomerans*, представник родини *Erwiniaceae*, який рідко інфікує людей, стає стійким до ліків внутрішньолікарняним патогеном. Заміна ізолятів з навколишнього середовища на патогени людини загострює питання антибіотикорезистентності, ставлячи під загрозу догляд за пораненими та результати лікування. Цей фенотип потребує глибшого молекулярного дослідження (визначення генів карбапенемаз методом ПЛР чи NGS-сиквенсу).

Карбапенем-резистентність також виявлена у ізолятів *Providencia rettgeri* (поранений № 11), *Providencia stuartii* (поранений № 11), *Enterobacter cloacae* (поранений № 12), *Achromobacter species* (поранений № 20), *Pseudomonas aeruginosa* (поранений № 35), які також потребують молекулярно-генетичного детального аналізу, оскільки стандартна процедура бактеріологічної лабораторії лікарні не передбачає їх поглиблену характеристику, що, у свою чергу, не дає можливості оцінити їх тягар щодо створення умов для ускладнень у післяопераційний період бойових травм гомілки військових.

MRSA у ізолятів *S. aureus* підтверджено фенотипово (стійкість до оксациліну) у 2 поранених (№ 14, 22).

VRE — ванкоміцин-резистентних ентерококів під час дослідження не виявлено.

Полімікробна флора

У нашому дослідженні 11 із 84 бактеріологічних посівів (13,1 %) визначені як полімікробні (табл. 3). У пораненого № 11 було виявлено три полімікробні результати посівів, зокрема повторне виявлення тієї самої коінфекції *E. coli* + *Providencia rettgeri* у послідовних посівах (посіви № 3 та 4), що свідчить про триваючу полімікробну колонізацію, незважаючи на багаторазовий моніторинг результатів посівів. У багатьох пацієнтів було зафіксовано клінічно складні комбінації грамнегативного мікроорганізму, резистентного до карбапенему, з грампозитивним патогеном: CRAB + *S. aureus* (поранений № 22, два посіви), CRKP + *E. faecalis* (поранені № 12 та 16) та CRKP + *S. epidermidis* (поранені № 33 та 35). Ці комбінації супутніх інфекцій становлять справжню дилему при виборі правильної антибіотикотерапії, оскільки жоден окремий препарат не може адекватно охопити весь спектр резистентності.

Тривалість спостереження як проксі-показник тривалості лікування

У цьому дослідженні ми спирались на дані госпіталізації, тому інтервал між першим і останнім датованим посівом використовувався як об'єктивний показник, отриманий на основі даних з лабораторії, що відображає тривалість активного мікробіологічного моніторингу.

Було встановлено, що серед 20 пацієнтів із ≥ 2 датованими посівами медіана тривалості становила 31 день (діапазон 2–608; M ± SD 80,1 ± 137,5 дня). У трьох поранених інтервал перевищив 150 днів (дані наведені в табл. 4), відображаючи найбільш ресурсоємні процедури бактеріологічного спостереження.

Поранений № 14 мав 608 днів бактеріологічного спостереження (вересень 2024 — травень 2026). Перший бактеріологічний посів зроблений в 1-й день госпіталізації на клінічній базі КНП «КМКЛ № 8» (6-й день після поранення та евакуації) — в рані іден-

Таблиця 2. Розподіл карбапенем-резистентних ізолятів по видах та серед поранених

Збудник	Пацієнти, n	ID пацієнтів	Карбапенеми (к-сть пацієнтів)	Фенотип
Acinetobacter baumannii	6	[12, 15, 16, 22, 32, 34]	IMI (4), MEM (4), ETП (3)	**CRAB**
Klebsiella pneumoniae	5	[5, 10, 29, 33, 35]	MEM (5), IMI (3), ETП (2)	**CRKP**
Escherichia coli	3	[8, 11, 15]	IMI (3)	**CR-EC**[a]
Pantoea agglomerans	2	[6, 21]	MEM (2), IMI (1)	**CR-PA**[a]
Providencia rettgeri	1	[11]	ETП (1), IMI (1)	–
Providencia stuartii	1	[11]	IMI (1)	–
Enterobacter cloacae	1	[12]	IMI (1)	–
Achromobacter species	1	[20]	IMI (1)	–
Pseudomonas aeruginosa	1	[35]	IMI (1)	–

Примітки: IMI — іміпенем; MEM — меропенем; ETП — ертапенем;. CRAB — карбапенем-резистентний A. baumannii; CRKP — карбапенем-резистентна K. pneumoniae; CR-EC — карбапенем-резистентна E. coli; CR-PA — карбапенем-резистентна P. agglomerans; [a] — карбапенем-резистентні результати визначено фенотипово; молекулярні механізми (гени резистентності) не визначались.

тифіковано Гр+ спорову паличку (нормальна м/флора ґрунту) + *Staphylococcus epidermidis* (нормальна м/флора шкіри людини). А вже в наступних посівах (протягом 47 днів перебування у лікарні), зокрема і у вмісті абсцесу, був виявлений лише ізолят *S. aureus*, що мав MRSA. Однак лікування пораненого було довготривалим та мало ускладнення (нагноювання та поява запальних процесів в інших ділянках, не пов'язаних з бойовими ранами гомілок). Є підозра, що такий тривалий та складний процес лікування та одужання пораненого міг бути спровокований наявністю в рані іншої мікрофлори, яку не вдалося ідентифікувати класичними бактеріологічними методами.

Поранений № 29 мав максимальну кількість бактеріологічних досліджень — 11 посівів за 188 днів лікування. Перший бактеріальний посів був відібраний в 1-й день госпіталізації (9-й день від поранення) до КНП «КМКЛ № 8» (в анамнезі декілька ЗОЗ в евакуаційному ланцюзі) та одразу виявлено ізолят *K. pneumoniae*, резистентної до карбапенемів (CRKP), яка колонізувала рану протягом 2 місяців, загоєння рани та одужання було вкрай ускладнене. Однак вже на 3-й місяць в рані виявляли лише *S. aureus* (чутливий майже до 15 антибіотиків). Подальше довготривале бактеріологічне спостереження постійно виявляло цей штам бактерії з широкою чутливістю до антибіотиків в одній і тій самій рані гомілки. Але стан пораненого не лише ускладнювався первинною обширною вогнепальною раною кінцівки з вогнепальними переломами, складним та об'ємним оперативним втручанням, а й в подальшому супроводжувався некротомією ураженої ділянки гомілки, що потребувало постійної ревізії некротичних та гнійних ділянок, часткової дермопластики і врешті-решт закінчилося ампутацією дистальної частини гомілки. Важливо відмітити, що, як і у попередньому клінічному випадку, ускладнення у цього пораненого, ймовірно, розвивались за наявності іншої неідентифікованої мікрофлори з резистентністю до антимікробних препаратів та генами, що дозволяють утворювати біоплівки і збільшувати вірулентність та пролонговану персистенцію в рані на фоні застосованої антимікробної терапії.

У пораненого № 5 також впродовж 188 днів (28.05–02.12.2025) у всіх трьох датованих посівах, починаючи від моменту госпіталізації (перший бактеріальний посів був відібраний в 1-й день госпіталізації до КНП «КМКЛ № 8», але в анамнезі декілька ЗОЗ в евакуаційному ланцюзі, тобто це 21-й день після поранення), виявляли ізолят *K. pneumoniae*, резистентний до карбапенемів (CRKP), у кожному наступному зразку — що є переконливим свідченням резистентної до лікування колонізації або хронічної інфекції, яку не вдалося ліквідувати за допомогою стандартного підходу на основі антибіотикограми.

Поранений № 22 — 9 посівів за 76 днів, під час яких виявляли CRAB + MRSA — найскладніший мікробіологічний профіль досліджуваної когорти поранених.

Шість поранених із ≥ 5 бактеріологічними посівами та троє із ≥ 7 посівами є підгрупою, у якій подовжена діагностична траєкторія безпосередньо відображає неспроможність послідовного культурального підходу надати вичерпну характеристику на початку інфекції.

Обговорення

Спектр збудників у контексті збройного конфлікту в Україні

Бактеріологічні знахідки когорти поранених-військовослужбовців у КМКЛ № 8 нашого дослідження повністю узгоджуються з національними й міжнародними даними та результатами досліджень муль-

Таблиця 3. Полімікробна флора (≥ 2 клінічно значущих супутніх збудники в одному зразку)

Пацієнт №	Посів №	Збудники	Клінічна примітка
8	1	*Escherichia coli* + *Proteus mirabilis*	Грамнегативні; *E. coli* CR-іміпенем
10	3	*Enterococcus faecalis* + *Staphylococcus epidermidis*	Обидва Гр+, MRSE підтверджено
11	2	*Klebsiella pneumoniae* + *Providencia stuartii*	CRKP + CR-*Providencia*
11	3	*Escherichia coli* + *Providencia rettgeri*	CR-іміпенем в обох ізолятів
11	4	*Escherichia coli* + *Providencia rettgeri*	Рецидив посіву № 3
12	2	*Acinetobacter baumannii* + *Enterococcus faecalis*	CRAB + Гр+ коінфекція
16	3	*Klebsiella pneumoniae* + *Enterococcus faecalis*	CRAB + Гр+
22	8	*Acinetobacter baumannii* + *Staphylococcus aureus*	CRAB + *S. aureus* MRSA-пацієнт
22	9	*Acinetobacter baumannii* + *Staphylococcus aureus*	Рецидив; 76 днів посівів
33	2	*Klebsiella pneumoniae* + *Staphylococcus epidermidis*	CRKP + MRSE
35	2	*Staphylococcus epidermidis* + *Klebsiella pneumoniae*	CRKP + MRSE (пацієнт одночасно з CRKP + CR-*Ps.aeruginosa*)

Примітки: фенотипи резистентності: CR — карбапенем-резистентний ізолят; CRAB — A. baumannii, резистентний до карбапенемів; CRKP — K. pneumoniae, резистентний до карбапенемів; MRSE — S. epidermidis, резистентний до метициліну; Гр+ — грампозитивні бактерії.

тидисциплінарних груп фахівців, які брали участь у лікуванні військових з України в госпіталях та медичних центрах за кордоном в період з 2022 по 2026 рік. Крім того, наші знахідки збігаються і з даними національного моніторингу референс-лабораторії Центру громадського здоров'я L. Kasatkina та співавт. (2026) [7]. Ми виявили домінування *S. aureus, K. pneumoniae* та *A. baumannii*, що відповідає профілю Holubnycha & Kholodylo (2025) [10]. Автори спостерігали, що найчастішими ізолятами ранових інфекцій у 73 військовослужбовців є *A. baumannii* (36 %), *E. faecalis* (12 %) та *B. cereus* (12 %). Частота множинної лікарської стійкості становить 84,6 %. Кожен виділений вид має певний профіль чутливості до антибіотиків. Кількість штамів з множинною лікарською стійкістю серед грамнегативних бактерій вища, ніж серед грампозитивних.

Виявлена в нашому дослідженні резистентність до карбапенему у *K. pneumoniae* (67,4 %) та *A. baumannii* (75,2 %) повністю узгоджується з даними Visontai та співавт. (2023) у європейських приймальних центрах (76 та 73 % резистентності до меропенему відповідно) [3], а також наближається до майже повної резистентності до карбапенему, задокументованої в дослідженні української мережі лікарень, проведеному Kondratiuk та співавт. (2025) [9]. Ця збіжність даних, отриманих в окремих центрах, на національному рівні та в європейських евакуаційних центрах є переконливим доказом того, що високий рівень поширеності мультилікарської резистентності є характерною рисою самого мікробіому ран, пов'язаних із воєнним конфліктом, а не артефактом, пов'язаним із конкретним лікувальним закладом.

Виявлення бактерій *Pantoea agglomerans* (3 ізоляти; сукупно 40,8 % резистентності), які є ентеробактеріями, що колонізують рослини та ґрунт, і які рідко зустрічаються в клінічній медицині, відповідає особливостям ранового середовища, забрудненого ґрунтом та рослинністю, що є характерним для травм, спричинених вибуховим компонентом [19]. Аналогічно, види *Achromobacter* та *Providencia* spp. (разом 4 ізоляти) є організмами, що надходять із навколишнього середовища, з комплексними профілями внутрішньої резистентності. Їхня спільна наявність із резистентністю до карбапенемаз (CRKP та CRAB) в окремих поранених підкреслює різноманітність мікробіому бойових ран та обмеження підходу, що базується на стандартній процедурі бактеріологічного дослідження, яке ідентифікує організми послідовно, а не одночасно.

Таблиця 4. Тривалість мікробіологічного спостереження та кількість мікроорганізмів у культурах на одного пораненого, що є проксі-показниками тривалості лікування (поранені з ≥ 1 датованим посівом)

Пацієнт №	Усього	Датов.	Перший посів	Останній посів	Інтервал, днів	Мікробіологічна знахідка
5	3	3	28.05.2025	02.12.2025	**188**	*K. pneumoniae* (CRKP) у всіх 3 посівах
8	3	4	15.07.2025	22.08.2025	38	Полімікробний фенотип (*E. coli* + *Proteus*)
10	3	4	19.06.2025	21.07.2025	32	*K. pneumoniae* (CRKP)
11	7	10	04.09.2025	06.02.2026	**154**	Полімікробний фенотип: CRKP + CR-*Providencia* + CR-*E. coli*
12	4	5	06.09.2025	20.09.2025	14	CRAB + полімікробна
14	4	4	03.09.2024	05.05.2026	**608**	MRSA; найдовший моніторинг когорти
15	3	3	27.11.2024	23.12.2024	26	CRAB + CR-*E. coli*
16	3	4	30.05.2025	25.06.2025	26	CRKP + *E. faecalis*
20	6	6	08.10.2025	09.12.2025	61	CR-*Achromobacter* spp.
22	9	11	01.10.2025	17.12.2025	76	CRAB + MRSA; max бактеріологічний тягар
29	11	11	05.04.2024	11.10.2024	**188**	CRKP; max кількість посівів
31	6	6	25.05.2024	25.07.2024	61	Багатократний моніторинг
33	3	2	09.05.2024	19.07.2024	70	CRKP
34	5	7	19.12.2024	18.01.2025	30	CRAB; множинні посіви
35	2	3	28.12.2024	08.01.2025	11	CRKP + CR-*P. aeruginosa*

Примітки: рядки з інтервалом ≥ 150 днів виділено масивом. Інтервал обрахований між першим та останнім датованим бактеріологічним посівом. Позначення мультирезистентності: CR — карбапенем-резистентний ізолят; CRAB — карбапенем-резистентна A. baumannii; CRKP — карбапенем-резистентна K. pneumoniae; MRSA — метицилін-резистентна S. aureus.

Полімікробна інфекція: клінічне значення і неповна ідентифікація

Показник полімікробних культур у 13,1 % вогнепальних ран гомілки, зафіксований у цьому дослідженні, слід розглядати як консервативну нижню межу. Традиційні методи культивування систематично занижують частоту полімікробних інфекцій, оскільки не враховують мікроорганізми, що не піддаються культивуванню, облігатні анаероби в стандартних аеробних умовах інкубації, а також супутні збудники, що становлять меншу частину популяції та мають низьку кількість колоній.

Виявлення грампозитивних спороутворюючих бацил (віднесених до ґрунтової мікробіоти) у 6 посівах, отриманих від 5 поранених у цьому дослідженні, є особливо актуальним: вибухові травматичні рани, забруднені ґрунтом, несуть доведений ризик наявності спор *Clostridium* та *Bacillus* spp. [19] — це мікроорганізми, які є життєздатними, але практично не ростуть на стандартних середовищах протягом стандартних термінів інкубації. Отже, реальне полімікробне навантаження в цій когорті спостережень, ймовірно, є значно вищим, ніж задокументовані нами 13,1 %.

Клінічні наслідки невиявленої полімікробної інфекції є серйозними: супутня інфекція синергетичними видами прискорює руйнування тканин, утворення біоплівки та розвиток резистентності до антибіотиків більшою мірою, ніж це може зробити кожен з мікроорганізмів окремо. Повторні випадки коінфекцій CRAB + *S. aureus* та CRKP + *Enterococcus* у нашому дослідженні, навіть виявлення мікроорганізмів із профілями чутливості до антибіотиків, що повністю не перетинаються, очевидно, ілюструють терапевтичну дилему, яку це створює для клініцистів, що покладаються на послідовне ефективне коригування терапії та сподіваються на швидке видужання поранених.

Тягар моніторингу як доказ недоліків діагностики

Одним із важливих висновків цього дослідження (про який зазвичай не повідомляють у бактеріологічних моніторингових дослідженнях з визначенням точкової поширеності) є надзвичайно тривалий термін бактеріологічного спостереження, необхідний у найскладніших клінічних випадках.

Медіана тривалості спостереження, що становить 31 день, вже свідчить про те, що лікування в гострій фазі не дозволяло подолати ці інфекції в межах стандартних термінів терапії; максимальний задокументований термін у 608 днів (поранений № 14, MRSA) свідчить про триваючий активний мікробіологічний моніторинг протягом майже 20 місяців — це яскравий приклад того, як розвивається клінічна картина, коли мікроорганізми з множинною резистентністю не виявляються швидко та всебічно не охарактеризовуються, а отже, не піддаються цілеспрямованому лікуванню.

Важливо, що збереження однакових штамів з множинною резистентністю (MDR) у послідовних бактеріологічних посівах в окремих поранених — найяскравішим прикладом є CRKP у всіх трьох посівах пораненого № 5 протягом 188 днів, а також полімікробна інфекція CRAB + *S. aureus* у послідовних посівах № 8 і 9 пораненого № 22 — не є просто відображенням біологічної хронічності. Це частково є відображенням **часової затримки** між встановленням інфекції, діагностичним підтвердженням та коригуванням терапії, що є невід'ємною частиною циклу посіву з антибіотикограмою (48–72 години). Кожна ітерація цього циклу, тобто відправлення нового посіву, очікування результату, зміна призначення ліків, додає дні, протягом яких бактерійна біоплівка з множинною резистентністю до ліків продовжує розширюватися та проникати в навколишні тканини. На противагу стандартній методології бактеріологічних досліджень, результат молекулярних методів діагностики, а саме метагеномного аналізу, може бути отриманий за 6–8 годин, доступний ще під час тієї ж хірургічної зміни і кардинально змінив би цю динаміку. Аналізуючи терміни перебування поранених у відділенні ортопедії та травматології КНП «КМКЛ № 8», опрацьовані бактеріологічні спостереження та беручи до уваги наявність у деяких поранених довгого евакуаційного ланцюга до моменту госпіталізації в КНП «КМКЛ № 8», слід зазначити, що характерні тенденції до колонізації ран внутрішньолікарняними інфекціями мали місце і, найімовірніше, сформувались на попередніх етапах евакуаційного ланцюга.

У нещодавніх дослідженнях L. Kasatkina та співавт. (2026), а також I. Lurin та співавт. (2024) відмічали зв'язок приросту ізоляції збудників інфекції з часом, що минув після поранення, та тривалістю госпіталізації [2, 7]. У поранених, госпіталізованих більше ніж через 48 годин та з травмами, отриманими більше ніж 72 години тому, переважали *Acinetobacter* spp., *P. aeruginosa, K. pneumoniae* та *S. aureus*, що свідчить про приблизно 3–6-кратне зростання порівняно зі свіжими ранами, а це говорить про значну передачу інфекції в умовах лікарні.

Таким чином, ми припускаємо, що деякі поранені вже госпіталізувались в КНП «КМКЛ № 8» зі сформованими карбапенем-резистентними штамами *K. pneumoniae* чи *A. baumannii*, оскільки антибіотики карбапенемного ряду є препаратами резерву (або «важкої артилерії») і не належать до стартових антибіотиків першої лінії. Наявність у ранах вже резистентних штамів мікроорганізмів на момент першого бактеріологічного посіву свідчить про застосування таких препаратів певним пораненим на попередніх етапах лікування. А це, у свою чергу, значно ускладнює лікування в подальшому.

На це також вказують результати дослідження, проведеного в Кореї, в якому проаналізовано 133 випадки бактеріємії, спричиненої *E. coli* та *K. pneumoniae* (тобто carbapenem-resistant *Enterobacterales* (CRE)). Підкреслюється, що наявність неліквідованого вогнища резистентних штамів мікроорганізмів дуже тісно пов'язана з вищими показниками смертності [20].

Стосовно лабораторних знахідок у бойових ранах гомілки резистентних MRSA (метицилін-резистент-

ний золотистий стафілокок *S. aureus*) та MRSE (метицилін-резистентний епідермальний стафілокок *S. epidermidis*) — це типова комбінація резистентних бактерій для бойових ран, оскільки найчастіше призначалися такі препарати: метронідазол (засіб першої лінії для лікування змішаних анаеробних інфекцій), цефазолін, кліндаміцин, амоксицилін та амоксицилін-клавуланат. Зростання кількості призначень цефазоліну в 2–3 рази відображає активне впровадження двох національних клінічних настанов: однієї щодо профілактики інфекцій, пов'язаних із бойовими пораненнями (догоспітальний етап), а іншої — щодо періопераційної антимікробної профілактики. Цефазолін рекомендується як препарат першої лінії для більшості профілактичних показань в обох настановах.

Отже, частка таких резистентних мікроорганізмів в Україні в умовах бойових дій, які є постійним джерелом бойової травми військових, буде лише зростати.

Механізми резистентності до карбапенемів: що не може розкрити фенотипування (класичний бактеріологічний посів)

Загальний масив резистентності до карбапенемаз ідентифікованих бактерій у нашому дослідженні охарактеризований виключно фенотипово. Резистентність до антибіотиків, зокрема і до препаратів 2-ї лінії, якими є цефалоспорини, макроліди та фторхінолони, має клінічне значення, оскільки механізм їх резистентності визначений як потенційний епідеміологічний ризик (наприклад, плазміди NDM-1 здатні до горизонтального передавання та мають пандемічний характер). NDM-1 плазміди переносять ген bla_{NDM-1}. Цей ген кодує фермент метало-бета-лактамазу, який робить бактерії стійкими до більшості антибіотиків, зокрема до карбапенемів (препаратів «останньої надії»). Карбапенем-резистентні *A. baumannii* (CRAB), ген OXA-23/OXA-72, можуть реагувати на препарати сульбактам/дурлобактам, тоді як штами, що продукують MBL (фермент метало-β-лактамазу), руйнують більшість β-лактамних антибіотиків (пеніциліни, цефалоспорини, карбапенеми), але вони не активні проти азтреонаму (монобактаму).

Інші дослідження вказують на те, що мультирезистентний *A. baumannii* став однією з провідних причин внутрішньолікарняних інфекцій у всьому світі [21]. Особливе занепокоєння викликає високий рівень резистентності до карбапенемових антибіотиків (> 50 % у 21 європейській країні у 2020–2022 роках [22]), що ускладнює лікування [23]. Резистентність до карбапенемів у *A. baumannii* зазвичай пояснюється або мутацією та надмірною експресією власної карбапенемази, подібної до OXA-51, або надбанням більш потужних карбапенемаз (найчастіше ферментів, подібних до OXA-23 та OXA-24/40) шляхом горизонтального переносу генів [24].

Визначення генів резистентності методом молекулярної діагностики дозволяє оперативно виявляти механізми стійкості до антибактеріальних препаратів та обґрунтовувати застосування антибіотиків резерву, зокрема карбапенемів і поліміксинів. Особливе значення має детекція генів карбапенемаз (*blaKPC, blaNDM, blaVIM, blaIMP, blaOXA-48*) та плазмід-опосередкованої колістинової резистентності (*mcr*), що дозволяє оптимізувати антибактеріальну терапію та запобігати неефективному використанню резервних препаратів [25, 26].

Таким чином, відсутність даних про гени *blaOXA-23, blaNDM* або *blaKPC* у даному дослідженні означає, що оптимальний вибір антибіотиків для найбільш резистентних ізолятів, включаючи три полімікробні інфекції, пов'язані з CRAB, не міг бути ефективно скерованим, оскільки не мав характеристики генів резистентності ідентифікованих бактерій. Кондратюк та ін. (2025) продемонстрували, що *blaOXA-23* (ST2/ST19) домінує серед штамів *A. baumannii*, виділених у зоні конфлікту в Україні [9]; якщо це стосується ізолятів CRAB у нашому дослідженні, сульбактам/дурлобактам став би раціональним доповненням до алгоритму лікування — але це неможливо встановити і рекомендувати клініцистам лише на основі класичного бактеріологічного дослідження за фенотипуванням.

Результати наших досліджень виявили недосконалість сучасного алгоритму бактеріологічного обстеження, заснованого на фенотиповому виявленні мікроорганізмів, та формують чіткі вимоги до удосконалення такого алгоритму. А саме:

— **комплексне виявлення видів:** охоплення всього спектра (включно з *P. agglomerans, Achromobacter, Providencia*, ґрунтовими анаеробами). Бажано охопити якомога більшу когорту мікроорганізмів, які колонізують бойові рани (понад 32 види);

— **характеристика генів резистентності:** пряме виявлення *mecA, blaOXA-23/48/72, blaNDM, mcr* для генотипово обґрунтованого підбору препаратів антимікробної дії в межах хірургічної зміни, тобто за 6–8 годин;

— **виявлення полімікробних інфекцій:** одночасна ідентифікація всіх видів, зокрема некультивованих, за допомогою молекулярних методів — панельної ПЛР та нетаргетованого секвенування;

— **профілювання генів біоплівки:** кількісне виявлення генів бактерій, що утворюють біоплівку: *icaA, pelB, pslA* — для прогнозування хронізації інфекційного процесу рани;

— **час виконання 6–8 год:** досягти скорочення часу повної розширеної ідентифікації до 6–8 годин.

Висновки

Проаналізовано бактеріальні патогени, ізольовані з вогнепальних та вибухових ран гомілки українських військовослужбовців (з вересня 2024 по травень 2026 р.). Встановлено домінування мультирезистентних (MDR) та екстремально резистентних (XDR) мікроорганізмів, переважали *S. aureus, A. baumannii, K. pneumoniae*. Дані документують значний тягар CRAB, CRKP та MRSA при бойових пошкодженнях гомілки, що узгоджується з дослідженнями інших українських авторів, які зазначають, що в Україні антимікробна ре-

зистентність є однією з найсерйозніших загроз національній безпеці в секторі охорони здоров'я.

Дослідження висвітлює, що однією з причин тривалого перебування військовослужбовців з вогнепальними та вибуховими поліструктурними травмами на лікуванні є поява ускладнень після оперативних втручань бойової травми гомілки та прогресування інфекційних процесів ран. Всі опрацьовані в даному дослідженні проліковані випадки з ускладненнями мали максимальну тривалість мікробіологічного спостереження 608 днів, що напряму залежала від неповноти стандартного алгоритму бактеріологічної діагностики в Україні в умовах воєнних дій. Неможливість клініцистів отримувати більш розширений спектр виявлених патогенів в бойових ранах в перші дні госпіталізації з характеристикою геномних факторів вірулентності збудників унеможливлює ефективне лікування та швидке одужання поранених військовослужбовців.

Таким чином, постає питання про розробку сучасних досконалих алгоритмів діагностики патогенів ранової поверхні вогнепальних та вибухових травм гомілки, впровадження молекулярних методів діагностики широкого спектра патогенів ран разом з ідентифікацію факторів вірулентності/генів резистентності цих мікроорганізмів. Крім того, важливо досягти імплементації метагеномної ПЛР/NGS-діагностики, здатної охарактеризувати ландшафт патобіому бойової рани та післяопераційних інфекційних процесів і, що важливо, скоротити лабораторний процес ідентифікації (експрес) до 6–8 годин проти тижнів — місяців (стандартний алгоритм бактеріологічного дослідження). Отже, відповідно, впровадження представлених методик діагностики має зберегти здоров'я військовослужбовця, зменшити час перебування пораненого в умовах лікарні, надати можливість застосовувати етіопатогенетичну коректну антибіотикотерапію.

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

Інформація про фінансування. Самофінансування.

Подяки. Автори висловлюють подяку персоналу бактеріологічної лабораторії та лікарям ортопедо-травматологічного відділення КНП «КМКЛ № 8».

Доступність даних. Вихідний датасет зберігається у КНП «КМКЛ № 8», доступний за обгрунтованим запитом з дотриманням вимог конфіденційності.

Схвалення до публікації. Усі автори брали участь в обговоренні результатів дослідження, ознайомилися з остаточною версією рукопису та схвалили її до публікації.

Внесок авторів. Анкін М.Л., Ладика В.О. — концепція та дизайн дослідження, формування наукової ідеї, загальне керівництво дослідженням; Завертиленко Я.С., Кравець Д.Т. — набір пацієнтів, збір клінічного матеріалу та формування первинної бази даних; Степанюк С.В. — статистична обробка та аналіз отриманих даних, підготовка першої редакції рукопису; Прилипко В.О., Тертишний С.В. — аналіз результатів дослідження, критичне редагування рукопису та підготовка остаточної версії до друку; Обертинська О.В. — координація взаємодії між учасниками мультидисциплінарної команди, організація збору та верифікації даних.

Список літератури

1. Murray CK, Hinkle MK, Yun HC. History of infections associated with combat-related injuries. J Trauma. 2008;64(3 Suppl):S221-231. doi: 10.1097/TA.0b013e318163c40b.

2. Lurin IA, Khomenko IP, Kashtalyan MA, Nehoduiko VV, Vastyanov RS, Tertyshnyi SV, Stepanov GF, Solodyanikova OI, Tanasichuk-Gazhieva NV. Objectivization of surgical tactics in case of covering tissue gunshot defects restoration. ATJ. 2024;3:65-70. https://www.azmedjournal.com/index.php/amz/article/view/507. doi: https//doi.org/10.34921/amj.2024.3.011.

3. Theodorakopoulou E, Mason KA, Pafitanis G, Ghanem AM, Myers S, Iwuagwu FC. Free-Tissue Transfer for the Reconstruction of War-Related Extremity Injuries: A Systematic Review of Current Practice. Mil Med. 2016 Jan;181(1):27-34. doi: 10.7205/MILMED-D-15-00059.

4. Orthopaedic trauma: extremity fractures: clinical practice guideline (CPG ID: 56) [Ортопедична травма: переломи кінцівок: настанови з клінічної практики]. Joint Trauma System; пер. gmka.org. Дата останнього перегляду: 26.02.2020. URL: https://tccc.org.ua/files/downloads/orthopaedic-trauma-extremity-fractures-cpg-ua.pdf (дата звернення: 02.07.2026).

5. Ljungquist O, Nazarchuk O, Kahlmeter G, Andrews V, Koithan T, Wasserstrom L, et al. Highly multidrug-resistant Gram-negative bacterial infections in war victims in Ukraine, 2022. Lancet Infect Dis. 2023 Jul;23(7):784-786. doi: 10.1016/S1473-3099(23)00291-8. Epub 2023 May 23.

6. World Health Organization. WHO bacterial priority pathogens list, 2024: bacterial pathogens of public health importance to guide research, development and strategies to prevent and control antimicrobial resistance. Geneva: World Health Organization; 2024 May 17 [cited 2026 Jul 2]. 72 p. Available from: https://www.who.int/publications/i/item/9789240093461.

7. Kasatkina L, Havrylov I, Sboieva A, et al. Antimicrobial resistance among clinical isolates associated with combat-related infections in Ukraine: first nationwide surveillance, 2023-2024. npj Antimicrob Resist. 2026. https://doi.org/10.1038/s44259-026-00230-7.

8. Sandfort M, Hans JB, Fischer MA, Reichert F, Cremanns M, Eisfeld J, et al. Increase in NDM-1 and NDM-1/OXA-48-producing Klebsiella pneumoniae in Germany associated with the war in Ukraine, 2022. Euro Surveill. 2022 Dec;27(50):2200926. doi: 10.2807/1560-7917.ES.2022.27.50.2200926.

9. Kondratiuk VM, Jones BT, Luo TL, Fomina NS, Lebreton F, Bennett JW, et al. Phenotypic and genotypic analysis of Acinetobacter baumannii isolated from combat wounds in Ukraine during 2022 and 2023. JAC Antimicrob Resist. 2025 Aug 7;7(4):dlaf140. doi: 10.1093/jacamr/dlaf140.

10. Holubnycha VM, Kholodylo OV. War impact on antimicrobial resistance and bacteriological profile of wound in-

fections in Ukraine. Commun Med. 2025;5:394. https://doi.org/10.1038/s43856-025-01056-6.

11. Li HH, Zhou XM, Liu T, Wu R, Huang ZF, Sun CW, et al. The clinical value of metagenomic next-generation sequencing for rapid microbial identification of chronic granulation wound infections. Arch Med Sci. 2023 Jul 13;19(4):1162-1167. doi: 10.5114/aoms/166255.

12. Su S, Wang R, Zhou R, Bai J, Chen Z, Zhou F. Higher diagnostic value of next-generation sequencing versus culture in periprosthetic joint infection: A systematic review and meta-analysis. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2024;32(9):2277-2289. doi: 10.1002/ksa.12227.

13. Анкін М.Л., Тертишний С.В., Зазірний І.М. та ін. Вогнепальні та вибухові пошкодження дистального відділу великогомілкової кістки. КМКЛ № 8.

14. European Committee on Antimicrobial Susceptibility Testing (EUCAST). EUCAST guidelines for detection of resistance mechanisms and specific resistances of clinical and/or epidemiological importance. Version 2.0. Växjö, Sweden: EUCAST, 2017. 43 p.

15. Magiorakos AP, Srinivasan A, Carey RB, et al. Multidrug-resistant, extensively drug-resistant and pandrug-resistant bacteria: an international expert proposal for interim standard definitions for acquired resistance. Clin Microbiol Infect. 2012;18(3):268-281. doi: 10.1111/j.1469-0691.2011.03570.x.

16. Kovalchuk VP, Mc Gann P, Bohush HL, Fomina NS, Fomin OO, Kondratiuk VM. 2025. Antimicrobial resistance and genomic epidemiology of bacterial war-wound infections: Ukraine, 2014–2023. Zaporozhye Medical Journal. 2025 Nov;27(5):355-360. doi: https://doi.org/10.14739/2310-1210.2025.5.338948.

17. Scavone P, Iribarnegaray V, González MJ, Navarro N, Caneles-Huerta N, Jara-Wilde J, et al. Role of Proteus mirabilis flagella in biofilm formation. Role of Rev Argent Microbiol. 2023;55(3):226-34. doi: 10.1016/j.ram.2023.01.005.

18. Mallick A, Sarkar S, Lopes BS, Das S. Drug-resistant Pantoea agglomerans Causing Bacteremia at a Tertiary Care Hospital in Kolkata, India: First Report of Carbapenem Resistance Mediated by OXA-181. Curr Microbiol. 2024;81(11):389. Published 2024 Oct 5. doi: 10.1007/s00284-024-03888-2.

19. Laporte C, Demachy MC, Thevenin-Lemoine C. Ostéite tibiale à Pantoea agglomerans au décours d'une fracture ouverte stade IIIB de jambe [Tibial osteitis caused by Pantoea agglomerans after open grade IIIB tibial shaft fracture]. Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot. 2002;88(6):625-627.

20. Park JW, Lee H, Park SY, Kim TH. Epidemiological, clinical, and microbiological characteristics of carbapenemase-producing Enterobacteriaceae bloodstream infection in the Republic of Korea. Antimicrob Resist Infect Control. 2019;8:48. Published 2019 Mar 5. doi: 10.1186/s13756-019-0497-3.

21. Hamidian M, Nigro SJ. Emergence, molecular mechanisms and global spread of carbapenem-resistant Acinetobacter baumannii. Microb Genom. 2019;5(10):e000306. 10.1099/mgen.0.000306.

22. European Centre for Disease Prevention and Control (ECDC). Antimicrobial resistance surveillance in Europe 2022-2020 data. Stockholm: ECDC; 2022. Available from: https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/antimicrobial-resistance-surveillance-europe-2022-2020-data.

23. Tamma PD, Aitken SL, Bonomo RA, Mathers AJ, van Duin D, Clancy CJ. Infectious Diseases Society of America 2023 guidance on the treatment of antimicrobial resistant gram-negative infections. Clin Infect Dis. 2023;ciad428. Epub ahead of print. 10.1093/cid/ciad428.

24. Poirel L, Nordmann P. Carbapenem resistance in Acinetobacter baumannii: mechanisms and epidemiology. Clin Microbiol Infect. 2006;12(9):826-36. 10.1111/j.1469-0691.2006.01456.x.

25. Banerjee R, Patel R. Molecular diagnostics for genotypic detection of antibiotic resistance: current landscape and future directions. JAC-Antimicrobial Resistance. 2022;4(1):dlad018. doi: 10.1093/jacamr/dlad018.

26. Endimiani A, Ramette A, Rhoads DD, Jacobs MR. The evolving role of the clinical microbiology laboratory in identifying resistance in Gram-negative bacteria: an update. Infect Dis Clin North Am. 2020;34(4):659-676. doi: 10.1016/j.idc.2020.08.001.

Отримано/Received 23.07.2026
Рецензовано/Revised 06.09.2026
Прийнято до друку/Accepted 15.09.2026

Information about authors

Svitlana V. Stepaniuk, Associate Professor, Department of Microbiology, Virology, and Immunology, Shupyk National Healthcare University of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: stepaniuk2008@gmail.com; https://orcid.org/0009-0006-0792-7249

Valentyn O. Prylypko, Assistant, Department of Microbiology, Virology, and Immunology, Shupyk National Healthcare University of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: valikpr@gmail.com; https://orcid.org/0009-0007-6409-2361

Oksana V. Obertynska, PhD in Medicine, Associate Professor, Department of Microbiology, Virology, and Immunology, Shupyk National Healthcare University of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: oksana.obertynska@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-6018-3855

Mykola L. Ankin, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Orthopedics, Orthoplastic Surgery and Prosthetics, Shupyk National Healthcare University of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: m.ankin@ukr.net; https://orcid.org/0000-0001-9795-0931

Viktoriia O. Ladyka, PhD in Medicine, Associate Professor, Department of Orthopedics, Orthoplastic Surgery and Prosthetics, Shupyk National Healthcare University of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: ladika084@gmail.com, ladika62@ukr.net; https://orcid.org/0000-0002-3796-428X

Serhii V. Tertyshnyi, MD, DSc, PhD, Associate Professor, Department of Orthopedics, Orthoplastic Surgery and Prosthetics, Shupyk National Healthcare University of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: tertyshnyi.sergey@gmail.com; phone: +380 (67) 752-25-59; Head of the Department of Plastic and Reconstructive Surgery, Military Medical Clinical Center of the Southern Region, Odesa, Ukraine; https://orcid.org/0000-0002-4949-5409

Yakiv S. Zavertylenko, PhD-student, Department of Orthopedics, Orthoplastic Surgery and Prosthetics, Shupyk National Healthcare University of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: zyakiv@gmail.com; https://orcid.org/0009-0008-7672-225X

Dmytro T. Kravets, Postgraduate Student, Department of Orthopedics, Orthoplastic Surgery and Prosthetics, Shupyk National Healthcare University of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: d.kraveeets@gmail.com; https://orcid.org/0009-0009-8102-7603

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.
Acknowledgments. The authors express their gratitude to the staff of the bacteriological laboratory and the doctors of the orthopedic and traumatology department of the KNP KMKL No. 8.

Data availability. The original dataset is stored in the KNP KMKL No. 8, available upon reasonable request, subject to confidentiality requirements.

Approval for publication. All authors participated in the discussion of the study results, reviewed the final version of the manuscript, and approved it for publication.

Authors' contribution. M.L. Ankin, V.O. Ladyka — research concept and design, scientific idea formation, general research management; Ya.S. Zavertylenko, D.T. Kravets — patient recruitment, collection of clinical material and formation of the primary database; S.V. Stepaniuk — statistical processing and analysis of the obtained data, preparation of the first draft of the manuscript; V.O. Prylypko, S.V. Tertyshnyi — analysis of research results, critical editing of the manuscript and preparation of the final version for publication; O.V. Obertynska — coordination of interaction between members of the multidisciplinary team, organization of data collection and verification.

S.V. Stepaniuk[1], V.O. Prylypko[1], O.V. Obertynska[1], M.L. Ankin[1], V.O. Ladyka[1], S.V. Tertyshnyi[1, 2], Ya.S. Zavertylenko[1], D.T. Kravets[1]

[1]Shupyk National Healthcare University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

[2]Military Medical Clinical Center of the Southern Region, Odesa, Ukraine

Bacteriological landscape and antimicrobial resistance profiles of combat-related firearm and blast injuries to the distal tibia: a retrospective cohort analysis

Abstract. ***Background.*** Combat injuries of the lower extremities are associated with a high incidence of polymicrobial wound infections caused by multidrug-resistant pathogens. Timely and objectively substantiated identification of wound bacteria remains a critically unresolved issue and an extremely important and in-demand diagnostic tool for military traumatology under the conditions of Russian aggression against Ukraine from 2022 to the present. ***Materials and methods.*** A retrospective analysis was conducted of bacteriological studies of 35 wounded military patients (100 % male) with gunshot and blast injuries to the distal tibia who were treated in the Department of Traumatology and Orthopedics of the Municipal Non-Profit Enterprise "Kyiv City Clinical Hospital 8". A total of 84 bacteriological studies and 1,188 antibiogram data points were analyzed. Susceptibility categories were determined according to EUCAST criteria. A bacteriological culture containing ≥ 2 pathogens was considered polymicrobial. Duration of observation was the interval between the first and last dated bacteriological study. Clinical observation included wounded service members who were admitted to the department between days 2 and 21 after wounding and who passed through 2–3 evacuation hospitals corresponding to NATO Role II-Role III level, before arriving at the final facility, where the first bacteriological analysis of contamination of the lower-leg wound defect was performed. ***Results.*** Bacterial contamination was identified in 21/35 patients (60.0 %). Overall resistance was 41.9 % (498/1,188). Dominant pathogens: *Staphylococcus aureus* (19 isolates; 25.7 %), *Klebsiella pneumoniae* (13 isolates; 67.4 %), *Acinetobacter baumannii* (11 isolates; 75.2 %). Methicillin-resistant *S. aureus* (MRSA) was confirmed in 2 wounded patients. Carbapenem-resistant *K. pneumoniae* (CRKP) was found in 5 patients, and carbapenem-resistant *A. baumannii* (CRAB) in 6. Polymicrobial bacteriological cultures were found in 11/35 (13.1 %) wounded people. Median duration of microbiological observation was 31 days (range 2–608); in three patients, it exceeded 150 days, with the number of serial cultures reaching 7 to 11 studies. ***Conclusions.*** Bacterial pathogens obtained from the wound surface of gunshot and blast lower-leg wounds of Ukrainian service members (June 2023 — May 2026) were analyzed. Dominance of multidrug-resistant and extensively drug-resistant microorganisms was established, with *S. aureus, A. baumannii*, and *K. pneumoniae* predominating. The data document a significant burden of CRAB, CRKP, and MRSA in combat lower-leg injuries, consistent with studies by other Ukrainian authors, who note that in Ukraine, antimicrobial resistance is one of the most pressing threats to national security in the healthcare sector. Weaknesses of standard bacteriological diagnosis based on the phenotypic method were also identified, which make it impossible to prescribe reserve antibiotics — agents that should be administered based on the results of genetic analysis of bacterial resistance in the infected wound and assessment of virulence/biofilm-formation genes at the site of the lower-leg wound defect. Thus, the question arises of developing advanced diagnostic algorithms for combat trauma pathogens and implementing molecular diagnostic methods for a broad spectrum of pathogens of lower-leg wound defects, together with identification of virulence factors/resistance genes of the identified microorganisms. This will preserve the health of wounded service members, reduce the length of hospital stay, enable the application of appropriate etiopathogenetic antibiotic therapy and control the spread of resistant strains in Ukraine.

Keywords: combat wounds; antimicrobial resistance; gunshot lower-leg defects; carbapenem resistance; multidrug resistance; CRAB; CRKP; MRSA; polymicrobial infection; metagenomics; Ukraine; lower extremity; prolonged hospitalization

УДК 616.711-002.7-07:616-008.9 *DOI: https://doi.org/10.22141/1608-1706.5.27.2026.1111*

Гринь В.К., Проценко Г.О., Пастернак М.Л.
ДУ «Національний науковий центр «Інститут кардіології, клінічної та регенеративної медицини імені академіка М.Д. Стражеска НАМН України», м. Київ, Україна

Кореляційний аналіз клінічних індексів активності та інтегральних гематологічних біомаркерів у пацієнтів з аксіальним спондилоартритом

Резюме. ***Актуальність.*** *Об'єктивна оцінка ступеня активності аксіального спондилоартриту (АксСпА) залишається складним завданням через суб'єктивність традиційних опитувальників (Bath Ankylosing Spondylitis Disease Activity Index, BASDAI) або часткову їх суб'єктивність (Ankylosing Spondylitis Disease Activity Score, ASDAS). ASDAS розраховують з використанням С-реактивного білка (C-reactive protein, CRP; ASDAS-CRP) та швидкості осідання еритроцитів (erythrocyte sedimentation rate, ESR; ASDAS-ESR). Однак, за даними досліджень, рівні цих гострофазових показників можуть бути в межах норми приблизно у третини пацієнтів з АксСпА, навіть якщо захворювання активне. Отже, є потреба у верифікації надійних, економічно доступних додаткових лабораторних маркерів запалення, що слугуватимуть для комплексної оцінки активності АксСпА.* ***Мета:*** *дослідити характер і силу кореляцій між індексами активності (BASDAI, ASDAS-CRP, ASDAS-ESR) та лабораторними біомаркерами запалення (CRP, ESR та співвідношеннями CRP і альбуміну (CRP to albumin ratio, CAR); нейтрофілів і лімфоцитів (neutrophil to lymphocyte ratio, NLR); тромбоцитів і лімфоцитів (platelet to lymphocyte ratio, PLR)) у пацієнтів з АксСпА та оцінити їх діагностичну значущість для комплексної оцінки активності захворювання.* ***Матеріали та методи.*** *Було обстежено 118 учасників дослідження, з яких 96 пацієнтів зі встановленим діагнозом АксСпА та 22 здорові особи контрольної групи. Дані з медичної документації опрацьовано за допомогою статистичної програми SPSS версії 26.0, досліджено кореляції та проведено ROC-аналіз.* ***Результати.*** *У дослідній групі встановлено статистично значущу позитивну кореляцію помірної сили між індексом BASDAI та CRP, ESR, CAR, NLR ($\rho = +0{,}329$, $p < 0{,}002$; $\rho = +0{,}323$, $p < 0{,}008$; $\rho = +0{,}355$, $p < 0{,}015$; $\rho = +0{,}379$, $p < 0{,}001$, відповідно). Водночас кореляцію між BASDAI та показником PLR оцінено як слабку ($\rho = +0{,}299$, $p = 0{,}013$). Комбінований індекс ASDAS-ESR продемонстрував статистично значущий сильний зв'язок із CRP ($\rho = +0{,}750$, $p = 0{,}033$). Крім того, виявлено статистично значущий позитивний зв'язок помірної сили між лабораторними показниками: ESR, CAR, NLR та комбінованим індексом ASDAS-CRP ($\rho = +0{,}528$, $p < 0{,}001$; $\rho = +0{,}588$, $p < 0{,}01$; $\rho = +0{,}569$, $p < 0{,}001$, відповідно), а також між CAR, NLR та ASDAS-ESR ($\rho = +0{,}545$, $p < 0{,}001$; $\rho = +0{,}489$, $p = 0{,}004$, відповідно). Натомість між співвідношенням PLR та індексом ASDAS-CRP виявлено статистично значущий слабкий зв'язок ($\rho = +0{,}244$ $p < 0{,}034$), тоді як із ASDAS-ESR встановлено зв'язок помірної сили ($\rho = +0{,}423$, $p = 0{,}033$). За результатами ROC-аналізу визначено порогове значення для співвідношень CAR (0,214), NLR (2,343) за індексом активності ASDAS-CRP (чутливість 78,6 %, специфічність 69,4 %; чутливість 85,7 %, специфічність 71,5 % відповідно).* ***Висновки.*** *Серед рутинних лабораторних тестів потенційними біомаркерами високої активності АксСпА (за ASDAS-CRP та ASDAS-ESR) можна вважати співвідношення CAR та NLR. Вони показали задовільну діагностичну здатність до розрізнення груп пацієнтів з низькою/помірною (ASDAS ≤ 2,1) або високою/дуже високою (ASDAS > 2,1) активністю захворювання за ASDAS-CRP та ASDAS-ESR. Отже, визначення цих співвідношень може слугувати допоміжним інструментом для комплексної об'єктивної оцінки активності АксСпА.*

Ключові слова: *аксіальний спондилоартрит; структурні ураження хребта; ASDAS-CRP; ASDAS-ESR; співвідношення С-реактивного білка й альбуміну (CAR); співвідношення нейтрофілів і лімфоцитів (NLR)*

© «Травма» / «Trauma» («Travma»), 2026
© Видавець Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2026

Для кореспонденції: Пастернак Марта Любомирівна, аспірант, відділення некоронарних хвороб серця, ревматології та терапії, ДУ «Національний науковий центр «Інститут кардіології, клінічної та регенеративної медицини імені академіка М.Д. Стражеска НАМН України», вул. Святослава Хороброго, 5, м. Київ, 03151, Україна; e-mail: 1992mapalu@gmail.com; тел.: +380 (95) 797-27-51
For correspondence: Marta Pasternak, PhD-student, Department of Non-Coronary Heart Diseases, Rheumatology and Therapy, National Scientific Center "M.D. Strazhesko Institute of Cardiology, Clinical and Regenerative Medicine of NAMSU", Sviatoslava Khorobroho st., 5, Kyiv, 03151, Ukraine; e-mail: 1992mapalu@gmail.com; phone: +380 (95) 797-27-51
Full list of authors information is available at the end of the article.

Вступ

Аксіальний спондилоартрит (АксСпА) — це хронічне запальне захворювання, яке входить у групу спондилоартропатій. При АксСпА спостерігається переважне ураження опорно-рухового апарату, зокрема крижово-клубових зчленувань і хребта. Також виникають ураження периферичних суглобів (артрит, ентезит, дактиліт) та системні позасуглобові прояви (увеїт, запальні захворювання кишечника та псоріаз) [1, 2].

Оцінка активності АксСпА є ключовою для прогнозу перебігу, підбору лікування та контролю терапії. Для цього в рутинній практиці використовують лабораторні показники: С-реактивний білок (C-reactive protein, CRP), швидкість осідання еритроцитів (erythrocyte sedimentation rate, ESR); індекси на основі опитувальників BASDAI, а також комбіновані індекси з урахуванням лабораторних маркерів — ASDAS-CRP, ASDAS-ESR [3, 4]. Серед інструментальних методів найбільш інформативними є рентгенографія та магнітно-резонансна томографія (МРТ) [3, 5].

Об'єктивна оцінка ступеня активності АксСпА залишається складним завданням через суб'єктивність опитувальників (BASDAI) або часткову їх суб'єктивність — з розрахунком комбінованих індексів на основі CRP та ESR (ASDAS-CRP, ASDAS-ESR). Згідно з рекомендаціями ASAS, визначення CRP та ESR рекомендовано з метою оцінки активності АксСпА. Вони надійні та економічно доступні [6, 7]. Однак, за даними досліджень, рівні CRP та ESR можуть бути в межах норми приблизно у третини пацієнтів з АксСпА, навіть якщо захворювання активне [3].

Візуалізаційний метод, як-от МРТ крижово-клубових зчленувань та/або хребта, дозволяє оцінити наявність активного запалення. Проте результати багатьох досліджень показали, що кореляція між клінічними показниками активності захворювання та ознаками запалення на МРТ є лише помірною [6, 8]. Тому, згідно з оновленими рекомендаціями ASAS, МРТ не рекомендується для рутинного моніторингу, а його регулярне застосування вважається недоцільним через високу вартість [7].

Отже, пошук об'єктивних лабораторних маркерів, що корелюють з клінічними індексами, має високу клінічну значущість.

За даними огляду літератури, виділено індекси на основі рутинних лабораторних показників, зокрема співвідношення CRP і альбуміну (CAR), гранулоцитарно-лімфоцитарне або його аналог — нейтрофільно-лімфоцитарне (NLR) та тромбоцитарно-лімфоцитарне (PLR) співвідношення [5, 9, 10]. У низці публікацій вони виявились інформативними в оцінці активності автоімунних захворювань, зокрема АксСпА [5, 8], та розглядаються як потенційні біомаркери системного запалення, що корелюють з тяжкістю захворювання [11–13].

Як відомо, нейтрофіли є ключовими клітинами запальної відповіді та основним джерелом вивільнення багатьох прозапальних цитокінів. Цим клітинам належить провідна роль в ініціації та регуляції імунної відповіді. При системному запаленні спостерігається нейтрофільоз та лімфопенія [10]. Співвідношення NLR об'єднує ці два параметри та відображає баланс між кількістю нейтрофілів і лімфоцитів в організмі.

Співвідношення CAR є комплексним біомаркером, що інтегрує зміни двох протилежних за механізмом показників гострої фази (CRP та альбуміну). Синтез CRP індукується інтерлейкіном-6 (IL-6), а продукція альбуміну пригнічується фактором некрозу пухлини альфа та IL-6, які є прозапальними [10, 12]. Отже, при системному запальному процесі концентрація CRP зростає, а рівень альбуміну знижується [8, 12], що є поясненням зв'язку між підвищеним показником співвідношення CAR та запаленням і активністю захворювання при АксСпА.

Згідно з літературними оглядами, PLR розглядається як індикатор імунного дисбалансу при системних запальних процесах, що часто супроводжуються тромбоцитозом та лімфопенією [14, 15].

Аналіз наведених даних свідчить про доцільність переходу від використання ізольованих лабораторних маркерів до впровадження комплексних інтегральних індексів як більш перспективного підходу в оцінці активності АксСпА та верифікації стану ремісії. З огляду на це, метою цього дослідження стало вивчення характеру та сили кореляцій між клініко-лабораторними індексами (BASDAI, ASDAS-CRP, ASDAS-ESR) і лабораторними біомаркерами запалення (CRP, ESR та співвідношеннями CRP, NLR, PLR) у пацієнтів з АксСпА та визначення їх діагностичної значущості для комплексної оцінки активності захворювання.

Матеріали та методи

У дослідження включено 96 пацієнтів, які перебували на лікуванні в ДУ «ННЦ «Інститут кардіології, клінічної та регенеративної медицини імені академіка М.Д. Стражеска» Національної академії медичних наук України» в 2022–2024 рр. з діагнозом аксіального спондилоартриту та 22 здорові особи, порівнянних за віком і статтю, що становили контрольну групу. Усі учасники дослідження були чоловічої статі. Діагноз АксСпА було перевірено на відповідність критеріям Міжнародного товариства оцінки спондилоартриту (Assessment of SpondyloArthritis International Society criteria, ASAS, 2009) [16]. Дані щодо клінічних характеристик та рутинних лабораторних показників отримували з медичної документації пацієнтів. Критеріями виключення були: гострий інфекційний процес на момент обстеження, наявність супутньої патології, зокрема злоякісних новоутворень, активного гепатиту, хронічної органної недостатності та інших хронічних запальних захворювань. Кожен учасник дослідження підписав інформовану згоду на участь у цьому дослідженні. У всіх учасників здійснювався забір крові натще, після чого отриманий матеріал транспортувався в локальну лабораторію для визначення необхідних параметрів. Були використані дані таких лабораторних досліджень: CRP (норма: 0–5 мг/л), ESR (0–10 мм/год), альбумін (35–54 г/л), а також показники загального аналізу

крові: нейтрофіли (1,8–7,7 × 10^3/μl), лімфоцити (1,3–4,0 × 10^3/μl), тромбоцити (150–400 × 10^3/μl). Співвідношення CAR розраховувалось шляхом ділення рівня CRP на рівень альбуміну. За такою ж методикою було розраховано співвідношення NLR, PLR (ділення кількості нейтрофілів на кількість лімфоцитів та кількості тромбоцитів на кількість лімфоцитів відповідно).

У дослідній групі пацієнти заповнювали опитувальник BASDAI. Також вираховувався комбінований індекс з використанням CRP та ESR — ASDAS-CRP та ASDAS-ESR. Надалі дослідну групу було розділено відповідно до рівня активності захворювання на підгрупи з високою/дуже високою активністю та помірним/низьким ступенем активності. Використовувались такі шкали: BASDAI (індекс > 4 — висока/дуже висока активність; індекс ≤ 4 — помірна/низька активність), ASDAS-CRP та її альтернативний варіант ASDAS-ESR (індекс > 2,1 — висока/дуже висока активність; індекс ≤ 2,1 — помірна/низька активність). Порівнювали отримані індекси та лабораторні показники між підгрупами з урахуванням активності АксСпА. Характер розподілу отриманих значень оцінювали на нормальність за допомогою методу Шапіро — Уїлка. При нормальному розподілі для порівняння груп використовували Т-критерій Стьюдента, при ненормальному — U-критерій Манна — Уїтні. Різницю вважали вірогідною при $p < 0,05$. Досліджували кореляції між індексами активності АксСпА та рутинними лабораторними параметрами. Використовували коефіцієнт рангової кореляції Спірмена. Зв'язок вважали вірогідним при $p < 0,05$.

Для оцінки діагностичної цінності лабораторних показників та їх співвідношень як маркерів високої активності АксСпА проводили ROC-аналіз (Receiver Operator Characteristic, ROC). Будували ROC-криву (Receiver Operating Characteristic curve), визначали площу під кривою (Area Under Curve, AUC), оптимальні порогові значення (cut-off points), а також діагностичну чутливість та специфічність. Для аналізу статистичних даних використано програмне забезпечення Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) версії 26.0.

Результати

У дослідженні брали участь 118 осіб, з них 96 пацієнтів зі встановленим діагнозом АксСпА та 22 здорові особи, порівнянні за віком та статтю, що становили контрольну групу. При порівнянні обох груп такі показники, як CRP, ESR, CAR, PLR, були статистично значуще вищими у пацієнтів з АксСпА порівняно зі здоровими особами контрольної групи ($p < 0,001$). Дані наведено у табл. 1. Аналіз гематологічних співвідношень встановив, що показник NLR у дослідній групі (1,76 [1,42; 2,71]) мав тенденцію до підвищення порівняно з контрольною групою (1,61 [1,30; 1,81]), проте ця різниця не досягла рівня статистичної значущості ($p > 0,05$).

У дослідній групі було вивчено кореляції між традиційними лабораторними біомаркерами (CRP, ESR), співвідношеннями CAR, NLR, PLR та індексом BASDAI. У табл. 2 наведено результати, що демонструють статистично значущу позитивну кореляцію помірної сили між індексом BASDAI та CRP, ESR, CAR, NLR, а також статистично значущий зв'язок слабкої сили між індексом BASDAI та співвідношенням PLR. Крім того, виявлено статистично значущий прямий зв'язок між лабораторними показниками CAR та ESR ($\rho = +0,430$; $P < 0,001$), CAR та PLR ($\rho = +0,412$; $P < 0,001$), CRP та PLR ($\rho = +0,407$; $P < 0,001$).

Також було проведено кореляційний аналіз лабораторних біомаркерів з комбінованим індексом активності АксСпА ASDAS, який розраховується на основі об'єктивного лабораторного параметра — CRP (ASDAS-CRP) та ESR (ASDAS-ESR). Дані наведено в табл. 3.

Отримані коефіцієнти кореляції свідчать про статистично значущий сильний позитивний зв'язок між показником CRP та індексом ASDAS-ESR ($\rho = +0,750$; $p = 0,033$) і статистично значущий позитивний зв'язок помірної сили між показником ESR та індексом ASDAS-CRP ($\rho = +0,528$; $p < 0,001$). Співвідношення CAR та NLR показали статистично значущий позитивний зв'язок помірної сили між індексом ASDAS-CRP ($\rho = +0,588$, $p < 0,01$; $\rho = +0,569$; $p < 0,001$) та ASDAS-ESR ($\rho = +0,545$, $p < 0,001$; $\rho = +0,489$; $p = 0,004$).

Таблиця 1. Демографічна характеристика та лабораторні показники контрольної та дослідної груп

Показник	Група контролю (n = 22)	Група з АксСпА (n = 96)	P-value
Вік, роки (медіана ± SD)	39,6 ± 7,5	41,1 ± 7,7	0,265
Тривалість хвороби, роки	–	13,82 ± 7,4	–
CRP, мг/л	1,30 [0,65; 2,35]	6,20 [3,17; 13,28]	< 0,001
ESR, мм/год	4,00 [2,00;6,00]	12,00 [7,00; 20,00]	< 0,001
CAR	0,03 [0,01; 0,05]	0,15 [0,07; 0,32]	< 0,001
NLR	1,61 [1,30; 1,81]	1,76 [1,42; 2,71]	> 0,05
PLR	108,51 [92,41; 125,86]	117,08 [87,09; 156,88]	< 0,05

Примітки: CRP — С-реактивний білок; ESR — швидкість осідання еритроцитів; CAR — співвідношення С-реактивного білка й альбуміну; NLR — співвідношення нейтрофілів і лімфоцитів; PLR — співвідношення тромбоцитів і лімфоцитів; SD — стандартне відхилення.

Водночас між співвідношенням PLR та індексом ASDAS-ESR (ρ = +0,423, p = 0,033) визначено статистично значущий позитивний зв'язок помірної сили, а з індексом ASDAS-CRP встановлено прямий статистично значущий зв'язок, проте слабкий (ρ = +0,244, p = 0,034).

Проведений ROC-аналіз для оцінки діагностичної значущості співвідношення CAR щодо верифікації активності захворювання за індексом BASDAI продемонстрував низьку роздільну здатність даної моделі. Площа під кривою (AUC = 0,524) відповідає незадовільному рівню інформативності тесту. Встановлений 95% довірчий інтервал (95% CI: 0,385–0,662) вказує на відсутність вірогідної здатності цього співвідношення диференціювати пацієнтів за групами активності BASDAI. При пороговому значенні (cut-off point) 0,122 показники чутливості та специфічності становили лише 54,5 та 60,0 % відповідно. Схожі результати продемонстровані також співвідношеннями NLR, PLR (табл. 4).

Наступним етапом було проведення ROC-аналізу для співвідношень CAR, NLR, PLR та комбінованих індексів ASDAS-CRP, ASDAS-ESR. Площа під кривою для співвідношень CAR, NLR та залежних змінних ASDAS-CRP, ASDAS-ESR вказує на задовільну діагностичну силу цих співвідношень (табл. 4). Натомість PLR демонструє погану діагностичну здатність у розрізненні низької/помірної та високої/дуже високої активності АксСпА за шкалами ASDAS-CRP, ASDAS-ESR (AUC = 0,59; AUC = 0,57, відповідно). За результатами аналізу ROC-кривої було встановлено, що оптимальне порогове значення CAR становить 0,21 (рис. 1, 2), NLR — 2,32 (рис. 3, 4).

Обговорення

Об'єктивна оцінка активності АксСпА залишається складним завданням через суб'єктивність опитувальників (BASDAI) або часткову їх суб'єктивність (ASDAS-CRP, ASDAS-ESR) [12]. Лабораторна оцінка активності запального процесу обмежується двома основними гострофазовими показниками — CRP та ESR [8]. Однак у третини пацієнтів вони можуть бути в межах референтних значень навіть при загостренні АксСпА [13, 14]. При тривалому хронічному системному запальному процесі відбувається патогенетична адаптація імунної системи, внаслідок чого гострофазові показники можуть виявлятися в помірних або допорогових значеннях [17]. Натомість активується клітин-

Таблиця 2. Оцінка кореляції індексу BASDAI та лабораторних маркерів запалення у пацієнтів із АксСпА

Лабораторні маркери	Коефіцієнт кореляції Спірмена, ρ	P-value
CRP	+0,329	0,002
ESR	+0,323	0,008
CAR	+0,355	0,015
NLR	+0,379	< 0,001
PLR	+0,299	0,013

Примітки: BASDAI — Bath Ankylosing Spondylitis Disease Assessment Index (індекс оцінки активності АксСпА); CRP — С-реактивний білок; ESR — швидкість осідання еритроцитів; CAR — співвідношення С-реактивного білка й альбуміну; NLR — співвідношення нейтрофілів і лімфоцитів; PLR — співвідношення тромбоцитів і лімфоцитів.

Таблиця 3. Оцінка кореляції індексу ASDAS-CRP, ASDAS-ESR та лабораторних маркерів запалення у пацієнтів із АксСпА

Лабораторні маркери	ASDAS-CRP		ASDAS-ESR	
	Коефіцієнт кореляції Спірмена, ρ	P-value	Коефіцієнт кореляції Спірмена, ρ	P-value
CRP	–	–	+0,750	0,033
ESR	+0,528	< 0,001	–	–
CAR	+0,588	< 0,01	+0,545	< 0,001
NLR	+0,569	< 0,001	+0,489	0,004
PLR	+0,244	0,034	+0,423	0,033

Примітки: CRP — С-реактивний білок; ASDAS-CRP — Ankylosing Spondylitis Disease Activity Score (індекс оцінки активності АксСпА з використанням CRP); ERS — швидкість осідання еритроцитів; ASDAS-ESR — Ankylosing Spondylitis Disease Activity Score (індекс оцінки активності АксСпА з використанням ERS); CAR — співвідношення CRP і альбуміну; NLR — співвідношення нейтрофілів і лімфоцитів; PLR — співвідношення тромбоцитів і лімфоцитів.

на ланка, що відображається зміною співвідношення між пулами гранулоцитів (нейтрофілів) та лімфоцитів периферичної крові [18]. Оскільки ці клітини першими реагують на локальну або системну реактивацію запального процесу, зміна їхнього балансу більш точно віддзеркалює прихований імунний дисбаланс, ніж ізольовані показники протеїнів гострої фази [19, 20].

У попередніх дослідженнях встановлено, що співвідношення CAR, NLR та PLR відображають інтенсивність запальної відповіді при низці автоімунних захворювань [21–23]. Метою нашого дослідження було комплексне вивчення кореляцій між CRP, ESR, CAR, NLR, PLR та індексами суб'єктивної шкали BASDAI, а також частково суб'єктивної ASDAS з використанням

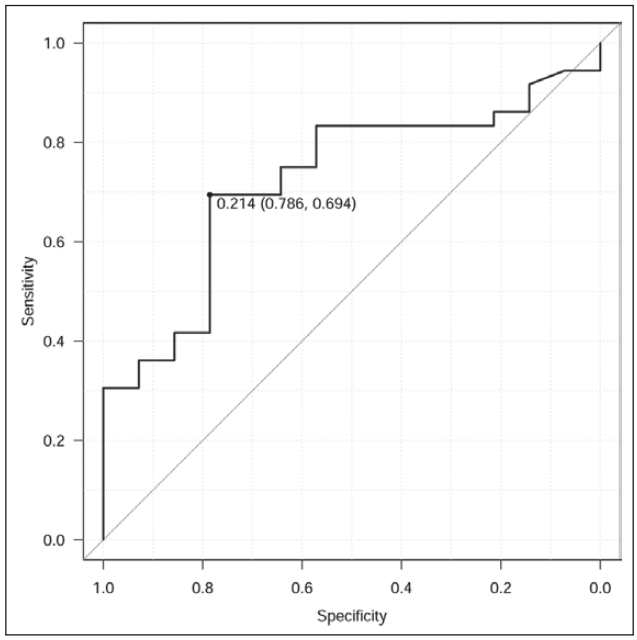


Рисунок 1. ROC-аналіз: діагностична значущість індексу CAR (за ASDAS-CRP)

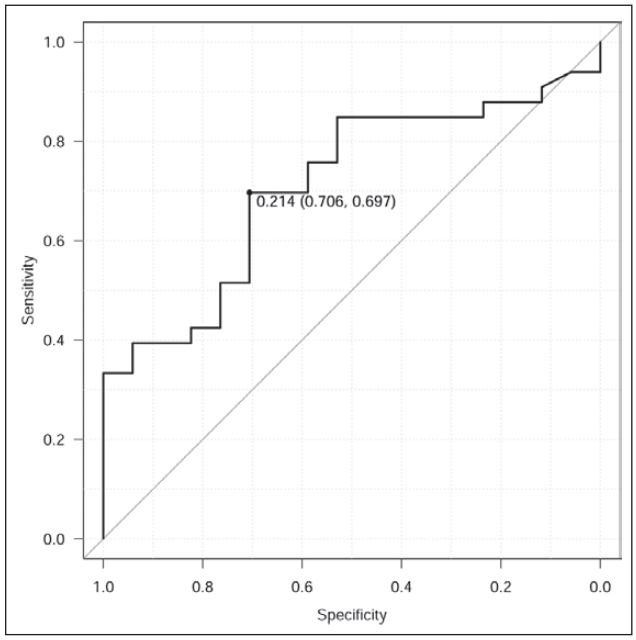


Рисунок 2. ROC-аналіз: діагностична значущість індексу CAR (за ASDAS-ESR)

Таблиця 4. Діагностична здатність змінних у розпізнаванні пацієнтів з активним та неактивним АксСпА за індексами BASDAI, ASDAS-CRP, ASDAS-ESR

Індекс	Лабораторні біомаркери	AUC	95% CI	Cut-off point	Чутливість,%	Специфічність, %
BASDAI	CAR	0,524	0,385–0,662	0,122	54,5	60,0
	NLR	0,490	0,349–0,630	1,571	72,7	41,8
	PLR	0,498	0,347–0,657	153,12	36,4	74,5
	CRP	0,520	0,380–0,660	4,900	54,5	60,0
ASDAS-CRP	CAR	0,723	0,672–0,873	0,214	78,6	69,4
	NLR	0,698	0,542–0,854	2,323	85,7	58,3
	PLR	0,595	0,414–0,775	91,613	42,9	86,1
	CRP	0,726	0,573–0,878	9,420	78,2	66,7
ASDAS-ESR	CAR	0,710	0,563–0,857	0,214	70,6	69,7
	NLR	0,727	0,584–0,870	2,324	88,2	63,6
	PLR	0,678	0,514–0,842	91,613	47,1	90,9
	CRP	0,713	0,565–0,860	4,200	59,2	84,8

Примітки: CRP — С-реактивний білок; ASDAS-CRP — Ankylosing Spondylitis Disease Activity Score (індекс оцінки активності АксСпА з використанням CRP); ERS — швидкість осідання еритроцитів; ASDAS-ESR — Ankylosing Spondylitis Disease Activity Score (індекс оцінки активності АксСпА з використанням ERS); BASDAI — Bath Ankylosing Spondylitis Disease Assessment Index (індекс оцінки активності АксСпА); CAR — співвідношення CRP і альбуміну; NLR — співвідношення нейтрофілів і лімфоцитів; PLR — співвідношення тромбоцитів і лімфоцитів; AUC — Area Under Curve, площа під кривою; cut-off point — оптимальні порогові значення; CI — confidence interval, довірчий інтервал.

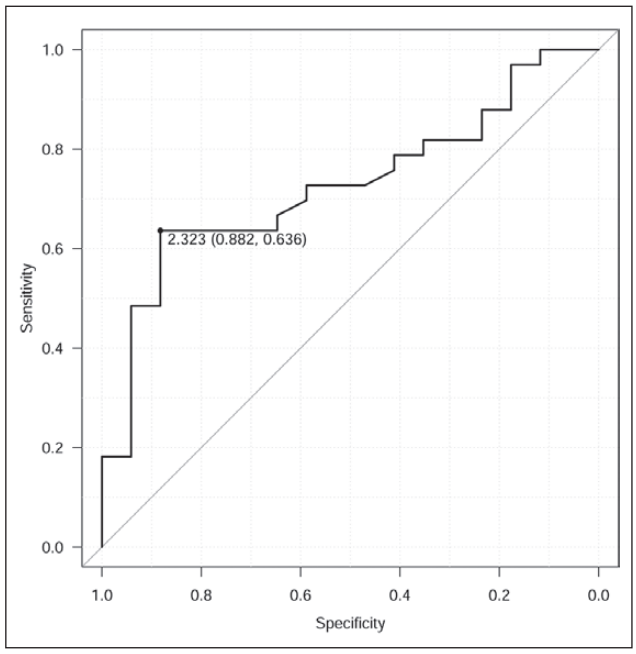


Рисунок 3. ROC-аналіз: діагностична значущість індексу NLR (за ASDAS-ESR)

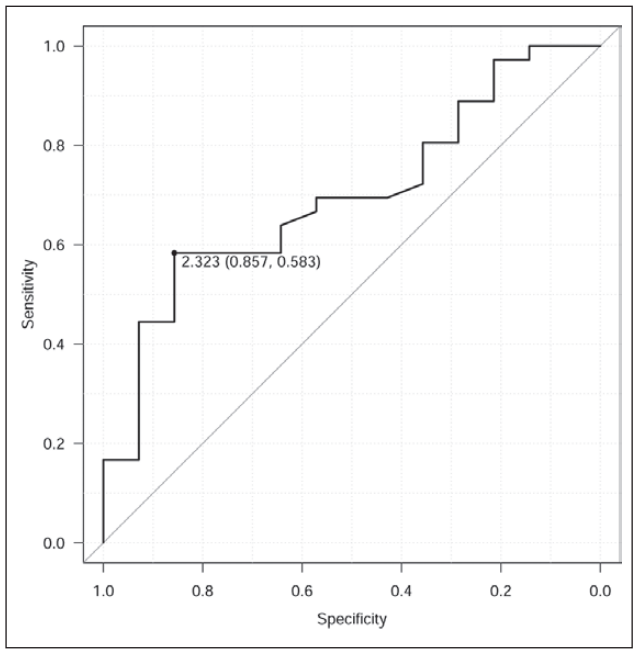


Рисунок 4. ROC-аналіз: діагностична значущість індексу NLR (за ASDAS-CRP)

CRP (ASDAS-CRP) та ESR (ASDAS-ESR) у пацієнтів з АксСпА.

Раніше дослідження Bozan et al. (2020), Gao et al. (2025), Samanci et al. (2026) виявили, що суб'єктивна шкала BASDAI має слабку кореляцію з гематологічними співвідношеннями CAR, NLR, PLR. Цей факт підтвердився і в нашому дослідженні. Однак дані досліджень Gunes et al. (2019), Yildiz et al. (2021) демонструють статистично значущий зв'язок помірної сили між цими змінними. Можна припустити, що такі розбіжності зумовлені певними факторами, які безпосередньо не пов'язані із запальною активністю АксСпА, проте можуть суттєво впливати на бали BASDAI (наприклад, хронічний больовий синдром, ступінь структурного ураження, тривалість захворювання, наявність депресії).

За результатами проведеного дослідження, комбіновані індекси ASDAS-CRP та ASDAS-ESR показали міцніший зв'язок (помірної сили) зі співвідношеннями CAR та NLR. На відміну від суб'єктивного індексу BASDAI індекс ASDAS інтегрує об'єктивні лабораторні показники разом з клінічними проявами, оцінені самим пацієнтом. Крім того, за допомогою ROC-аналізу визначено порогові значення (cut-off point) для CAR та NLR, що дозволяє використання їх як індикаторів загострення АксСпА.

У нашому дослідженні були певні обмеження, що стосувались невеликого розміру вибірки, а також не були враховані такі фактори, як тривалість захворювання та вплив проведеної терапії. Тому необхідні подальші дослідження з більшим розміром вибірки для кращої оцінки зв'язку між клінічними шкалами активності та лабораторними маркерами запалення.

Висновки

1. Підвищені значення CAR та NLR можна вважати надійними біомаркерами високої активності АксСпА, оціненої за ASDAS-CRP та ASDAS-ESR.

2. Підтверджена задовільна діагностична здатність CAR та NLR до розрізнення груп пацієнтів з низькою/помірною (ASDAS ≤ 2,1) або високою/дуже високою (ASDAS > 2,1) активністю АксСпА за вказаними шкалами.

3. Співвідношення CAR та NLR є допоміжним інструментом для комплексної об'єктивної оцінки АксСпА.

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

Інформація про фінансування. Дослідження виконувалось у межах ініціативно-пошукової роботи «Удосконалення методів патогенетично обґрунтованої терапії у військовослужбовців та цивільних осіб із серонегативним спондилоартритом на основі клінічних та експериментальних даних» державним коштом.

Внесок авторів. Гринь В.К. — концепція та дизайн дослідження; Проценко Г.О. — виявлення проблематики та стратегічне бачення дослідження; Пастернак М.Л. — збір матеріалів, аналіз даних, статистичний підрахунок, написання статті, редагування тексту.

Список літератури

1. Zhu W, He X, Cheng K, Zhang L, Chen D, Wang X, et al. Ankylosing spondylitis: etiology, pathogenesis, and treatments. Bone Res. 2019 Aug 5;7:22. doi: 10.1038/s41413-019-0057-8.

2. Ministry of Health of Ukraine. Klinichna nastanova: standarty medychnoyi dopomohy aksial nyy spondyloartryt [Clinical guideline: standards of medical care for axial osteoarthritis]. Kyiv; 2025. Ukrainian.

3. Maksymowych WP. Biomarkers for diagnosis of axial spondyloarthritis, disease activity, prognosis, and prediction of response to therapy. Front Immunol. 2019;10:305. doi: 10.3389/fimmu.2019.00305.

4. Proft F, Schally J, Brandt HC, Brandt-Juergens J, Burmester GR, Haibel H, et al. Validation of the ASDAS with a quick quantitative CRP assay (ASDAS-Q) in patients with axial SpA: a prospective multicentre cross-sectional study. Ther Adv Musculoskelet Dis. 2022 Mar 30;14:1759720X221085951. doi: 10.1177/1759720X221085951.

5. Kaplan H, Cengiz G, Şaş S, Eldemir YÖ. Is the C-reactive protein-to-albumin ratio the most remarkable simple inflammatory marker showing active disease in patients with axial spondyloarthritis, psoriatic arthritis, and rheumatoid arthritis? Clin Rheumatol. 2023 Nov;42(11):2959-2969. doi: 10.1007/s10067-023-06703-8.

6. Machado P, Landewé RB, Braun J, Baraliakos X, Hermann KG, Hsu B, et al. MRI inflammation and its relation with measures of clinical disease activity and different treatment responses in patients with ankylosing spondylitis treated with a tumour necrosis factor inhibitor. Ann Rheum Dis. 2012 Dec;71(12):2002-2005. doi: 10.1136/annrheumdis-2012-201999.

7. Ramiro S, Nikiphorou E, Sepriano A, Ortolan A, Webers C, Baraliakos X, et al. ASAS-EULAR recommendations for the management of axial spondyloarthritis: 2022 update. Ann Rheum Dis. 2023 Jan;82(1):19-34. doi: 10.1136/ard-2022-223296.

8. Navarro-Compán V, Ramiro S, Landewé R, Dougados M, Miceli-Richard C, Richette P, et al. Disease activity is longitudinally related to sacroiliac inflammation on MRI in male patients with axial spondyloarthritis: 2-years of the DESIR cohort. Ann Rheum Dis. 2016 May;75(5):874-878. doi: 10.1136/annrheumdis-2015-207786.

9. Slouma M, Rahmouni S, Dhahri R, Gharsallah I, Metoui L, Louzir B. Neutrophil-to-lymphocyte ratio, platelet-to-lymphocyte ratio, C-reactive protein to albumin ratio, and albumin to fibrinogen ratio in axial spondyloarthritis: a monocentric study. Curr Rheumatol Rev. 2021;17(3):312-317. doi: 10.2174/1573397116666201224105359.

10. Pamukcu M, Izci Duran T. Could C-reactive protein/albumin ratio be an indicator of activation in axial spondyloarthritis? J Coll Physicians Surg Pak. 2021 May;31(5):537-542. doi: 10.29271/jcpsp.2021.05.537.

11. Cui R, Wang YL, Tao YL, Tong Q, Chen Z, Dai SM. Platelet to albumin ratio is an independent indicator for disease activity in ankylosing spondylitis. Clin Rheumatol. 2023 Feb;42(2):407-413. doi: 10.1007/s10067-022-06439-x.

12. Sadioglu Cagdas O, Gokcen N, Yazici A, Cefle A. Monitoring disease activity and treatment response in ankylosing spondylitis: a retrospective study of hematologic inflammatory markers. Rheumatol Int. 2025 Jan;45(1):10. doi: 10.1007/s00296-024-05763-6.

13. Taha SI, Samaan SF, Ibrahim RA, Moustafa NM, El-Sehsah EM, Youssef MK. Can complete blood count picture tell us more about the activity of rheumatological diseases? Clin Med Insights Arthritis Musculoskelet Disord. 2022 Apr 22;15:11795441221089182. doi: 10.1177/11795441221089182.

14. Al-Osami MH, Awadh NI, Khalid KB, Awadh AI. Neutrophil/lymphocyte and platelet/lymphocyte ratios as potential markers of disease activity in patients with ankylosing spondylitis: a case-control study. Adv Rheumatol. 2020 Jan 29;60(1):13. doi: 10.1186/s42358-020-0113-5.

15. Liang T, Chen J, Xu G, Zhang Z, Xue J, Zeng H, et al. Platelet-to-lymphocyte ratio as an independent factor was associated with the severity of ankylosing spondylitis. Front Immunol. 2021 Nov 5;12:760214. doi: 10.3389/fimmu.2021.760214.

16. Rudwaleit M, van der Heijde D, Landewé R. The development of Assessment of Spondyloarthritis international Society classification criteria for axial spondyloarthritis (part II): validation and final selection. Ann Rheum Dis. 2009 Jun;68(6):777-783. doi: 10.1136/ard.2009.108233.

17. Rapapa KA, Deng Y, Peng Y, Ni J, Pan F. The association and clinical significance of hematological biomarkers in ankylosing spondylitis. Sci Rep. 2025 May 6;15(1):15755. doi: 10.1038/s41598-025-99274-4. PMID: 40328909; PMCID: PMC12056196.

18. Viglone M, Pierdomenico M, Vernia P. Reassessing traditional inflammatory biomarkers: novel approaches to develop biomarkers predicting treatment response. Expert Rev Clin Immunol. 2021 Mar;17(3):227-238. doi: 10.1080/1744666X.2021.13622154.

19. Samanci R, Ataoglu S. New multi-inflammatory indices for evaluating disease activity in ankylosing spondylitis. Egypt Rheumatol Rehabil. 2026 Jul 16;53(1):42. doi: 10.1186/s43166-026-00428-7.

20. Wu J, Yan L, Chai K. Systemic immune-inflammation index is associated with disease activity in patients with ankylosing spondylitis. J Clin Lab Anal. 2021 Sep;35(9):e23964. doi: 10.1002/jcla.23964. PMID: 34418163; PMCID: PMC8418483.

21. Gao MZ, Huang YL, Wu XD, Wu Y, Yang CQ. Red blood cell distribution width and neutrophil to lymphocyte ratio are correlated with disease activity of dermatomyositis and polymyositis. J Clin Lab Anal. 2018 Mar;32(3):e22209. doi: 10.1002/jcla.22209. Epub 2017 Jul 19. PMID: 28722180.

22. Pan L, Du J, Li T, Liao H. Platelet-to-lymphocyte ratio and neutrophil-to-lymphocyte ratio associated with disease activity in patients with Takayasu's arteritis: a case-control study. BMJ Open. 2017 May 4;7(4):e014451. doi: 10.1136/bmjopen-2016-014451. PMID: 28473512; PMCID: PMC5623399.

23. Wu Y, Chen Y, Yang X, et al. Neutrophil-to-lymphocyte ratio (NLR) and platelet-to-lymphocyte ratio (PLR) were associated with disease activity in patients with systemic lupus erythematosus. Int Immunopharmacol. 2016 Jul;36:94-99. doi: 10.1016/j.intimp.2016.04.006.

Отримано/Received 03.08.2026
Рецензовано/Revised 04.09.2026
Прийнято до друку/Accepted 13.09.2026

Information about authors

Vladyslav Hryn, Academician of NAMSU, MD, DSc, PhD, Professor, Honored Doctor of Ukraine, General Director of the National Scientific Center "M.D. Strazhesko Institute of Cardiology, Clinical and Regenerative Medicine of NAMSU", Kyiv, Ukraine; e-mail: stragh.cardio@gmail.com; https://orcid.org/0009-0000-9815-5315

Halyna Protsenko, MD, DSc, PhD, Professor, Leading Research Fellow, Department of Non-Coronary Heart Diseases, Rheumatology and Therapy, National Scientific Center "M.D. Strazhesko Institute of Cardiology, Clinical and Regenerative Medicine of NAMSU", Kyiv, Ukraine; e-mail: g_protsenko@yahoo.com; https://orcid.org/0000-0001-9328-4839

Marta Pasternak, PhD-student, Department of Non-Coronary Heart Diseases, Rheumatology and Therapy, National Scientific Center "M.D. Strazhesko Institute of Cardiology, Clinical and Regenerative Medicine of NAMSU", Kyiv, Ukraine; e-mail: 1992mapalu@gmail.com; phone: +380 (95) 797-27-51; https://orcid.org/0009-0008-4759-6581

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 carried out within the framework of the initiative research project "Improving the methods of pathogenetically substantiated therapy in military personnel and civilians with seronegative spondyloarthritis based on clinical and experimental data" with state funding.

Authors' contribution. V.K. Hryn — concept and design of the study; G.O. Protsenko — problem identification, strategic research vision; M.L. Pasternak — data collection, data analysis, statistical analysis, writing the article, editing the text.

V.K. Hryn, H.O. Protsenko, M.L. Pasternak
National Scientific Center "M.D. Strazhesko Institute of Cardiology, Clinical and Regenerative Medicine of NAMSU", Kyiv, Ukraine

Correlation analysis of clinical activity indices and integral hematological biomarkers in patients with axial spondyloarthritis

Abstract. ***Background.*** Objective assessment of the disease activity in patients with axial spondyloarthritis (axSpA) remains a challenging task due to the subjectivity of traditional questionnaires, such as the Bath Ankylosing Spondylitis Disease Activity Index (BASDAI), or their partial subjectivity, the Ankylosing Spondylitis Disease Activity Score (ASDAS). ASDAS is calculated using C-reactive protein (ASDAS-CRP) or erythrocyte sedimentation rate (ASDAS-ESR). However, current data indicate that these acute-phase reactants may remain within the reference range in approximately one-third of axSpA patients, even in clinically active disease. Therefore, there is a need to verify reliable, cost-effective additional laboratory markers of inflammation that will serve for a comprehensive assessment of axSpA activity. Objective: to investigate the nature and strength of correlations between activity indices (BASDAI, ASDAS-CRP, ASDAS-ESR) and laboratory biomarkers of inflammation (CRP, ESR and CRP to albumin ratio (CAR); neutrophil to lymphocyte ratio (NLR); platelet to lymphocyte ratio (PLR)) in patients with axSpA and to assess their diagnostic significance for a comprehensive assessment of disease activity. ***Materials and methods.*** A total of 118 study participants were examined, including 96 patients with a confirmed diagnosis of axSpA and 22 healthy individuals as the control group. Data retrieved from medical records were processed using the SPSS statistical software package, version 26.0. Correlation analyses and receiver operating characteristic (ROC) analyses were performed. ***Results.*** In the study group, a statistically significant positive correlation of moderate strength was found between the BASDAI score and CRP, ESR, CAR, and NLR ($\rho = +0.329$, $p < 0.002$; $\rho = +0.323$, $p < 0.008$; $\rho = +0.355$, $p < 0.015$; $\rho = +0.379$, $p < 0.001$, respectively). Concurrently, the correlation between the BASDAI score and PLR was assessed as weak ($\rho = +0.299$, $p = 0.013$). The composite ASDAS-ESR index demonstrated a statistically significant strong correlation with CRP ($\rho = +0.750$, $p = 0.033$). Furthermore, a statistically significant positive correlation of moderate strength was revealed between laboratory parameters (ESR, CAR, NLR) and the composite ASDAS-CRP index ($\rho = +0.528$, $p < 0.001$; $\rho = +0.588$, $p < 0.01$; $\rho = +0.569$, $p < 0.001$, respectively), as well as between CAR, NLR, and ASDAS-ESR ($\rho = +0.545$, $p < 0.001$; $\rho = +0.489$, $p = 0.004$, respectively). Conversely, a statistically significant weak correlation was observed between PLR and ASDAS-CRP index ($\rho = +0.244$, $p < 0.034$), whereas its correlation with ASDAS-ESR was of moderate strength ($\rho = +0.423$, $p = 0.033$). Based on ROC analysis, the optimal cutoff thresholds for predicting ASDAS-CRP activity were determined as 0.214 for CAR (78.6 % sensitivity, 69.4 % specificity) and 2.343 for NLR (85.7 % sensitivity, 71.5 % specificity). ***Conclusions.*** Among routine laboratory tests, CAR and NLR ratios can be potential biomarkers of high axSpA activity (as assessed by ASDAS-CRP and ASDAS-ESR). They demonstrated acceptable accuracy in identifying patients with low/moderate (ASDAS ≤ 2.1) or high/very high (ASDAS > 2.1) disease activity based on ASDAS-CRP and ASDAS-ESR. Therefore, these ratios may serve as a valuable complementary tool for comprehensive objective assessment of axSpA activity.

Keywords: axial spondyloarthritis; structural damage of the spine; ASDAS-CRP; ASDAS-ESR; C-reactive protein to albumin ratio; neutrophil to lymphocyte ratio

УДК 616.718.4-007.24-001.5-089.227.84 *DOI: https://doi.org/10.22141/1608-1706.5.27.2026.1112*

Калашніков А.В., Сабарна Ю.Х.М.
ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», м. Київ, Україна

Вплив застосування нових технологій на ефективність оперативного лікування хворих із черезвертлюговими переломами стегнової кістки

Резюме. ***Актуальність.*** *На попередньому етапі нами було проведено аналіз напружень у системі кістка — імплантат при виконанні остеосинтезу у хворих із черезвертлюговими переломами типу А1, А2 та А3. Цікавим у науковому плані вважаємо провести клінічне дослідження з визначення ефективності оперативного лікування групи хворих із переломами проксимального відділу стегнової кістки (ППВСК), у якій впроваджено під час оперативного втручання висновки біомеханічного дослідження, та групи хворих із ППВСК, у якій остеосинтез виконувався за традиційною методикою.* ***Мета:*** *визначити вплив застосування нових технологій блокуючого інтрамедулярного остеосинтезу на ефективність оперативного лікування хворих із черезвертлюговими переломами стегнової кістки.* ***Матеріали та методи.*** *Матеріалом дослідження став аналіз історій хвороби, рентгенограм та клінічне обстеження 100 хворих із черезвертлюговими переломами стегнової кістки, які проходили оперативне лікування на базі ДУ «Національний інститут травматології та ортопедії НАМН України» в період 2015–2024 рр. Для визначення ефективності хірургічного лікування проводили обстеження хворих через 4,5 та 12 місяців після проведеного оперативного втручання, використовуючи бальну класифікацію стану кульшового суглоба за Harris. Оцінку самопочуття хворих визначали за опитувальником SF-36. Дані статистично оброблені.* ***Результати.*** *Проведеними нами клінічними дослідженнями доведена висока ефективність впровадження нових технологій (диференційований підхід щодо використання фіксуючих гвинтів залежно від типу ППВСК згідно з класифікацією АО).* ***Висновки.*** *Проведене клінічне дослідження з метою визначення ефективності впровадження диференційованого підходу щодо використання фіксуючих гвинтів залежно від типу ППВСК згідно з класифікацією АО. Визначено статистично вірогідне ($p < 0,05$) збільшення ефективності лікування в групі, у якій використовували диференційований підхід, згідно з бальною класифікацією стану кульшового суглоба за Harris (82,32 та 91,35 бала) через 4,5 і 12 місяців після оперативного втручання. Визначено статистично вірогідне ($p < 0,05$) поліпшення самопочуття хворих дослідної групи порівняно з контрольною групою за компонентами фізичного функціонування (90,08 бала та 71,62 бала відповідно), інтенсивності болю (88,13 бала у дослідній та 70,18 бала у контрольній групі), життєвої активності (92,49 та 70,44 бала) та соціального функціонування (90,25 бала у дослідній та 69,20 бала у контрольній групі) згідно з класифікацією SF-36 через 4,5 і 12 місяців після оперативного втручання. Таким чином, визначена висока ефективність впровадження нових технологій у лікуванні хворих з переломами проксимального відділу стегнової кістки. Рекомендовано впровадити їх у практику травматологів на теренах України.*
Ключові слова: *переломи; остеосинтез; кістка; лікування; технології; ефективність лікування*

Вступ

Переломи проксимального відділу стегнової кістки (ППВСК) — одна з найбільш поширених причин надходження хворих до травматолого-ортопедичного стаціонару, найчастіше ці ушкодження виникають у результаті низькоенергетичної травми, наприклад падіння з висоти власного зросту [1]. Зі зростанням тривалості життя населення збільшується частка людей похилого віку, зокрема і з хронічною соматичною патологією, відповідно, зростає кількість ППВСК.

© «Травма» / «Trauma» («Travma»), 2026
© Видавець Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2026

Для кореспонденції: Калашніков Андрій Валерійович, доктор медичних наук, професор, завідувач відділу травматичних пошкоджень опорно-рухового апарату та проблем остеосинтезу, ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», вул. Бульварно-Кудрявська, 27, м. Київ, 01054, Україна; e-mail: orgitoua@gmail.com; phone: +380 (50) 568-59-06
For correspondence: Andrii V. Kalashnikov, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Traumatic Injuries of the Musculoskeletal System and Osteosynthesis Problems, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Bulvarno-Kudriavska st., 27, Kyiv, 01054, Ukraine; e-mail: orgitoua@gmail.com; phone: +380 (50) 568-59-06
Full list of authors information is available at the end of the article.

Щорічно у всьому світі реєструється близько 1 700 000 випадків ППВСК [2].

До 2050 р. за збереження основних демографічних тенденцій прогнозується збільшення кількості ППВСК до 6 300 000 випадків щорічно [2].

Для більшості пацієнтів з ППВСК така травма означає втрату колишнього ступеня мобільності, а для менш активних пацієнтів — стійку втрату можливості самообслуговування навіть у межах свого житла. У пацієнтів з вже наявною супутньою патологією та вимушеним періодом іммобілізації до хірургічного лікування ППВСК веде до посилення існуючих соматичних захворювань. Так, за даними P. Haentjens, J. Magaziner, 2010, протягом перших трьох місяців після ППВСК смертність досягає 5,75 % у жінок та 7,95 % — у чоловіків [3]. За даними інших зарубіжних авторів, у 2007 р. смертність протягом 120 днів після цієї травми при консервативному лікуванні досягала 62 % [4].

Усе це обумовлює необхідність раннього оперативного лікування цієї категорії хворих, що дозволяє почати ранню реабілітацію та уникнути соматичних ускладнень. Проте слід зазначити, що після оперативного лікування ППВСК кількість ускладнень та незадовільних функціональних результатів залишається досить високою і досягає 30 % [5]. Повторні операції після остеосинтезу при ППВСК доводиться виконувати кожному десятому пацієнту [6], що пов'язано як з порушенням методики імплантації металоконструкцій і техніки операції, так і з неправильним післяопераційним веденням хворого. Тому вдосконалення методик та технологій оперативного лікування хворих з ППВСК є актуальним завданням сучасної травматології.

Загальновідомою класифікацією черезвертлюгових переломів стегнової кістки є класифікація Асоціації остеосинтезу (ОА) [7], у якій автори виділяють вертикально нестабільний, але стабільний в горизонтальній площині перелом типу А1, нестабільний у вертикальній та горизонтальній площинах перелом типу А2 і нестабільний у горизонтальній площині та стабільний у вертикальній площині перелом типу А3.

На попередньому етапі нами було проведено комп'ютерне моделювання напружень на металевих фіксаторах при виконанні остеосинтезу у хворих із черезвертлюговими переломами типу А1 [8], А2 та А3. Визначено, що найбільш біомеханічно обґрунтованою при черезвертлюгових переломах типу А1 є модель PFN-стрижня (proximal femoral nail, проксимальний стегновий стрижень) у варіанті без гвинтів, при типі А2 — модель PFN-стрижня із застосуванням 2 гвинтів, при типі А3 — модель PFN-стрижня з 1 блокуючим гвинтом, про що свідчить мінімальне напруження на металевому фіксаторі та наявність оптимальної мікрорухливості між кістковими відламками. Цікавим у науковому плані вважаємо провести клінічне дослідження з визначення ефективності оперативного лікування групи хворих із ППВСК, у якій впроваджено висновки біомеханічного дослідження під час оперативного втручання, та групи хворих із ППВСК, у якій остеосинтез виконувався за традиційною методикою.

Мета роботи: визначити вплив застосування нових технологій блокуючого інтрамедулярного остеосинтезу (БІОС) на ефективність оперативного лікування хворих із черезвертлюговими переломами стегнової кістки.

Матеріали та методи

Матеріалом дослідження став аналіз історій хвороби, рентгенограм та клінічне обстеження 100 хворих із черезвертлюговими переломами стегнової кістки, які проходили оперативне лікування на базі ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України» в період 2015–2024 рр. Були розроблені таблиці, у яких фіксувалися клініко-анамнестичні та рентгенологічні дані.

Усі хворі були розподілені на дві групи залежно від використаних методик БІОС. Першу (контрольну) групу становили 50 хворих із черезвертлюговими переломами стегнової кістки, яким проводився БІОС за традиційною методикою. Другу (дослідну) групу становили 50 хворих з черезвертлюговими переломами стегнової кістки, яким проводили БІОС, використовуючи нові технології.

Розподіл у групах хворих за віком та статтю наведено в табл. 1 та 2.

Аналізуючи дані табл. 1 та 2, можна відмітити, що групи обстеження були статистично однорідні за віком та статтю. В обох групах статистично вірогідно ($p \le 0,01$) переважали особи жіночої статі та хворі похилого і старечого віку за класифікацією ВООЗ [9].

Також статистично однорідними групи спостереження були за типом перелому за класифікацією АО

Таблиця 1. Розподіл хворих контрольної групи з черезвертлюговими переломами стегнової кістки за віком та статтю

Стать	Вікові групи (роки)								Всього	
	21–44		45–59		60–74		Старше 75			
	Абс.	%	Абс.	%	Абс.	%	Абс.	%	Абс.	%
Чоловіки	1	5,2	3	15,8	6	31,6*	9	47,4*	19	38,0
Жінки	2	6,5	6	19,3	8	25,8*	15	48,4*	31	62,0**
Всього	3	6,0	9	18,0	14	28,0*	24	48,0*	50	100,0

Примітки: * — дані статистично вірогідно ($p \le 0,01$) відмінні від даних хворих віком 45–59 рр.; ** — дані статистично вірогідно ($p \le 0,01$) відмінні від даних хворих чоловічої статі.

[8]. Розподіл хворих за класифікацією АО наведено в табл. 3.

Для визначення ефективності хірургічного лікування проводили обстеження хворих через 4,5 та 12 місяців після проведеного оперативного втручання, використовуючи бальну класифікацію стану кульшового суглоба за Harris [10]. При сумі балів, яка дорівнювала менше за 70, стан кульшового суглоба вважали незадовільним, 70–79 балів — задовільним, 80–89 — добрим та 90–100 — відмінним. Оцінку самопочуття хворих визначали за опитувальником SF-36 [11]. Опитувальник SF-36 складається з 36 запитань, що відображаються у вигляді восьми категорій: фізичне функціонування (Physical Functioning — PF), рольове функціонування (Role Physical Functioning — RP), інтенсивність болю (Bodily pain — BP), загальний стан здоров'я (General Health — GH), життєва активність (Vitality — VT), соціальне функціонування (Social Functioning — SF), рольове функціонування, яке обумовлене емоційним станом (Role-Emotional — RE), психічне здоров'я

Таблиця 2. Розподіл хворих дослідної групи з черезвертлюговими переломами стегнової кістки за віком та статтю

Стать	Вікові групи (роки)								Всього	
	21–44		45–59		60–74		Старше 75			
	Абс.	%	Абс.	%	Абс.	%	Абс.	%	Абс.	%
Чоловіки	1	5,0	4	20,0	5	25,0*	10	50,0*	20	40,0
Жінки	2	6,7	5	16,7	7	23,3*	16	53,3*	30	60,0**
Всього	3	6,0	9	18,0	12	24,0*	26	52,0*	50	100,0

Примітки: * — дані статистично вірогідно ($p \leq 0,01$) відмінні від даних хворих віком 45–59 рр.; ** — дані статистично вірогідно ($p \leq 0,01$) відмінні від даних хворих чоловічої статі.

Таблиця 3. Розподіл хворих контрольної та дослідної груп з черезвертлюговими переломами за класифікацією АО

Групи дослідження	Тип перелому за АО						Всього	
	A1		A2		A3			
	Абс.	%	Абс.	%	Абс.	%	Абс.	%
Контрольна	18	36,0	17	34,0	15	30,0	50	50,0
Дослідна	18	36,0	18	36,0	14	28,0	50	50,0
Всього	36	36,0	35	35,0	29	29,0	100	100,0

Таблиця 4. Показники клінічної оцінки кульшового суглоба за Harris (Xcp ± mx) у хворих груп дослідження через 4,5 і 12 місяців після оперативного втручання

Групи дослідження	Кількість балів за Harris, Xcp ± mx		
	До оперативного втручання	Через 4,5 місяці після операції	Через 12 місяців після операції
Контрольна	34,00 ± 0,55	68,42 ± 0,65	74,04 ± 0,54
Дослідна	33,88 ± 0,46	82,32 ± 0,68*	91,35 ± 0,32*

Примітка: * — показники статично вірогідні ($p < 0,05$) порівняно з контрольною групою хворих.

Таблиця 5. Оцінка самопочуття хворих після оперативного втручання за класифікацією SF-36 [11]

Групи хворих	Фізична складова SF-36, M ± n				Психічна складова SF-36, M ± n				Σ
	PF	RP	P	GH	VT	SF	RE	MH	
Контрольна	71,62 ± 0,27	73,50 ± 0,27	70,18 ± 0,27	74,06 ± 0,27	70,44 ± 0,27	69,20 ± 0,27	70,53 ± 0,27	71,11 ± 0,27	71,33 ± 0,27
Дослідна	90,08 ± 0,27	84,24 ± 0,27	88,13 ± 0,27	86,17 ± 0,27	92,49 ± 0,27	90,25 ± 0,27	86,08 ± 0,27	88,26 ± 0,27	88,21 ± 0,42

Примітки: PF — фізичне функціонування (Physical functioning); RP — рольове фізичне функціонування (Role physical functioning); P — інтенсивність болю (Intensity of pain); GH — загальний стан здоров'я (General state of health); VT — життєва активність (Vitality); SF — соціальне функціонування (Social functioning); RE — рольове функціонування, обумовлене емоційним станом (Role-Emotional); MH — психічний стан здоров'я (Mental state of health).

(Mental Health — MH). Показники кожної шкали (від 1 до 100) складені таким чином, що чим вище значення показника, тим краще оцінка за обраною шкалою. На підставі результатів формують два параметри: психологічний і фізичний компоненти здоров'я.

Для проведення розрахунків використовували базу даних обстеження хворих, що були введені в таблицю Microsoft Excel, статистичний пакет цієї програми та програму Statistica [12].

Результати

Показники клінічної оцінки кульшового суглоба за Harris у хворих груп дослідження через 4,5 і 12 місяців після оперативного втручання представлено в табл. 4 та на рис. 1.

Аналізуючи табл. 4 та рис. 1, ми визначили статистично вірогідне ($p \leq 0,05$) збільшення бальних показників через 4,5 та 12 місяців після оперативного лікування у дослідній групі хворих, у якій використовували нові методи лікування, порівняно з контрольною групою, у якій використовували традиційні методи лікування.

Оцінку ефективності лікування ППВСК груп спостереження згідно з класифікацією SF-36 [11] наведено в табл. 5 та на рис. 2, 3.

При аналізі табл. 5. та рис. 2 між бальними показниками фізичного стану здоров'я груп обстежених хворих визначено статистично вірогідне ($p < 0,05$) збільшення показників дослідної групи порівняно з контрольною за компонентом фізичного функціонування (PF), що становило 18,46 бала (90,08 бала у дослідній та 71,62 бала у контрольній групі), та компонентом інтенсивності болю (P), що, у свою чергу, становило 17,95 бала (88,13 бала у дослідній та 70,18 бала у контрольній групі).

При аналізі табл. 5 та рис. 3 визначено статистично вірогідне ($p < 0,05$) збільшення показників дослідної групи порівняно з контрольною за компонентом життєвої активності (VT), що становило 22,05 бала (92,49 бала у дослідній та 70,44 бала у контрольній групі), та компонентом соціального функціонування (SF), що, у свою чергу, становило 21,05 бала (90,25 бала у дослідній та 69,20 бала у контрольній групі).

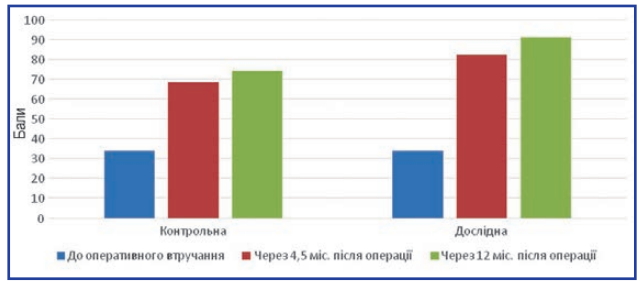


Рисунок 1. Показники клінічної оцінки кульшового суглоба за Harris (Xcp ± mx) у хворих груп дослідження через 4,5 і 12 місяців після оперативного втручання

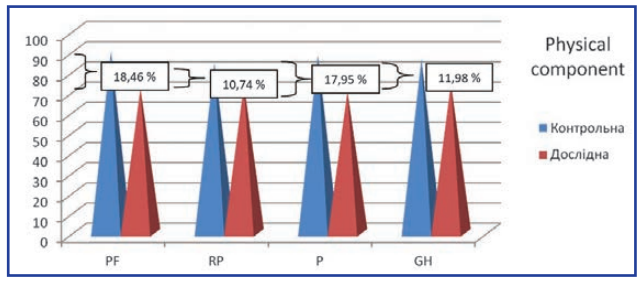


Рисунок 2. Оцінка фізичної стану здоров'я хворих після оперативного втручання за класифікацією SF-36

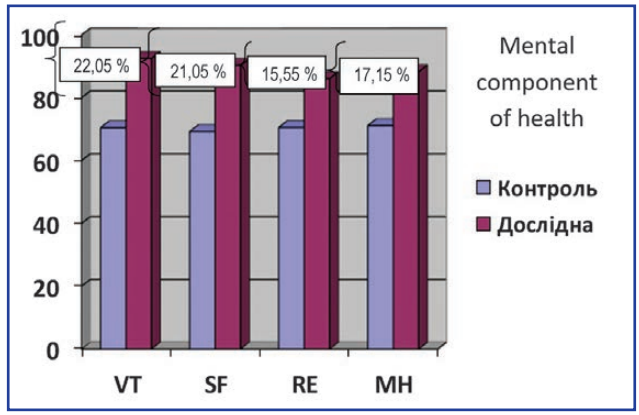


Рисунок 3. Оцінка психічного стану здоров'я хворих після оперативного втручання за класифікацією SF-36

Обговорення

Оперативне лікування ППВСК дало змогу значно зменшити летальність хворих. Зараз воно є методом вибору, нерідко єдиним шансом зберегти пацієнту життя і повернути йому втрачену працездатність, здатність самостійно пересуватися, обслуговувати себе [13]. Для оперативного лікування ППВСК використовуються методи внутрішнього остеосинтезу (Г-подібна пластина, системи DHS, DCS (dynamic hip screw, динамічна вертлюгова пластина), PFN, гамма-стрижень та ін.) та ендопротезування кульшового суглоба [14]. Але іноді досить складно визначити час і обсяг хірургічного лікування через особливості загального стану хворого, методу фіксації (застосування проксимального стегнового стрижня, пластини DHS чи іншої конструкції або ендопротезування), а також раціонального лікування посттравматичної коагулопатії [15]. Вибір методу лікування переломів проксимального відділу стегнової кістки є одним з найважливіших, оскільки від цього залежить не тільки час зрощення перелому, а й відновлення функції кінцівки та працездатності потерпілого.

На сьогодні в розвинутих країнах світу при лікуванні переломів проксимального відділу стегнової кістки широко впроваджуються малоінвазивні технології застосування проксимального стегнового стрижня (Trochanteric gamma nail G 3 — STRYKER, PFN A — SYNTHES, ChFN — ChM). Ці методики оперативного лікування переломів довгих кісток застосовуються

у 60–70 % хворих [16] і дозволяють, на відміну від ендопротезування, виконати органозберігаючі операції на травмованому кульшовому суглобі.

Проте нами не були знайдені літературні дані стосовно диференційованого підходу щодо використання металевих фіксаторів при БІОС залежно від типу ППВСК згідно з класифікацією АО.

Так, при переломах 31А1, за наявності тільки вертикального компонента нестабільності, застосування блокуючого інтрамедулярного остеосинтезу цілком забезпечує стабілізацію перелому у вертикальній площині. Натомість зберігається можливість функціональної динамізації кісткових відламків у процесі обмеженого функціонального навантаження.

При переломах 31А2, за яких наявна двоплощинна нестабільність відламків, доцільна статична фіксація інтрамедулярного стрижня з обов'язковим збереженням можливості функціональної динамізації відламків за рахунок переміщення шийкового гвинта.

При переломах 31А3, за наявності горизонтальної нестабільності кісткових відламків, стабілізацію інтрамедулярного стрижня здійснюють шляхом введення фіксуючого гвинта у динамічний дистальний отвір стрижня. Таким чином, зберігається можливість динамізації системи кістка — імплант у вертикальній площині.

Проведеними нами клінічними дослідженнями доведена висока ефективність впровадження нових технологій (диференційований підхід щодо використання фіксуючих гвинтів залежно від типу ППВСК згідно з класифікацією АО).

Обмеження дослідження. Ефективність впровадження диференційованого підходу щодо використання фіксуючих гвинтів залежно від типу ППВСК згідно з класифікацією АО має вірогідне математичне та статистичне обґрунтування, проте існує необхідність продовження біомеханічних і клінічних досліджень для висвітлення оптимальної тактики лікування хворих із переломами шийки та головки стегнової кістки.

Висновки

1. Проведене клінічне дослідження з метою визначення ефективності впровадження диференційованого підходу щодо використання фіксуючих гвинтів залежно від типу ППВСК згідно з класифікацією АО.

2. Визначено статистично вірогідне ($p < 0,05$) збільшення ефективності лікування в групі, у якій використовували диференційований підхід, згідно з бальною класифікацією стану кульшового суглоба за Harris (82,32 та 91,35 бала) через 4,5 і 12 місяців після оперативного втручання.

3. Визначено статистично вірогідне ($p < 0,05$) збільшення показників дослідної групи порівняно з контрольною за компонентами фізичного функціонування (90,08 бала у дослідній та 71,62 бала у контрольній групі), інтенсивності болю (88,13 бала у дослідній та 70,18 бала у контрольній групі), життєвої активності (92,49 бала у дослідній та 70,44 бала у контрольній групі) та соціального функціонування (90,25 бала у дослідній та 69,20 бала у контрольній групі) згідно з класифікацією SF-36 через 4,5 і 12 місяців після оперативного втручання.

4. Таким чином, визначена висока ефективність впровадження нових технологій в лікуванні хворих з переломами проксимального відділу стегнової кістки. Рекомендовано впровадити їх у практику травматологів на теренах України.

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

Інформація про фінансування. Автори заявляють про відсутність фінансової підтримки при отриманні результатів та написанні даної статті.

Внесок авторів. Калашніков А.В. — проведення дослідження, інтерпретація та аналіз отриманих даних; Сабарна Ю.Х.М. — збір даних літературних джерел, оформлення роботи.

Список літератури

1. Brauer CA, Coca-Perraillon M, Cutler DM, Rosen AB. Incidence and mortality of hip fracturesin the United States. JAMA. 2009;32(14):1573-79.

2. Roberts KC, Brox WT, Jevsevar DS, Sevarino K. Management of hip fractures in the elderly. J Am Acad Orthop Surg. 2015 Feb;23(2):131-7. DOI: 10.5435/JAAOS-D-14-00432.

3. Haentjens P, Magaziner J, Colón-Emeric CS. Meta-analysis: excess mortality after hip fracture among older women and men. Ann Intem Med. 2010;152:380. DOI: 10.7326/0003-4819-152-6-201003160-00008.

4. Clinica1 Decision-Making: Is the Patient Fit for Theatre? A Report from the Scottish Hip Fracture Audit. Edinburgh: ISD Scotland Publications. 2008:1-36.

5. Bojan AV, Beimel C. Critical factors in cut-out complication after gamma nail treatment of proximal femoral fracture. BMC Musculoskelet Oisord. 2013;14:1. DOI: 10.1186/1471-2474-14-1.

6. Bjorgul K, Reikeras O. Outcome after treatment of complications of Gamma nailing: a prospective study of 554 trochanteric fractures. Acta Orthop. 2007 Apr;78(2):231-5. DOI: 10.1080/17453670710013735.

7. Liu H, Yuan B, Yu T, Ren G, Zhang Y, Wu Y, Liu Y, Peng C, Wu D Accurate fixation of complicated comminuted femur fracture with customized LCP referencing a life-size 3D-printed model: Annals of Translational Medicine. 2020;8(7):505. DOI: 10.21037/atm.2020.03.115.

8. Калашніков А.В., Сабарна Ю.Х.М. Результати експериментального моделювання напружень на фіксатори при металоостеосинтезі черезвертлюгових переломів. Біль. Суглоби. Хребет. 2024;14(4):33-41. https://doi.org/10.22141/pjs.14.4.2024.442.

9. Дорошенко Л.С. Демографія: Навчальний посібник. Київ: МАУП, 2005:112 с.

10. Harris WH. Traumatic artthritis of the hip after dislocation and acetabular fractures treatment by mold artroplasty. An end result study using a new method of ressult evalution J. Bone Jt Surg. 1969;51-A:737-743.

11. Бабійчук Ю.В. Динаміка первинної інвалідності, фактори ризику її виникнення, показники якості життя хворих бронхіальною астмою: дис. ... канд. мед. наук: 14.01.27: Вінницький національний медичний ун-т ім. М.І. Пирогова. Вінниця, 2002: 143 с.

12. Katnic I, Orlandic MI. Fundamentals of Biomedical Statistics. Stud Health Technol Inform. 2020;274:111-121. DOI: 10.3233/SHTI200671.

13. Choy WS, Kim KJ, Lee SK, Yang DS, Jeung SW, Choi HG, Park HJ. Surgical treatment of pathological fractures occurring at the proximal femur. Yonsei Medical Journal. 2015;56(2):460-465. https://doi.org/10.3349/ymj.2015.56.2.460.

14. Walter N, Szymski D, Kurtz S, Alt V, Lowenberg DW, Lau E, Rupp M. Factors associated with mortality after proximal femoral fracture. Journal of Orthopaedics and Traumatology. 2023;24:31. https://doi.org/10.1186/s10195-023-00715-5.

15. Fischer H, Maleitzke T, Eder C, Ahmad S, Stockle U, Braun KF. Management of proximal femur fractures in the elderly: current concepts and treatment options. Eur J. Med Res. 2021;26:86. https://doi.org/10.1186/s40001-021-00556-0.

16. Ding K, Zhu Y, Zhang Y, Li Y, Wang H, Li J, Chen W, Zhang Q. Proximal femoral bionic nail — a novel internal fixation system for the treatment of femoral neck fractures: a finite element analysis. Front. Bioeng. Biotechnol. 2023;11. https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1297507.

Отримано/Received 26.07.2026
Рецензовано/Revised 05.09.2026
Прийнято до друку/Accepted 14.09.2026

Information about authors

Andrii V. Kalashnikov, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Traumatic Injuries of the Musculoskeletal System and Osteosynthesis Problems, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: orgitoua@gmail.com; phone: +380 (50) 568-59-06; https://orcid.org/0000-0001-8092-3451

Yusef Khalil Muhammed Sabarna, PhD-student, Department of Traumatic Injuries of the Musculoskeletal System and Osteosynthesis Problems, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: info@ito.gov.ua; https://orcid.org/0009-0004-7627-0063

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 authors declare no financial support for obtaining the results and writing this article.
Authors' contribution. A.V. Kalashnikov — conducting research, interpreting and analyzing the data obtained; Y.K.M. Sabarna — collection of data from literary sources, design of the work.

A.V. Kalashnikov, Y.K.M. Sabarna
Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine

The impact of new technologies on the effectiveness of surgical treatment of patients with transtrochanteric femoral fractures

Abstract. ***Background.*** At the previous stage, we conducted analysis of stresses in the bone-implant system during osteosynthesis in patients with types A1, A2, and A3 transtrochanteric fractures. We consider it scientifically interesting to conduct a clinical study to determine the effectiveness of surgical treatment of a group of patients with proximal femoral fracture (PFF) in which the conclusions of a biomechanical study were implemented during surgery, and a group of patients with PFF in which osteosynthesis was performed using the traditional method. The purpose is to evaluate the impact of new technologies for intramedullary nailing on the effectiveness of surgical treatment of patients with transtrochanteric fractures of the femur. ***Materials and methods.*** The study material was the analysis of medical histories, radiographs and clinical examination of 100 patients with transtrochanteric fractures of the femur who underwent surgical treatment at the State Institution "Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU" from 2015 to 2024. To determine the effectiveness of surgical treatment, examination of patients was performed 4.5 and 12 months after the surgical intervention using the Harris Hip Score. The patients' well-being was assessed on the SF-36 questionnaire. The data were statistically processed. ***Results.*** Our clinical studies have proven the high effectiveness of implementing new technologies (differentiated approach to the use of fixing screws depending on the type of PFF according to the AO classification). ***Conclusions.*** A clinical study was conducted to evaluate the effectiveness of a differentiated approach to the use of fixation screws depending on the type of PFF according to the AO classification. There was a statistically significant ($p < 0.05$) increase in the effectiveness of treatment in the group with a differential approach on to the Harris Hip Score (82.32 and 91.35 points) 4.5 and 12 months after surgery. A statistically significant ($p < 0.05$) increase in the well-being of patients from the experimental group was found compared to the controls on the components of physical functioning (90.08 and 71.62 points, respectively), pain intensity (88.13 and 70.18 points), life activity (92.49 and 70.44 points) and social functioning (90.25 and 69.20 points) according to the SF-36 classification 4.5 and 12 months after surgery. Thus, the high effectiveness of the implementation of new technologies in the treatment of patients with proximal femoral fractures has been determined and it is recommended to introduce them into the practice of traumatologists in Ukraine.

Keywords: fractures; osteosynthesis; bone; treatment; technologies; effectiveness of treatment

DOI: https://doi.org/10.22141/1608-1706.5.27.2026.1113

Філіпенко В.А., Бондаренко С.Є., Олінкевич Є.В., Марущак О.П., Карпінський М.Ю., Яресько О.В.
ДУ «Інститут патології хребта та суглобів ім. проф. М.І. Ситенка НАМН України», м. Харків, Україна

Порівняльний аналіз напружено-деформованого стану моделі стегнової кістки з ревізійною ніжкою після розширеної проксимальної остеотомії залежно від довжини ніжки

Резюме. ***Актуальність.*** *Видалення стабільного стегнового компонента ендопротеза є однією з найскладніших проблем ревізійного ендопротезування кульшового суглоба. Розширена проксимальна остеотомія забезпечує адекватний доступ до каналу стегнової кістки, проте після її виконання постає питання вибору довжини ревізійної ніжки, яка повинна перекрити нижній край остеотомії, не створюючи надмірної концентрації напружень у кістці та фіксуючих елементах.* ***Мета:*** *провести порівняльний аналіз величин напружень у моделі стегнової кістки з ревізійною ніжкою після розширеної проксимальної остеотомії залежно від довжини ніжки.* ***Матеріали та методи.*** *Розроблена базова скінченно-елементна модель стегнової кістки з ревізійним ендопротезом, встановленим після розширеної проксимальної остеотомії. Виготовлено моделі трьох варіантів довжини ніжки ендопротеза: на 1, 3 та 5 см нижче від нижнього краю отвору. Кістковий клапоть фіксували серкляжним дротом діаметром 1,5 мм на двох рівнях по 2 витки. Модель навантажували силою 1100 Н, прикладеною до голівки стегнової кістки, та силою 468 Н з боку абдукторів стегна.* ***Результати.*** *Довжина ніжки ендопротеза практично не впливає на розподіл напружень у кісткових елементах моделей: на дистальному кінці діафіза та в кістковому клапті відмінності між моделями мінімальні. Найбільш значущі зміни спостерігаються в зоні нижнього краю отвору, де зі збільшенням довжини ніжки з 1 до 5 см рівень напружень знижується з 18,9 до 13,0 МПа. Також ніжка, що перекриває нижній край отвору на 5 см, забезпечує найнижчий рівень напружень у шийці ендопротеза (148,9 МПа) та серкляжному дроті (443,9 МПа), проте напруження на її дистальному кінці зростають у 15 разів — до 217,7 МПа, що, однак, у 2,5 раза нижче за межу міцності хірургічної сталі.* ***Висновки.*** *Перекриття нижньої зони остеотомії ревізійною ніжкою на 5 см після видалення стабільного стегнового компонента із застосуванням ЕТО знижує навантаження на серкляжний дріт і зменшує концентрацію напружень у зоні нижнього краю отвору. Такий вибір довжини ніжки забезпечує стабільність компонентів та має переваги перед використанням коротших ревізійних ніжок, особливо у складних випадках ревізійного ендопротезування.*

Ключові слова: *кульшовий суглоб; ревізійне ендопротезування; розширена проксимальна остеотомія; довжина ревізійної ніжки*

Вступ

Ревізійне ендопротезування кульшового суглоба є одним із найскладніших втручань в ортопедії, що вимагає ретельного планування та вирішення низки технічних проблем, пов'язаних зі станом кісткової маси, вибором імплантату і методом фіксації.

Однією з проблем при ревізійному ендопротезуванні кульшового суглоба є видалення стабільної ніжки, яка зазвичай добре фіксована в кістці. Коли менш травматичні методи видалення стабільного стегнового компонента ендопротеза не спрацьовують, хірург вимушений переходити до більш травматичного методу, що забезпечує адекватний доступ до каналу стегнової кістки й полегшує видалення первинного компонента, яким є розширена проксимальна остеотомія стегнової кістки (Extended Trochanteric Osteotomy, ETO) [1]. За

© «Травма» / «Trauma» («Travma»), 2026
© Видавець Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2026

Для кореспонденції: Карпінський Михайло Юрійович, старший науковий співробітник, лабораторія біомеханіки, ДУ «Інститут патології хребта та суглобів імені професора М.І. Ситенка НАМН України», вул. Григорія Сковороди, 80, м. Харків, 61024, Україна; e-mail: korab.karpinsky9@gmail.com; тел.: +380 (67) 571-48-63
For correspondence: Mykhailo Yu. Karpinsky, Senior Research Fellow, Biomechanics Laboratory, Sytenko Institute of Spine and Joint Pathology of NAMSU, Hryhoriya Skovorody st., 80, Kharkiv, 61024, Ukraine; e-mail: korab.karpinsky9@gmail.com; phone: +380 (67) 571-48-63
Full list of authors information is available at the end of the article.

даними серії досліджень, рівень консолідації кісткового клаптя після ЕТО досягає 98 %, а 10-річна виживаність ревізійних ендопротезів без асептичного розхитування — 97 % [2].

Але перед хірургом постають два важливих питання: наскільки ніжка повинна перекривати нижній край остеотомії та чим фіксувати остеотомований клапоть, щоб забезпечити стабільність і довговічність конструкції та уникнути ускладнень.

Питання фіксації кісткового клаптя серкляжним дротом після ЕТО досліджене у нашій попередній роботі, у якій ми виявили, що оптимальною є дворівнева фіксація, яка дозволяє удвічі знизити рівень напружень у дроті порівняно з однорівневою фіксацією, уникаючи тим самим розриву дроту при осьовому навантаженні кінцівки [3].

Водночас фіксація кісткового клаптя серкляжним дротом залишається джерелом механічної напруженості, оскільки дріт може зазнавати навантажень, близьких до межі міцності хірургічної сталі, особливо при повному осьовому навантаженні в ранньому післяопераційному періоді [3].

Після виконання ЕТО та встановлення ревізійного ендопротеза система «кістка — ендопротез — серкляжний дріт» функціонує як єдиний комплекс, характеристики якого визначаються низкою параметрів, серед яких довжина ніжки ендопротеза суттєво впливає на розподіл напружень як у кісткових структурах, так і в металевих елементах конструкції. Результати скінченно-елементного аналізу системи «кістка — ендопротез» свідчать про те, що збільшення довжини ніжки, як правило, підвищує рівень напружень у самій ніжці, але знижує навантаження на кісткові тканини в проксимальних відділах [4, 5].

У разі конверсійного ендопротезування після раніше виконаного остеосинтезу оптимальна довжина ніжки, яка забезпечує ефективне перекриття зони дефекту та знижує концентрацію напружень, передбачає її дистальне розташування щонайменше на 40 мм нижче зони структурних змін кістки [6, 7].

Однак залишається відкритим питання про те, яким чином довжина ніжки ревізійного ендопротеза, встановленого після ЕТО, впливає на характер розподілу напружень у системі «кістка — ендопротез — дріт» залежно від довжини ніжки. Вибір довжини ревізійного стегнового компонента є важливим хірургічним рішенням: занадто коротка ніжка може не забезпечити достатньої дистальної фіксації в каналі, тоді як надмірно довга — концентрувати напруження на своєму дистальному кінці, підвищуючи ризик перипротезного перелому [8, 9].

Ми припускаємо, що неоптимальний вибір довжини ревізійної ніжки при ендопротезуванні кульшового суглоба після ЕТО підвищить ризик післяопераційних ускладнень, та вважаємо це питання важливим з практичної точки зору, оскільки це дозволить сформулювати доказові рекомендації щодо вибору ніжки ревізійного ендопротеза в клінічних ситуаціях, пов'язаних з виконанням ЕТО.

Мета: провести порівняльний аналіз величин напружень у моделі стегнової кістки з ревізійною ніжкою після розширеної проксимальної остеотомії залежно від довжини ніжки.

Матеріали та методи

У лабораторії біомеханіки була розроблена базова скінченно-елементна модель стегнової кістки з ревізійним ендопротезом, встановленим після розширеної проксимальної остеотомії для видалення первинного ендопротеза. Модель містила такі елементи: стегнову кістку, ревізійний ендопротез, кістковий клапоть. Між кістковим клаптем та стегновою кісткою моделювали прошарок міжуламкового регенерату. Базова модель наведена на рис. 1.

На базовій моделі моделювали три варіанти довжини ніжки ендопротеза: на 1, 3 та 5 см нижче від нижнього краю отвору (рис. 2). Кістковий клапоть, відокремлений при резекції, фіксували на двох рівнях, на кожному з яких накладали по 2 витки серекляжного дроту діаметром 1,5 мм.

Механічні властивості біологічних тканин (кортикальна та губчаста кістка, хрящ) для математичного моделювання обрано за даними [10–17]. Матеріал елементів ендопротезу — титан. Матеріал голівки ендопротеза — хірургічна сталь. Механічні характеристики штучних матеріалів обирали за даними технічної літератури [18–20]. Механічні характеристики матеріалів наведені в табл. 1.

Модель навантажували вагою тіла при одноопорному стоянні, для чого до голівки стегнової кістки прикладали розподілену силу величиною 1100 Н, а до великого вертлюга — силу дії абдукторів стегна величиною 468 Н [21]. Опорна поверхня стопи моделі мала жорстке закріплення. Схема навантаження моделей наведена на рис. 3.

Для порівняння величин напружень у моделях було обрано контрольні точки, в яких виконували заміри.

Таблиця 1. Механічні характеристики матеріалів, що використовували при моделюванні

Матеріал	Модуль Юнга (E), МПа	Коефіцієнт Пуассона, *ν*	Межа міцності, МПа
Кортикальна кістка	18 350	0,29	150
Губчаста кістка	330	0,30	70
Міжуламковий регенерат	1	0,45	–
Хірургічна сталь AISI 316L	200 000	0,30	505
Титан	40 000	0,36	1100

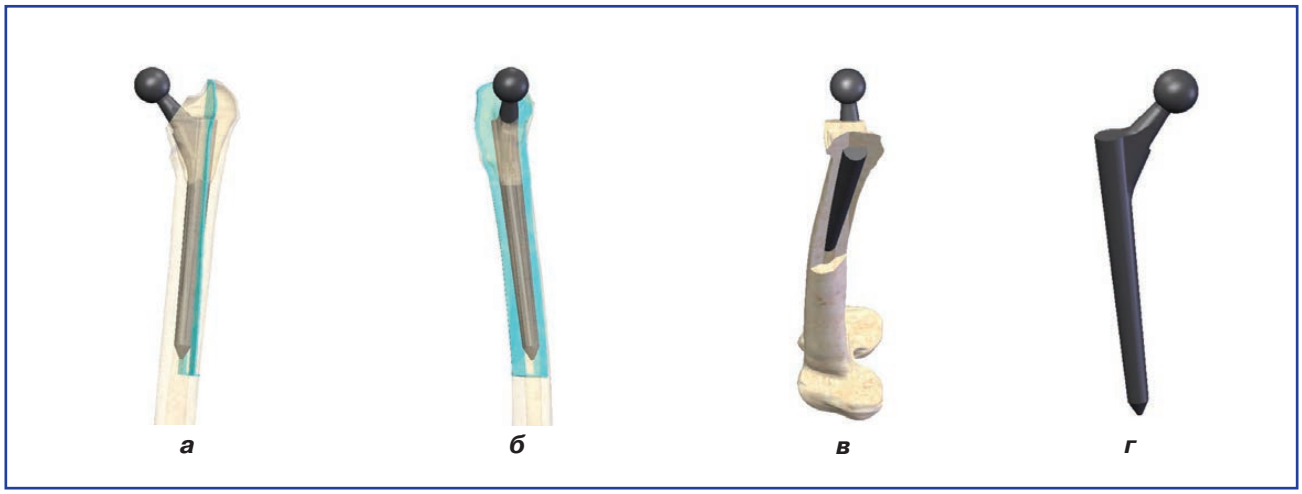


Рисунок 1. Модель стегнової кістки з ревізійним ендопротезом після розширеної проксимальної остеотомії: а — вигляд спереду; б — вигляд з медіального боку; в — вигляд з латерального боку без кісткового клаптя; г — ендопротез

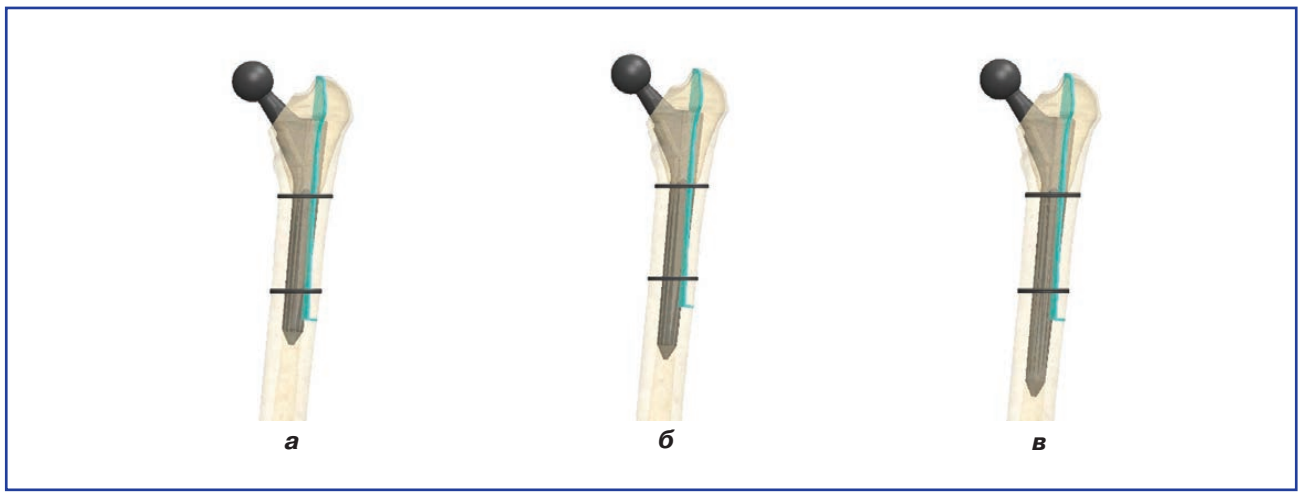
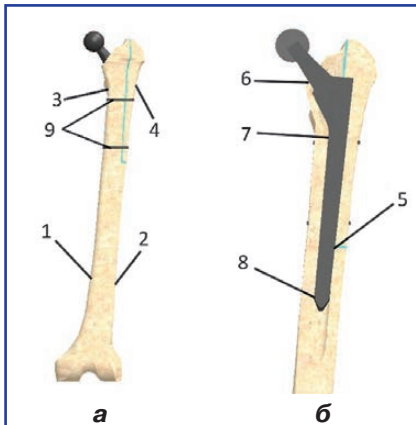


Рисунок 2. Варіанти моделей з різною довжиною ніжки ендопротеза: а — на 1 см нижче від нижнього краю отвору; б — на 3 см нижче від нижнього краю отвору; в — на 5 см нижче від нижнього краю отвору



Рисунок 3. Схема навантаження моделі



1 — дистальний кінець, медіальний бік
2 — дистальний кінець, латеральний бік
3 — проксимальний кінець, медіальний бік
4 — кістковий клапоть
5 — нижній край отвору
6 — шийка ендопротеза
7 — проксимальний кінець ніжки
8 — дистальний кінець ніжки
9 — дріт

Рисунок 4. Схема розташування контрольних точок кісткової моделі: а — зовні; б — всередині

Схема розташування контрольних точок наведена на рис. 4.

Реєстрували максимальний рівень напружень у кісткових елементах та на металевих конструкціях. Побудову моделі здійснювали в програмі SolidWorks [22]. Розрахунки напружено-деформованого стану моделей виконували з використанням програми ANSYS [23].

Результати

На першому етапі роботи визначали напружено-деформований стан моделі стегнової кістки з ревізійним ендопротезом після розширеної проксимальної остеотомії з довжиною ніжки, яка опускається на 1 см нижче від нижнього краю отвору. Розподіл напружень у моделі наведено на рис. 5.

Результати моделювання показали, що при розташуванні ніжки ендопротеза на 1 см нижче від нижнього краю отвору максимальні величини напружень у стегновій кістці визначаються в дистальній частині її діафіза, а саме 48,3 МПа з медіального боку та 43,5 МПа з латерального. М'який прошарок у вигляді міжуламкового регенерату виконує демпфіруючу функцію між стегновою кісткою і кістковим клаптем, відокремленим при резекції, наслідком чого є мінімальний рівень напружень 7,7 МПа у кістковому клапті, а по його нижньому краю напруження в стегновій кістці в 2,5 раза вище — 18,9 МПа. Напруження на проксимальному кінці кістки не перевищують позначки 13,8 МПа.

В ендопротезі максимальний рівень напружень 178,3 МПа спостерігається в проксимальній частині ніжки і 170,9 МПа — у шийці. На дистальному кінці ніжки рівень напруження дуже низький і не перевищує позначки 16,8 МПа. Найбільше напруження у моделі має серкляжний дріт — 448,4 МПа, що дуже близько до межі міцності хірургічної сталі — 505 МПа. Розподіл напружень у металевих елементах моделі наведено на рис. 6.

Проведене дослідження дозволило визначити, що в моделі з ендопротезом, ніжка якого опускається на 3 см нижче від нижнього краю отвору, змін рівня напружень на дистальному кінці діафіза та в кістковому клапті не відбувається. Невеличкі зміни величин напружень визначено на проксимальному кінці діафіза та по нижньому краю отвору, де вони знизилися до позначок 13,6 та 17,0 МПа відповідно.

Цікаві зміни порівняно з моделлю, у якій ніжка опускалася на 1 см нижче від нижнього краю отвору, спостерігали в самому ендопротезі. Так, у його шийці визначали зниження рівня напружень до позначки 149,7 МПа, при цьому на проксимальній частині ніжки напруження зросли до 183,1 МПа. Також спостерігали невеличке зростання величини напружень до 17,2 МПа на дистальному кінці ніжки. Напруження в серкляжному дроті теж незначно збільшилися до 451,5 МПа. Напружено-деформований стан металевих елементів моделі наведено на рис. 8.

Розглянемо розподіл напружень у моделі з ніжкою, яка опускається на 5 см нижче від нижнього краю отвору. Напружено-деформований стан відповідної моделі наведено на рис. 9.

Проведене дослідження дозволило визначити, що вибір ендопротеза, ніжка якого розташовується на 5 см нижче за нижній край отвору, призводить до незначного зниження рівня напружень у всіх ділянках стегнової кістки. Найбільш помітні зміни відбуваються на нижньому краї отвору, де максимальна величина напруження знижується до позначки 13,0 МПа.

В ендопротезі порівняно з попередніми моделями визначено найнижчий рівень напружень 148,9 МПа в шийці та 167,6 МПа в проксимальному відділі ніжки. Однак у 15 разів підвищився рівень напруження на дистальному кінці ніжки — до 217,7 МПа. Цей показник дуже далекий від межі міцності хірургічної сталі, до якої наближається рівень напруження в серкляжному дроті — 443,9 МПа, але він нижчий за показники у всіх попередніх моделях. Напружено-деформований стан металевих елементів моделі наведено на рис. 10.

Повні дані про величини напружень у контрольних точках моделей стегнової кістки з ревізійним ендопротезом після розширеної проксимальної остеотомії при різній довжині ніжки наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Величини напружень у контрольних точках моделей стегнової кістки з ревізійним ендопротезом після розширеної проксимальної остеотомії залежно від довжини ніжки

Контрольні точки	Зона		Напруження, МПа		
			1 см	3 см	5 см
1	Кістка	Дистальний кінець, медіальний бік	48,3	48,3	47,5
2		Дистальний кінець, латеральний бік	43,5	43,5	43,0
3		Проксимальний кінець, медіальний бік	13,8	13,6	13,4
4		Кістковий клапоть	7,7	7,7	7,6
5		Нижній край отвору	18,9	17,0	13,0
6	Ендопротез	Шийка ендопротеза	170,9	149,7	148,9
7		Проксимальний кінець ніжки	178,3	183,1	167,6
8		Дистальний кінець ніжки	16,8	17,2	217,7
9		Дріт	448,4	451,5	443,9

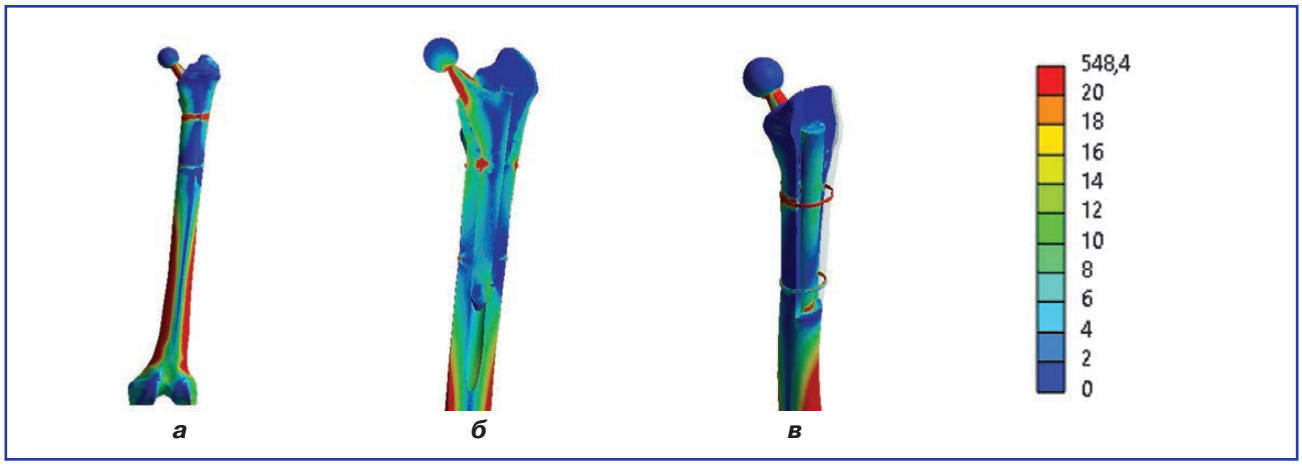


Рисунок 5. Розподіл напружень у моделі з довжиною ніжки на 1 см нижче від нижнього краю отвору: а — вигляд у фронтальній площині; б — вигляд в перетині; в — вигляд без кісткового клаптя

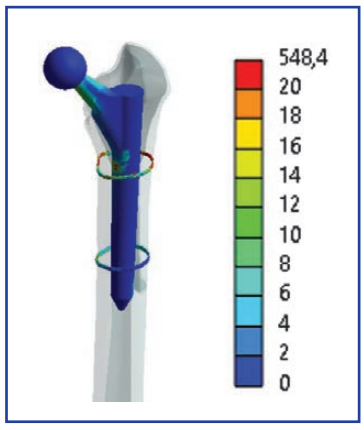


Рисунок 6. Розподіл напружень в ендопротезі з ніжкою, яка опускається на 1 см нижче від нижнього краю отвору

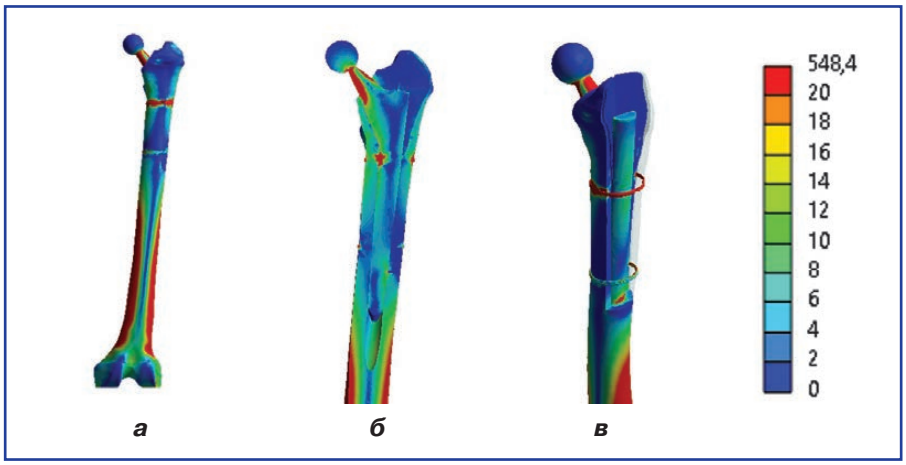


Рисунок 7. Розподіл напружень у моделі з ніжкою, яка опускається на 3 см нижче від нижнього краю отвору: а — вигляд у фронтальній площині; б — вигляд в перетині; в — вигляд без кісткового клаптя

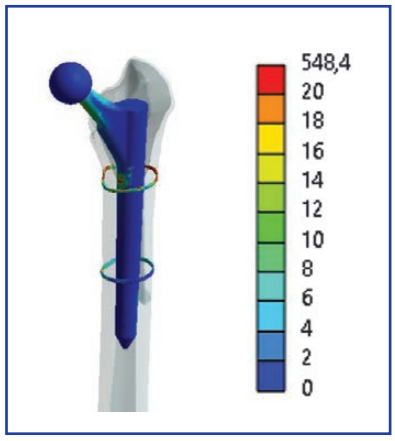


Рисунок 8. Розподіл напружень в ендопротезі з ніжкою, яка опускається на 3 см нижче від нижнього краю отвору

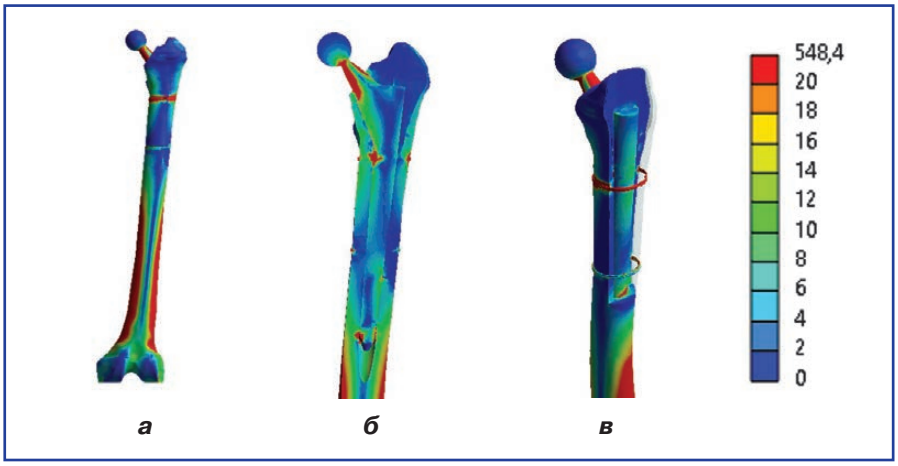


Рисунок 9. Розподіл напружень у моделі з ніжкою, яка опускається на 5 см нижче від нижнього краю отвору: а — вигляд у фронтальній площині; б — вигляд у перетині; в — вигляд без кісткового клаптя

Наочно порівняти зміни рівня напружень у контрольних точках на кісткових елементах моделей залежно від довжини ніжки допоможе діаграма, яка наведена на рис. 11.

На наведеній діаграмі видно, що довжина ніжки ендопротеза майже не впливає на розподіл напружень у кісткових елементах системи «кістка — ендопротез — дріт», однак найбільш помітні зміни відбуваються на нижньому краї отвору, де найнижчий рівень напружень визначено в моделі з ендопротезом, ніжка якого опускається на 5 см нижче від цього краю.

Діаграма, яка наведена на рис. 12, відображає зміни величини напружень у металевих елементах моделей.

Як видно на діаграмі, збільшення довжини ніжки ендопротеза веде до зниження рівня напружень у шийці ендопротеза. Ніжка, яка опускається на 3 см

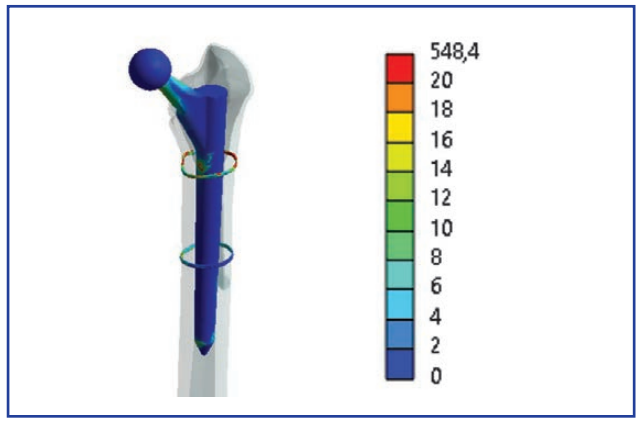


Рисунок 10. Розподіл напружень в ендопротезі, ніжка якого розташована на 5 см нижче від нижнього краю отвору

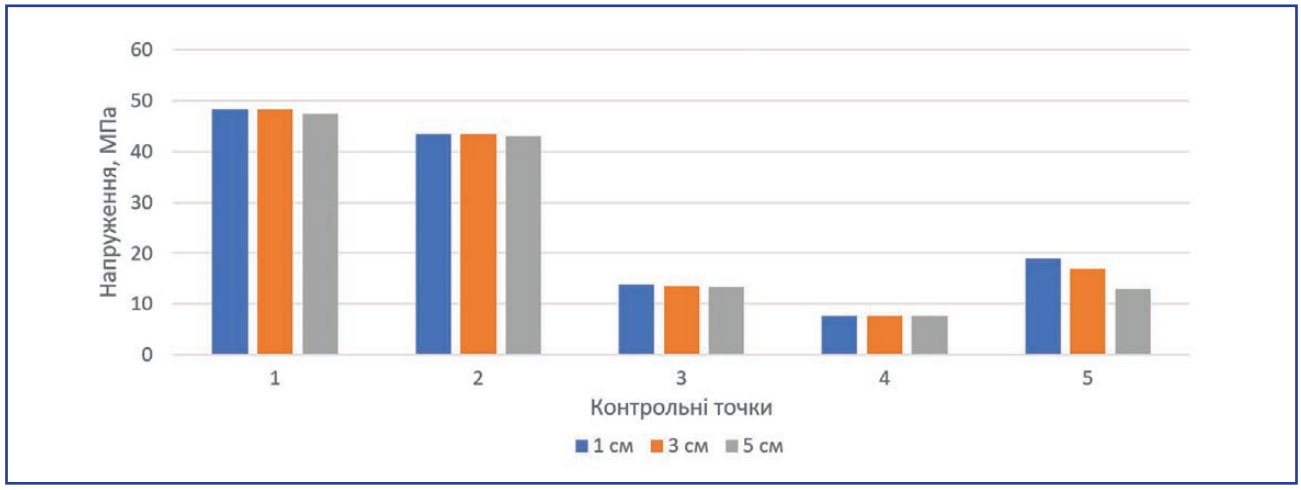


Рисунок 11. Діаграма величини напружень у кісткових елементах моделей стегнової кістки з ревізійним ендопротезом після розширеної проксимальної остеотомії при різній довжині ніжки ендопротеза

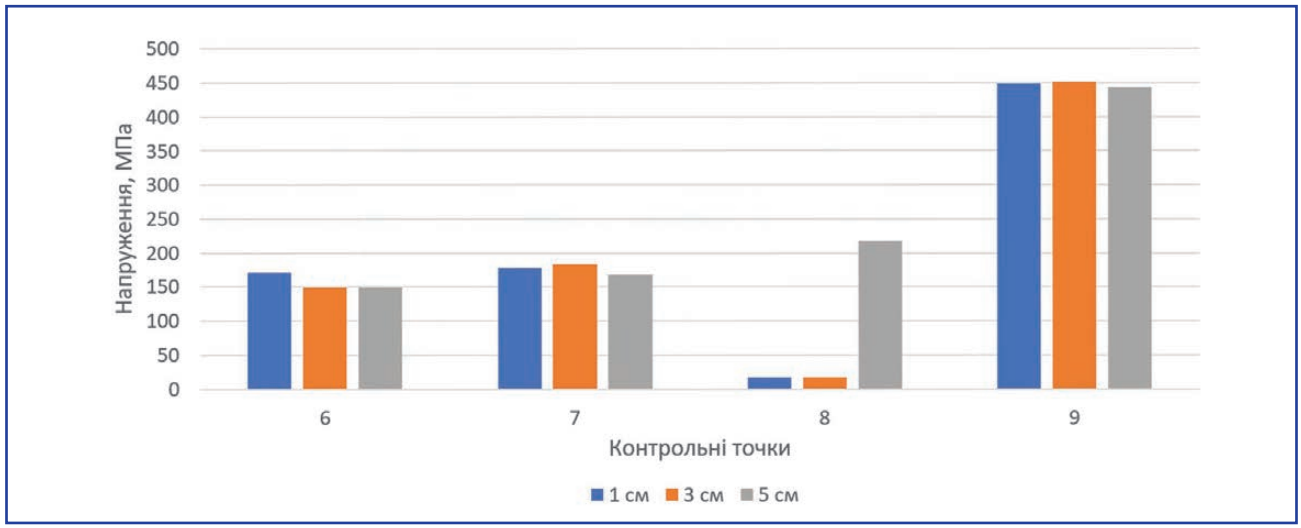


Рисунок 12. Діаграма величини напружень у металевих елементах моделей стегнової кістки з ревізійним ендопротезом після розширеної проксимальної остеотомії при різній довжині ніжки ендопротеза

нижче від нижнього краю отвору, незначно підвищує рівень напружень у її проксимальній та дистальній частинах, а також в серкляжному дроті, який фіксує кістковий клапоть. Ендопротез з ніжкою, яка опускається на 5 см нижче від нижнього краю отвору, забезпечує найнижчий рівень напружень як в елементах ендопротеза, так і в серкляжному дроті. Однак значно підвищується (у 15 разів) рівень напружень на дистальному кінці ніжки.

Обговорення

Підбір довжини ніжки після ревізійного ендопротезування із застосуванням ЕТО є важливим етапом ревізійного ендопротезування кульшового суглоба, особливо у випадках інфекції або складного демонтажу стабільних стегнових компонентів. Наше дослідження підтверджує значущість цього етапу як з погляду розуміння біомеханічних процесів, що відбуваються після ревізійного ендопротезування з ЕТО, так і з огляду на зниження рівня ускладнень, що дозволяє сформулювати практичні рекомендації щодо вибору довжини ніжки ревізійного ендопротеза.

Наявні літературні джерела свідчать, що довжина ніжки ендопротеза практично не впливає на розподіл напружень у стегновій кістці. Наше дослідження показує, що величини напружень на дистальному кінці діафіза залишаються незмінними у всіх трьох моделях (48,3 МПа — при ніжці, яка опускається на 1 та 3 см нижче від нижнього краю отвору, 47,5 МПа — при ніжці, яка опускається на 5 см нижче від нижнього краю отвору з медіального боку), а в кістковому клапті вони стабільно перебувають у діапазоні 7,6–7,7 МПа. Це узгоджується з даними досліджень Crowninshield та співавт. (1980), які показали, що збільшення довжини ніжки підвищує напруження у самій ніжці, але не призводить до суттєвих змін у кортикальній кістці [4]. Аналогічно Huiskes (1990) продемонстрував, що характер розподілу напружень у кістці більше визначається типом фіксації ніжки, ніж її довжиною [5].

Проте найбільш клінічно значущі, на нашу думку, зміни зафіксовано в зоні нижнього краю отвору — найбільш ослабленій ділянці стегнової кістки: зі збільшенням довжини ніжки від 1 до 5 см рівень напружень у цій ділянці знижується з 18,9 до 17,0 МПа, а далі — до 13,0 МПа. Це відображає перерозподіл навантаження від проксимальних відділів стегнової кістки на дистальний кінець ніжки зі збільшенням її довжини, що узгоджується з результатами досліджень Shimasaki та співавт. (2024, 2025), які встановили, що ніжка з достатньою довжиною перекриття (bridging length) знижує концентрацію напружень у зонах структурних змін кістки [6, 7].

При цьому можна не звертати значної уваги на різке підвищення рівня напружень у 15 разів на дистальному кінці ніжки. Оскільки навіть при довжині ніжки, що перекриває нижній край отвору на 5 см, напруження на її дистальному кінці становить 217,7 МПа, показник напруження залишається у 2,5 раза нижчим за межу міцності хірургічної сталі (505 МПа), і руйнування ендопротеза при цьому малоймовірне. Подібний феномен «дистального перевантаження» при довгих ніжках узгоджується з дослідженням Huang та співавт. (2019), які при порівнянні монолітних і модульних конічних ніжок встановили, що довша й тонша ніжка формує вторинні зони концентрації напружень у дистальному відділі [8].

Результати проведеного моделювання показали, що після ревізійного ендопротезування найслабшою ланкою в системі «кістка — ендопротез — дріт» є саме серкляжний дріт, який фіксує кістковий клапоть, відокремлений при резекції і видаленні первинного ендопротеза. Незалежно від довжини ніжки ендопротеза напруження в дроті залишаються на близькому до межі міцності хірургічної сталі рівні, що може стати причиною його розриву і втрати стабільності ендопротеза. Ця закономірність повністю відповідає даним нашого попереднього дослідження (Bondarenko et al., 2025), у якому встановлено, що при 100% осьовому навантаженні оперованої кінцівки серкляжний дріт є найбільш вразливою ланкою системи незалежно від конфігурації фіксації [3]. Але оскільки розрахунки були виконані для 100% навантаження оперованої кінцівки при одноопорному стоянні, є два варіанти вирішення цієї проблеми. По-перше, треба обмежити навантаження на кінцівку в ранній післяопераційний період, поки міжуламковий регенерат набуває міцності. По-друге, можна збільшити кількість витків дроту. Оскільки величина напружень обернено пропорційна площі перетину зразка, збільшення кількості витків дроту до чотирьох призведе до зниження рівня напружень у ньому вдвічі.

Слід визнати певні обмеження дослідження. Зокрема, математична модель відтворювала умови статичного одноопорного стояння при повному осьовому навантаженні, тоді як реальний ранній постопераційний період передбачає дозоване навантаження на кінцівку. Крім того, модель не враховувала процеси кісткової перебудови та ремоделювання, що розвиваються з часом у зоні остеотомії та поступово беруть на себе частину навантаження, знімаючи його з серкляжного дроту.

Однак, з урахуванням сукупності літературних даних, власного клінічного досвіду та результатів проведеного дослідження, незважаючи на зазначені обмеження, можна зробити практично важливий висновок: перекриття нижньої зони остеотомії ревізійною ніжкою на 5 см після видалення стабільного стегнового компонента із застосуванням ЕТО знижує навантаження на серкляжний дріт і зменшує концентрацію напружень у зоні нижнього краю отвору, що забезпечує стабільність компонентів, знижує ризик ускладнень і має переваги перед використанням коротких ревізійних ніжок після розширеної проксимальної остеотомії, особливо у складних випадках ревізійного ендопротезування.

Висновки

Довжина ревізійної ніжки після виконання ЕТО майже не впливає на розподіл напружень у стегновій кістці, адже відмінності між моделями з ніжкою, що опускається на 1, 3 та 5 см на дистальному та проксимальному кінцях діафіза, не перевищують 1–2 %. Але слід відмітити, що в зоні нижнього краю отвору збільшення довжини ніжки з 1 до 5 см знижує рівень напружень на 31 % (з 18,9 до 13,0 МПа). Це зменшує ризик перелому в цій найбільш ослабленій ділянці кістки після травматичної розширеної проксимальної остеотомії.

Мінімальний рівень напружень у металевих елементах моделей спостерігається у шийці ендопротеза та проксимальному відділі ніжки, а також у серкляжному дроті при умові використання ніжки, яка перекриває нижній край отвору на 5 см. При цьому відмічається зростання напружень на дистальному кінці ніжки до 217,7 МПа, однак дані показники є у 2,5 раза нижчими за межу міцності хірургічної сталі та не створюють ризику механічного руйнування імплантату.

Слід відмітити, що ніжка, яка опускається лише на 3 см нижче від нижнього краю отвору, є найменш сприятливим варіантом, бо, на відміну від ніжки, яка перекриває нижній край отвору лише на 1 см, вона не дає зниження напружень на проксимальному кінці ніжки та в серкляжному дроті, де реєструються найвищі показники серед усіх досліджених моделей.

Незалежно від довжини ніжки серкляжний дріт залишається найбільш уразливим елементом системи «кістка — ендопротез — дріт» з рівнем напружень від 443,9 до 451,5 МПа, що наближається до межі міцності хірургічної сталі (505 МПа). Це доводить необхідність обмеження осьового навантаження на оперовану кінцівку в ранньому післяопераційному періоді або збільшення кількості витків дроту незалежно від обраної довжини ніжки.

Отримані нами дані свідчать про те, що з біомеханічної точки зору при ревізійному ендопротезуванні після ЕТО доцільно обирати ніжку, яка перекриває нижній край остеотомії щонайменше на 5 см, бо такий вибір знижує концентрацію напружень у найбільш вразливій зоні кістки та в серкляжному дроті, не створюючи при цьому ризику для механічної цілісності системи «кістка — ендопротез — дріт».

Дослідження схвалено локальним комітетом з біоетики відповідно до чинних норм (протокол № 267 від 10.08.2026 р.).

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

Список літератури

1. Köksal, A., Öner, A., Çimen, O., Aycan, O.E., Akgün, H., et al. (2020). Femoral stem fractures after primary and revision hip replacements: A single-center experience. Joint Diseases and Related Surgery, 31(3), 557-563. https://doi.org/10.5606/ehc.2020.76162.

2. Abdel, M.P., Wyles, C.C., Viste, A., Perry, K.I., Trousdale, R.T., Berry, D.J. (2021). Extended trochanteric osteotomy in revision total hip arthroplasty: Contemporary outcomes of 612 hips. The Journal of Bone and Joint Surg Am, 103(2), 162-173. doi: 10.2106/JBJS.20.00215.

3. Bondarenko, S.Y., Filipenko, V., Olinkevych, Y., Marushchak, O., Karpinsky, M., Yaresko, O. (2025). Study of the stress-strain state of a femoral model with a revision stem after extended proximal osteotomy depending on the options for fixing the bone flap with a cerclage wire. Trauma, 26(3), 180-188. https://doi.org/10.22141/1608-1706.3.26.2025.1018.

4. Crowninshield, R.D., Brand, R.A., Johnston, R.C., & Milroy, J.C. (1980). An analysis of femoral component stem design in total hip arthroplasty. The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume, 62(1), 68-78. https://doi.org/10.2106/00004623-198062010-00011.

5. Huiskes, R. (1990). The various stress patterns of press-fit, ingrown, and cemented femoral stems. Clinical Orthopaedics and Related Research, 261, 27-38. https://doi.org/10.1097/00003086-199012000-00006.

6. Shimasaki, K., Nishino, T., Yoshizawa, T., Watanabe, R., Hirose, F., Yasunaga, S., et al. (2024). Stress analysis in conversion total hip arthroplasty: A finite element analysis on stem length and distal screw hole. Journal of Clinical Medicine, 14(1), Article 106. https://doi.org/10.3390/jcm14010106.

7. Shimasaki, K., Nishino, T., Yoshizawa, T., Watanabe, R., Hirose, F., Yasunaga, S., et al. (2025). Optimizing stem length in conversion total hip arthroplasty: An expanded finite element analysis. Journal of Clinical Medicine, 14(4), Article 1141. https://doi.org/10.3390/jcm14041141.

8. Huang, Y., Shao, H., Zhou, Y., Gu, J., Tang, H., Yang, D. (2019). Femoral bone remodeling in revision total hip arthroplasty with use of modular compared with monoblock tapered fluted titanium stems: The role of stem length and stiffness. The Journal of Bone and Joint Surgery, 101, 531-538. https://doi.org/10.2106/JBJS.18.00442.

9. Levadnyi, I., Awrejcewicz, J., Goethel, M., Loskutov, A. (2017). Influence of the fixation region of a press-fit hip endoprosthesis on the stress-strain state of the "bone-implant" system. Computers in Biology and Medicine, 84, 195-204. https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2017.03.030.

10. Cowin, S.C. (Ed.). (2001). Bone mechanics handbook. CRC Press.

11. Boccaccio, A., & Pappalettere, C. (2011). Mechanobiology of fracture healing: Basic principles and applications in orthodontics and orthopaedics. In V. Klika (Ed.), Theoretical biomechanics.

12. Бондаренко С., Денисенко С., Карпінський М., Яресько О. (2021). Дослідження впливу чашок ендопротезів кульшових суглобів із пористого титану на розподіл напружень у кістковій тканині (математичне моделювання). Травма, 22(3), 28-37. https://doi.org/10.22141/1608-1706.3.22.2021.236320.

13. Berezovskii, V.A., Kolotilov, N.N. (1990). Biophysical characteristics of human tissues: A handbook. Kyiv: Naukova Dumka.

14. Хвисюк О.М., Пустовойт К.Б., Пустовойт Б.А., Карпінський М.Ю., Карпінська О.Д. (2012). Математичне моделювання умов навантаження колінного суглоба у фронтальній площині. Проблеми безперервної медичної освіти та науки, (1), 51-56.

15. Karpinsky, M.Yu., Stroiev, M.Yu., Berezka, M.I., Hryhoruk, V.V., Yaresko, O.V. (2022). The effectiveness of resistance to torsional loads of various options for osteosynthesis of bone fragments of the tibia for fractures in the upper third of the diaphysis (mathematical modeling). Orthopaedics, Traumatology and Prosthetics, (3-4), 45-51. https://doi.org/10.15674/0030-598720223-445-51.

16. Вирва О.Є., Головіна Я.О., Малик Р.В., Карпінський М.Ю., Яресько О.В. (2021). Порівняльний аналіз даних напружено-деформованого стану математичних моделей індивідуального ендопротеза й алокомпозитного ендопротеза у разі заміщення дефектів довгих кісток. Травма, 22(4), 37-45. https://doi.org/10.22141/1608-1706.4.22.2021.239708.

17. Вирва О.Є., Головіна Я.О., Карпінський М.Ю., Яресько О.В., Малик Р.В. (2020). Дослідження напружено-деформованого стану в системі «імплантат — кістка» на моделі алокомпозитного ендопротеза проксимального відділу стегнової кістки. Травма, 21(1), 38-48. doi: 10.22141/1608-1706.1.21.2020.197797.

18. Niinomi M. (2008). Mechanical biocompatibilities of titanium alloys for biomedical applications. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 1(1), 30-42. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2007.07.001.

19. Regis, M., Marin, E., Fedrizzi, L., Pressacco, M. (2015). Additive manufacturing of trabecular titanium orthopedic implants. MRS Bulletin, 40, 137-144. https://doi.org/10.1557/mrs.2015.1.

20. Buryanov, O.A., Kvasha, V.P., Chekushyn, D.A., Zadnichenko, M.O., Karpinsky, M.Yu., Yaresko, O.V. (2024). Analysis of stress distribution in the acromioclavicular joint in case of damage to the conoid ligament and different methods of fixation. Вісник проблем біології і медицини, 3(174), 243-256. https://doi.org/10.29254/2077-4214-2024-3-174-243-256.

21. Kim, J., Chun, B.J., Kim, J.J. (2023). Quantitative load dependency analysis of local trabecular bone microstructure to understand the spatial characteristics in the synthetic proximal femur. Biology, 12(2), Article 170. https://doi.org/10.3390/biology12020170.

22. Kurowski, P. (2019). Engineering analysis with SolidWorks Simulation 2019 Mission: SDC Publications; 606 p.

23. Carreiras, A., Fonseca, E., Martins, D., Couto, R. (2020). The axisymmetric computational study of a femoral component to analysis the effect of titanium alloy and diameter variation. JCAMEH, 51(2), 403-410. https://doi.org/10.22059/jcamech.2020.306191.532.

Отримано/Received 10.07.2026
Рецензовано/Revised 14.08.2026
Прийнято до друку/Accepted 28.08.2026

Information about authors

Volodymyr A. Filipenko, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Joint Pathology, Sytenko Institute of Spine and Joint Pathology of NAMSU, Kharkiv, Ukraine; e-mail: filippenko1957@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-5698-2726

Stanislav Ye. Bondarenko, MD, DSc, PhD, Professor, Director of the Sytenko Institute of Spine and Joint Pathology of NAMSU, Kharkiv, Ukraine; e-mail: bondarenke@gmail.com; phone: +380 (57) 725-14-00, 725-14-08; https://orcid.org/0000-0003-2463-5919

Yevhen V. Olinkevych, Orthopedic Traumatologist, Department of Orthopedic Arthrology and Endoprosthetics, Sytenko Institute of Spine and Joint Pathology of NAMSU, Kharkiv, Ukraine; e-mail: princ1206@gmail.com; phone: +380 (57) 725-14-68; https://orcid.org/0009-0000-0859-5609

Oleksii P. Marushchak, PhD in Medicine, Head of the Department of Orthopedic Arthrology and Endoprosthetics, Sytenko Institute of Spine and Joint Pathology of NAMSU, Kharkiv, Ukraine; e-mail: dr.marushchak@yahoo.com; phone: +380 (57) 725-14-68; https://orcid.org/0000-0002-5606-8763

Mykhailo Yu. Karpinsky, Senior Research Fellow, Biomechanics Laboratory, Sytenko Institute of Spine and Joint Pathology of NAMSU, Kharkiv, Ukraine; e-mail: korab.karpinsky9@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-3004-2610

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.

V.A. Filipenko, S.Ye. Bondarenko, Ye.V. Olinkevich, O.P. Marushchak, M.Yu. Karpinsky, O.V. Yaresko
Sytenko Institute of Spine and Joint Pathology of National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Kharkiv

A comparative analysis of the stress-strain state of a femur model with a revision stem following an extended trochanteric osteotomy depending on the length of the stem

Abstract. ***Background.*** Removal of a stable femoral component of a prosthesis is one of the most challenging problems in revision hip arthroplasty. An extended trochanteric osteotomy (ETO) provides adequate access to the femoral canal; however, once performed, the question arises as to the choice of length for the revision stem, which must cover the lower edge of the osteotomy without creating excessive stress concentrations in the bone and the fixation elements. The purpose was to conduct a comparative analysis of stress values in a femur model with a revision stem following an ETO, depending on the length of the stem. ***Materials and methods.*** A basic finite-element model of the femur was developed with a revision endoprosthesis implanted following an extended proximal osteotomy. Models were created for three variants of the endoprosthesis stem length: 1, 3 and 5 cm below the lower edge of the osteotomy. The bone flap was fixed with a 1.5-mm diameter cerclage wire at two levels, with two turns at each level. The model was loaded with a force of 1100 N applied to the femoral head and a force of 468 N from the hip abductors. ***Results.*** The length of the prosthesis stem has virtually no effect on the stress distribution in the bony elements of the models: at the distal end of the diaphysis and in the bone flap, the differences between the models are minimal. The most significant changes are observed in the area of the lower edge of the osteotomy, where, as the stem length increases from 1 to 5 cm, the stress level decreases from 18.9 to 13.0 MPa. Furthermore, a stem that overlaps the lower edge of the osteotomy by 5 cm results in the lowest stress levels in the endoprosthesis neck (148.9 MPa) and the cerclage wire (443.9 MPa); however, the stresses at its distal end increase 15-fold — to 217.7 MPa, which is, nevertheless, 2.5 times lower than the tensile strength of surgical steel. ***Conclusions.*** Covering the lower osteotomy zone with a revision stem by 5 cm following the removal of a stable femoral component using an ETO reduces the load on the cerclage wire and decreases stress concentration in the area of the lower edge of the osteotomy. This choice of stem length ensures component stability and offers advantages over the use of shorter revision stems, particularly in complex revision arthroplasty cases.

Keywords: hip joint; revision arthroplasty; extended trochanteric osteotomy; revision stem length

UDC 616.718.4-001.5-06:612.017.1-053.9 DOI: https://doi.org/10.22141/1608-1706.5.27.2026.1114

A.A. Ablakulov[1], V.R. Akramov[1], B.Z. Khamdamov[1], A.O. Okhunov[2], J.P. Radjabov[3]
[1]Bukhara State Medical Institute named after Abu Ali ibn Sino, Bukhara, Republic of Uzbekistan
[2]Tashkent State Medical University, Tashkent, Republic of Uzbekistan
[3]Samarkand State Medical University, Samarkand, Republic of Uzbekistan

Relationship between preoperative immuno-inflammatory indicators and impaired consolidation of femoral fractures in elderly and senile patients

Abstract. ***Background.*** *Impaired consolidation of femoral fractures in elderly patients is a clinically significant problem determined not only by mechanical but also by biological factors. Understanding of the role of preoperative immuno-inflammatory and osteometabolic markers in shaping the union outcome remains insufficient. The purpose was to assess the relationship between preoperative post-traumatic indicators of systemic inflammation, cytokine regulation, and bone remodeling with subsequent impaired consolidation of femoral fractures in elderly and senile patients.* ***Materials and methods.*** *A single-center retrospective cohort study included 43 patients operated on for femoral fractures (2020–2022). Each patient was assigned one mutually exclusive category based on clinical and radiological assessment at 6–12 months or at the time of revision surgery: physiological consolidation (n = 15), delayed consolidation (n = 17), nonunion (n = 11). The primary laboratory indicator was the RANKL/OPG (receptor activator of nuclear factor-kappa B ligand/osteoprotegerin) ratio. Additionally, the neutrophil-to-lymphocyte ratio (NLR), C-reactive protein (CRP), interleukin-6 (IL-6), tumor necrosis factor α (TNF-α), IL-10, transforming growth factor β (TGF-β), RANKL and OPG were studied. Welch's analysis of variance, the Fisher-Freeman-Halton exact test, and the Benjamini-Hochberg and Holm corrections were applied.* ***Results.*** *As the outcome worsened, the NLR (2.2 ± 0.7 → 3.5 ± 1.1 → 5.1 ± 1.8), IL-6 (7.8 ± 2.6 → 15.4 ± 5.1 → 26.7 ± 8.9 pg/mL), TNF-α (9.6 ± 3.4 → 17.8 ± 5.7 → 29.3 ± 9.1 pg/mL) and the RANKL/OPG ratio (0.29 ± 0.08 → 0.66 ± 0.19 → 1.49 ± 0.44; p < 0.001 for all) increased consistently. IL-10 and TGF-β levels decreased. When delayed consolidation and nonunion were combined, the RANKL/OPG ratio was higher by 0.70 units (95% confidence interval 0.49–0.90; Hedges' g = 1.63), IL-6 by 12.04 pg/mL, and TNF-α by 12.72 pg/mL. All additional laboratory differences, except for monocyte levels, remained significant after correction for multiple comparisons.* ***Conclusions.*** *Impaired consolidation of femoral fractures in elderly patients was associated with a preoperative pro-inflammatory and resorptive profile. The largest and most consistent differences were found for RANKL/OPG, IL-6 and TNF-α. The findings reflect unadjusted clinical associations and require confirmation in a prospective study on an independent sample.*

Keywords: *femoral fracture; delayed consolidation; nonunion; RANKL/OPG; interleukin-6; tumor necrosis factor α; neutrophil-to-lymphocyte ratio; elderly age*

Introduction

Femoral fractures in elderly and senile patients occur against a background of reduced bone mass, impaired microarchitecture, and diminished functional reserve. In this category of patients, even technically correct osteosynthesis does not preclude prolonged callus formation, secondary fixation instability, and nonunion. In large epidemiological samples, the incidence of union disorders was determined not only by the location and severity of the injury, but also by comorbidities, age, and drug burden [1, 2]. The clinical outcome results from a combination of mechanical and biological conditions: comminuted fracture pattern, disrupted

© «Травма» / «Trauma» («Travma»), 2026
© Видавець Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2026

For correspondence: Akmal Ablakulov, Head of Trauma Unit 2, Central Polyclinic of Bukhara City; PhD Applicant, Department of Traumatology and Neurosurgery, Bukhara State Medical Institute named after Abu Ali ibn Sino, Bukhara, 200100, Uzbekistan; e-mail: ablaqulov.akmal@bsmi.uz
Full list of authors information is available at the end of the article.

interfragmentary contact, infection, and severe somatic status increase the likelihood of delayed union, with their combined effect being more pronounced than the influence of any single factor alone [3, 4].

Reparative osteogenesis begins with an inflammatory response that ensures clearance of the injury zone, recruitment of progenitor cells, and initiation of angiogenesis. Further healing requires a timely transition from the pro-inflammatory response to the formation of cartilaginous and bony callus. Excessive or prolonged inflammatory activation disrupts this sequence and may sustain resorptive remodeling [5, 6].

The relationship between the immune and skeletal systems is particularly evident in the RANK-RANKL-OPG (receptor activator of nuclear factor-kappa B — receptor activator of nuclear factor-kappa B ligand — osteoprotegerin) axis: RANKL supports osteoclast differentiation and activity, whereas OPG limits this process by binding the ligand. An imbalance between these molecules shifts remodeling toward resorption. At the same time, early-phase inflammatory cytokines participate in the regulation of osteoblasts, vascular response, and regenerate maturation [7, 8].

Aging alters innate and adaptive immune responses, reduces periosteal cell activity, and slows angiogenesis. Therefore, preoperative indicators simultaneously reflect the early post-traumatic response and the state of regulatory healing mechanisms. Clinical studies jointly assessing inflammatory cytokines and RANKL/OPG in elderly patients with femoral fractures remain scarce [9, 10].

The purpose of the study was to assess the relationship between preoperative post-traumatic indicators of systemic inflammation, cytokine regulation, and bone remodeling with subsequent impaired consolidation of femoral fractures in elderly and senile patients.

Materials and methods

Study design and patients

A retrospective analysis of a single-center cohort of patients with femoral fractures who underwent surgical treatment at the Bukhara Regional Branch of the Republican Scientific Center for Emergency Medical Care of the Ministry of Health of the Republic of Uzbekistan in 2020–2022 was performed. The protocol was approved prior to cohort formation.

The final analysis included all 43 elderly and senile patients with closed femoral fractures who had complete clinical, radiological, laboratory, and immunological data and a follow-up period of at least 6 months. Mean age was 72.8 ± ± 6.4 years; women — 27 (62.8 %), men — 16 (37.2 %).

Exclusion criteria: age under 60 years, pathological fractures of tumor origin, severe high-energy trauma, open fractures with a pronounced infectious-necrotic component, decompensated autoimmune or systemic inflammatory diseases, incomplete documentation.

Each patient was assigned one mutually exclusive consolidation category: physiological (n = 15), delayed (n = 17), nonunion (n = 11). For additional analysis, delayed consolidation and nonunion were combined into a category of impaired consolidation (n = 28).

Clinical and radiological assessment

On admission, fracture location and morphology, injury mechanism, time from injury to surgery, and type of osteosynthesis were recorded. Comorbidity was assessed using the Charlson index. Cortical bone quality was characterized by the cortical index: (D1 – D2) / D1, where D1 is the outer diaphyseal diameter and D2 is the inner diameter of the medullary canal. Radiography was performed in two projections on admission and at 3, 6, and 12 months.

Laboratory and immunological examination

Venous blood samples were collected on admission, in the morning, fasting, before surgery. The neutrophil-to-lymphocyte ratio (NLR) was calculated as the ratio of the absolute neutrophil count to the absolute lymphocyte count. Concentrations of interkeukin-6 (IL-6), tumor necrosis factor α (TNF-α), IL-10, transforming growth factor β (TGF-β), RANKL, and OPG were determined by solid-phase ELISA (Human ELISA Kit, Elabscience Biotechnology Inc., China) at a wavelength of 450 nm. The RANKL/OPG ratio was calculated by dividing the RANKL concentration by the OPG concentration.

Statistical analysis

Quantitative indicators are presented as M ± SD. Intergroup differences were assessed using Welch's analysis of variance; pairwise comparisons used Welch's t-test with Holm correction. Categorical variables were compared using the Fisher-Freeman-Halton exact test (200,000 Monte Carlo samples). RANKL/OPG was considered the primary laboratory indicator. For the remaining laboratory indicators, the Benjamini-Hochberg (false discovery rate, FDR) correction was applied. Mean differences with 95% confidence interval (CI) and Hedges' g were calculated to compare physiological and impaired consolidation. A multivariable model was not constructed due to the limited sample size; the estimates presented are unadjusted. Significance level: $p < 0.05$ and $q < 0.05$. Software: SPSS Statistics 26.0.

Ethical aspects

The study protocol was approved by the local bioethics committee of the Bukhara State Medical Institute (protocol No. 13/896 dated January 12, 2020). The study was conducted in accordance with the principles of the WMA Declaration of Helsinki (2013 revision). All patients or their legal representatives signed informed consent.

Compliance with the research plan

The work was carried out within the research plan of the Bukhara State Medical Institute on the topic "Optimization of surgical treatment of bone fractures in elderly and senile patients considering immuno-inflammatory status" (2020–2025).

Results

Clinical and traumatological characteristics

Fracture location and type of osteosynthesis were comparable across the three groups. As the outcome worsened, the proportion of multifragmentary injuries increased, although

the overall test did not reach statistical significance. Time from injury to surgery and the Charlson index increased significantly, while the cortical index decreased (Table 1).

Indicators of cellular and systemic inflammatory response

Patients with subsequent impaired consolidation showed preoperative neutrophilia, relative lymphopenia, and an increased NLR. The most pronounced gradient was found for C-reactive protein (CRP): 8.6 ± 3.2 mg/L in physiological union versus 28.4 ± 9.7 mg/L in nonunion. Differences in monocytes did not reach statistical significance. All other indicators remained significant after FDR correction, $q \leq 0.010$ (Table 2).

Cytokine profile and bone remodeling indicators

Pro-inflammatory cytokines and osteoclast activation markers increased consistently from physiological consolidation to nonunion. At the same time, IL-10, TGF-β, and

Table 1. Baseline clinical and traumatological characteristics of patients depending on the type of consolidation

Parameter	Physiological consolidation, n = 15	Delayed consolidation, n = 17	Nonunion, n = 11	p
Proximal segment, n (%)	7 (46.7)	8 (47.1)	5 (45.5)	
Diaphysis, n (%)	5 (33.3)	5 (29.4)	2 (18.2)	
Distal segment, n (%)	3 (20.0)	4 (23.5)	4 (36.4)	
Fracture morphology				0.265
Simple, n (%)	9 (60.0)	7 (41.2)	2 (18.2)	
Comminuted, n (%)	4 (26.7)	6 (35.3)	4 (36.4)	
Multifragmentary, n (%)	2 (13.3)	4 (23.5)	5 (45.5)	
Low-energy mechanism, n (%)	10 (66.7)	13 (76.5)	9 (81.8)	0.746
Time from injury to surgery, days	2.9 ± 1.4	4.7 ± 2.1*	6.1 ± 1.3*#	< 0.001
Cortical index, units	0.51 ± 0.07	0.43 ± 0.05*	0.34 ± 0.06*#	< 0.001
Charlson index, points	3.4 ± 1.2	4.8 ± 1.7*	5.9 ± 1.1*#	< 0.001
Type 2 diabetes mellitus, n (%)	3 (20.0)	7 (41.2)	5 (45.5)	0.341
Chronic kidney disease, n (%)	1 (6.7)	3 (17.6)	4 (36.4)	0.199
Type of osteosynthesis				1.000
Intramedullary, n (%)	9 (60.0)	10 (58.8)	6 (54.5)	
Extramedullary plate, n (%)	5 (33.3)	5 (29.4)	4 (36.4)	
Combined, n (%)	1 (6.7)	2 (11.8)	1 (9.1)	

Notes: p for quantitative indicators was calculated by Welch's ANOVA, for categorical indicators — by the Fisher-Freeman-Halton exact test; * — p after Holm correction < 0.05 compared with physiological consolidation; # — p < 0.05 compared with delayed consolidation.

Table 2. Preoperative indicators of cellular and systemic inflammatory response

Parameter	Physiological consolidation, n = 15	Delayed consolidation, n = 17	Nonunion, n = 11	p
Leukocytes, × 10^9/L	7.4 ± 1.6	8.8 ± 2.1	10.1 ± 2.4*	0.009
Neutrophils, %	61.8 ± 6.9	69.7 ± 7.8*	77.4 ± 8.6*#	< 0.001
Lymphocytes, %	28.6 ± 5.1	22.1 ± 4.8*	16.3 ± 4.5*#	< 0.001
NLR, units	2.2 ± 0.7	3.5 ± 1.1*	5.1 ± 1.8*#	< 0.001
Monocytes, %	6.4 ± 1.8	7.3 ± 2.0	8.2 ± 2.4	0.122
ESR, mm/h	18.7 ± 7.6	27.9 ± 10.4*	36.8 ± 12.1*	< 0.001
CRP, mg/L	8.6 ± 3.2	16.9 ± 5.8*	28.4 ± 9.7*#	< 0.001

Notes: * — p after Holm correction < 0.05 compared with physiological consolidation; # — p < 0.05 compared with delayed consolidation. For additional laboratory indicators, the Benjamini-Hochberg correction was applied; all indicators except monocytes retained q < 0.05.

OPG decreased. The RANKL/OPG ratio in nonunion was more than 5 times higher than in physiological union. All additional indicators remained significant after FDR correction, $q \leq 0.004$ (Table 3).

Course of the reparative process

The laboratory gradient was accompanied by significant differences in clinical and radiological course. The first signs of union in nonunion appeared twice as late as in physiological consolidation. At the same time, the incidence of pain on axial loading and functional limitations increased (Table 4).

Comparison of physiological and impaired consolidation

When delayed union and nonunion were combined, all key indicators retained large standardized differences. For RANKL/OPG, IL-6, and TNF-α, Hedges' g exceeded 1.6. A decrease in IL-10 and TGF-β was also accompanied by a large effect size in the opposite direction (Table 5).

Table 3. Preoperative cytokine profile and bone remodeling indicators

Parameter	Physiological consolidation, n = 15	Delayed consolidation, n = 17	Nonunion, n = 11	p
IL-6, pg/mL	7.8 ± 2.6	15.4 ± 5.1*	26.7 ± 8.9*#	< 0.001
TNF-α, pg/mL	9.6 ± 3.4	17.8 ± 5.7*	29.3 ± 9.1*#	< 0.001
IL-10, pg/mL	11.4 ± 3.2	8.9 ± 2.7*	6.3 ± 2.1*#	< 0.001
TGF-β, ng/mL	24.8 ± 6.7	18.6 ± 5.1*	13.9 ± 4.4*#	< 0.001
RANKL, pmol/L	1.7 ± 0.5	3.2 ± 1.1*	5.6 ± 1.8*#	< 0.001
OPG, pmol/L	5.8 ± 1.6	4.9 ± 1.3	3.8 ± 1.1*#	0.003
RANKL/OPG, units	**0.29 ± 0.08**	**0.66 ± 0.19***	**1.49 ± 0.44*#**	**< 0.001**

Notes: * — p after Holm correction < 0.05 compared with physiological consolidation; # — p < 0.05 compared with delayed consolidation. RANKL/OPG was the primary laboratory indicator. For additional indicators, the Benjamini-Hochberg correction was applied; all values retained q < 0.05.

Table 4. Clinical and radiological course of the reparative process

Parameter	Physiological consolidation, n = 15	Delayed consolidation, n = 17	Nonunion, n = 11	p
First signs of consolidation, weeks	4.8 ± 0.3	7.2 ± 1.3*	9.4 ± 2.1*#	< 0.001
Callus formation, weeks	10.6 ± 2.4	18.3 ± 4.7*	27.1 ± 6.2*#	< 0.001
Recovery of weight-bearing capacity, weeks	9.1 ± 2.6	16.8 ± 5.3*	25.6 ± 7.1*#	< 0.001
Pain on axial loading at 3 months, n (%)	2 (13.3)	10 (58.8)	10 (90.9)	< 0.001
Functional activity limitation at 6 months, n (%)	2 (13.3)	8 (47.1)	9 (81.8)	0.002

Notes: * — p after Holm correction < 0.05 compared with physiological consolidation; # — p < 0.05 compared with delayed consolidation. For categorical variables, p was calculated using the Fisher-Freeman-Halton exact test.

Table 5. Differences in key preoperative indicators between physiological and impaired consolidation

Parameter	Physiological consolidation, n = 15	Impaired consolidation, n = 28	Mean difference (95% CI)/Hedges' g (95% CI)	p
NLR, units	2.20 ± 0.70	4.13 ± 1.60	+1.93 (1.22–2.64)/1.39 (0.70–2.09)	< 0.001
CRP, mg/L	8.60 ± 3.20	21.42 ± 9.35	+12.82 (8.86–16.77)/1.61 (0.89–2.33)	< 0.001
IL-6, pg/mL	7.80 ± 2.60	19.84 ± 8.74	+12.04 (8.42–15.66)/1.63 (0.91–2.35)	< 0.001
TNF-α, pg/mL	9.60 ± 3.40	22.32 ± 9.09	+12.72 (8.81–16.62)/1.63 (0.91–2.35)	< 0.001
IL-10, pg/mL	11.40 ± 3.20	7.88 ± 2.76	–3.52 (–5.53; –1.51)/–1.18 (–1.86; –0.51)	0.001
TGF-β, ng/mL	24.80 ± 6.70	16.75 ± 5.30	–8.05 (–12.18; –3.92)/–1.36 (–2.05; –0.67)	< 0.001
RANKL/OPG, units	**0.29 ± 0.08**	**0.99 ± 0.51**	**+0.70 (0.49–0.90)/1.63 (0.91–2.35)**	**< 0.001**

Notes: a positive difference indicates a higher level in impaired consolidation; a negative difference indicates a lower level.

Discussion

Preoperative immuno-inflammatory indicators differed depending on the subsequent union outcome. In patients with delayed consolidation and nonunion, the NLR, CRP, IL-6, TNF-α, RANKL, and the RANKL/OPG ratio increased simultaneously, while IL-10, TGF-β, and OPG decreased. The direction of these changes coincided with an increase in the time required for callus formation and recovery of weight-bearing capacity. The observed pattern reflects not the isolated action of a single marker, but a coordinated shift in regulation toward prolonged inflammation and the predominance of bone resorption.

The most pronounced difference was found for the RANKL/OPG ratio. In clinical observations of normal and delayed healing, the dynamics of OPG and soluble RANKL differed in timing and intensity, confirming the involvement of this system in reparative osteogenesis [11]. In atrophic nonunion, an increase in circulating OPG has previously been described, which may reflect a compensatory response [12]. In our sample, individual RANKL and OPG values changed in opposite directions, so the RANKL/OPG ratio better reflected the resorptive shift.

A decrease in TGF-β with worsening outcome is consistent with clinical data on differing early serum dynamics of TGF-β1 in timely versus delayed healing of long bones [13]. Immune regulation of healing is not limited to circulating cytokines: in humans, delayed regeneration has been associated with an increased level of terminally differentiated CD8+ T cells [14]. The NLR should be regarded as an integral marker of immune imbalance rather than a specific test for nonunion [15, 16].

In experimental models using aged animals, early enhancement of the osteoclastic response and delayed microvascular maturation have been observed [17, 18]. Single-cell analysis of the periosteum has also revealed decreased progenitor cell proliferation and altered immune composition [19]. Injury morphology retains independent significance: in diaphyseal fractures with a third fragment, the risk of union impairment depends on the nature of reduction [20]; a transverse multi-comminuted component is associated with nonunion after intramedullary fixation [21]; in atypical subtrochanteric fractures, an unfavorable course is particularly pronounced [22].

The clinical implication of these findings is the possibility of supplementing early assessment of patients with presumably insufficient biological conditions for healing. The indicators presented cannot be used as an independent basis for changing surgical tactics: their interpretation is appropriate only in conjunction with assessment of fracture morphology, bone quality, fixation stability, and somatic status.

Limitations. The retrospective single-center design with a small sample size does not allow the exclusion of unaccounted confounding factors. A single measurement of markers does not reflect the dynamics of the response. Several indicators are sensitive to the timing of blood sampling, infection, and drug burden. The results represent unadjusted associations and require prospective confirmation.

Conclusions

1. Impaired consolidation of femoral fractures in elderly and senile patients was associated with a preoperative proinflammatory and resorptive profile, including increases in the NLR, CRP, IL-6, TNF-α, and RANKL/OPG, along with decreases in IL-10, TGF-β, and OPG.

2. The largest standardized differences between physiological and impaired consolidation were found for the RANKL/OPG ratio (Hedges' g = 1.63; difference 0.70, 95% CI 0.49–0.90), IL-6 (Hedges' g = 1.63; difference 12.04 pg/mL), and TNF-α (Hedges' g = 1.63; difference 12.72 pg/mL).

3. All additional laboratory indicators, except for monocyte levels, remained statistically significant after FDR control.

4. The results presented characterize unadjusted clinical associations and require confirmation in a prospective sample with multivariable correction.

Future research directions. A promising direction is a prospective multicenter cohort study with multivariable adjustment for mechanical, surgical, and somatic factors, with dynamic measurement of markers (preoperative, 48-hour, and 2-week sampling) to distinguish the baseline profile from the response to intervention. Development of a predictive algorithm for impaired consolidation based on a combination of RANKL/OPG, IL-6, and the cortical index will make it possible to stratify risk and personalize the management of elderly patients with femoral fractures.

Acknowledgments. The authors thank the staff of the Bukhara Regional Branch of the Republican Scientific Center for Emergency Medical Care of the Ministry of Health of the Republic of Uzbekistan for their participation in the examination, treatment, and follow-up of patients.

References

1. Morin SN, Leslie WD, Schousboe JT. Osteoporosis: A Review. JAMA. 2025;334(10):894-907. doi: 10.1001/jama.2025.6003.

2. Zura R, Xiong Z, Einhorn TA, et al. Epidemiology of Fracture Nonunion in 18 Human Bones. JAMA Surg. 2016;151(11):e162775. doi: 10.1001/jamasurg.2016.2775.

3. Santolini E, West R, Giannoudis PV. Risk factors for long bone fracture non-union: a stratification approach based on the level of the existing scientific evidence. Injury. 2015;46(Suppl 8):S8-S19. doi: 10.1016/S0020-1383(15)30049-8.

4. Westgeest J, Weber D, Dulai SK, et al. Factors Associated with Development of Nonunion or Delayed Healing After an Open Long Bone Fracture: A Prospective Cohort Study of 736 Subjects. J Orthop Trauma. 2016;30(3):149-155. doi: 10.1097/BOT.0000000000000488.

5. Einhorn TA, Gerstenfeld LC. Fracture healing: mechanisms and interventions. Nat Rev Rheumatol. 2015;11(1):45-54. doi: 10.1038/nrrheum.2014.164.

6. Loi F, Córdova LA, Pajarinen J, Lin TH, Yao Z, Goodman SB. Inflammation, fracture and bone repair. Bone. 2016;86:119-130. doi: 10.1016/j.bone.2016.02.020.

7. Schmidt-Bleek K, Schell H, Schulz N, et al. Inflammatory phase of bone healing initiates the regenerative healing cascade.

Cell Tissue Res. 2012;347(3):567-573. doi: 10.1007/s00441-011-1205-7.

8. Takayanagi H. Osteoimmunology: shared mechanisms and crosstalk between the immune and bone systems. Nat Rev Immunol. 2007;7(4):292-304. doi: 10.1038/nri2062.

9. Clark D, Nakamura M, Miclau T, Marcucio R. Effects of Aging on Fracture Healing. Curr Osteoporos Rep. 2017;15(6):601-608. doi: 10.1007/s11914-017-0413-9.

10. Baht GS, Vi L, Alman BA. The Role of the Immune Cells in Fracture Healing. Curr Osteoporos Rep. 2018;16(2):138-145. doi: 10.1007/s11914-018-0423-2.

11. Köttstorfer J, Thomas A, Gregori M, et al. Are OPG and RANKL involved in human fracture healing? J Orthop Res. 2014;32(12):1557-1561. doi: 10.1002/jor.22723.

12. Marchelli D, Piodi LP, Corradini C, et al. Increased serum OPG in atrophic nonunion shaft fractures. J Orthop Traumatol. 2009;10(2):55-58. doi: 10.1007/s10195-009-0047-5.

13. Zimmermann G, Henle P, Küsswetter M, et al. TGF-beta1 as a marker of delayed fracture healing. Bone. 2005;36(5):779-785. doi: 10.1016/j.bone.2005.02.011.

14. Reinke S, Geissler S, Taylor WR, et al. Terminally differentiated CD8+ T cells negatively affect bone regeneration in humans. Sci Transl Med. 2013;5(177):177ra36. doi: 10.1126/scitranslmed.3004754.

15. Bastian OW, Pillay J, Alblas J, et al. Systemic inflammation and fracture healing. J Leukoc Biol. 2011;89(5):669-673. doi: 10.1189/jlb.0810446.

16. Kovtun A, Bergdolt S, Wiegner R, et al. The crucial role of neutrophil granulocytes in bone fracture healing. Eur Cell Mater. 2016;32:152-162. doi: 10.22203/eCM.v032a10.

17. Wang XF, Zhang YK, Yu ZS, Zhou JL. The role of the serum RANKL/OPG ratio in the healing of intertrochanteric fractures in elderly patients. Mol Med Rep. 2013;7(4):1169-1172. doi: 10.3892/mmr.2013.1335.

18. Menger MM, Manuschewski R, Hans S, et al. Age-related alterations of angiogenesis, inflammation and bone microarchitecture during fracture healing in mice. Geroscience. 2025;47:4321-4333. doi: 10.1007/s11357-025-01584-y.

19. King JS, Wan M, Kim A, et al. Effects of aging on the immune and periosteal response to fracture injury. Bone. 2025;198:117524. doi: 10.1016/j.bone.2025.117524.

20. Gambuti E, Caldaria A, Spadoni E, et al. Third fragment femoral shaft fracture: a retrospective analysis of complications and predictive factors for non-union and delayed union. Orthop Traumatol Surg Res. 2025;111(7):104295. doi: 10.1016/j.otsr.2025.104295.

21. Matsugaki T, Mizu-Uchi H, Aratake Y, Yasumoto K. Comminuted Transverse Femoral Shaft Fractures Are at Risk for Nonunion. Kurume Med J. 2025;71(1-2):37-41. doi: 10.2739/kurumemedj.MS7112005.

22. Hiyama S, Nakajima H, Ando J, et al. Differences Between Atypical and Typical Subtrochanteric Fractures Due to Low-Energy Trauma. Cureus. 2025;17(8):e90147. doi: 10.7759/cureus.90147.

Received 16.06.2026
Revised 23.07.2026
Accepted 12.08.2026

Information about authors

Akmal Ablakulov, Head of Trauma Unit No. 2, Central Polyclinic of Bukhara City; PhD Applicant, Department of Traumatology and Neurosurgery, Bukhara State Medical Institute named after Abu Ali ibn Sino, Bukhara, Uzbekistan; e-mail: ablaqulov.akmal@bsmi.uz; https://orcid.org/0009-0008-3129-5039

Vohid Akramov, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Traumatology and Neurosurgery, Bukhara State Medical Institute named after Abu Ali ibn Sino, Bukhara, Uzbekistan; e-mail: akramovvohid@gmail.com; https://orcid.org/0009-0007-1320-4327

Bakhtiyor Khamdamov, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Faculty and Hospital Surgery, Bukhara State Medical Institute named after Abu Ali ibn Sino, Bukhara, Uzbekistan; e-mail: Khamdamovb9@gmail.com; https://orcid.org/0000-0003-1799-3777

Alisher Okhunov, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of General and Paediatric Surgery, Tashkent State Medical University, Tashkent, Uzbekistan; e-mail: alisher.okhunov@yahoo.com; https://orcid.org/0000-0003-3622-6805

Jasur Radjabov, PhD, Assistant, Department of General Surgery, Samarkand State Medical University, Samarkand, Uzbekistan; e-mail: jasurradjabov.2584@gmail.com; https://orcid.org/0009-0005-3680-3475

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 did not receive any specific external funding or sponsorship.

Authors' contribution. A.A. Ablakulov — collection of clinical material, data analysis, preparation of the initial draft; V.R. Akramov — methodology development, clinical interpretation, manuscript editing; B.Z. Khamdamov — scientific supervision, interpretation of immunological results; A.O. Okhunov — critical revision of the manuscript; J.P. Radjabov — collection of clinical material, data analysis.

Use of artificial intelligence. Artificial intelligence was not used in the preparation of this manuscript.

Ablakulov A.A.[1], Akramov V.R.[1], Khamdamov B.Z.[1], Okhunov A.O.[2], Radjabov J.P.[3]
[1]Bukhara State Medical Institute named after Abu Ali ibn Sino, Bukhara, Republic of Uzbekistan
[2]Tashkent State Medical University, Tashkent, Republic of Uzbekistan
[3]Samarkand State Medical University, Samarkand, Republic of Uzbekistan

Зв'язок передопераційних імунозапальних показників із порушенням консолідації переломів стегнової кістки в пацієнтів похилого та старечого віку

Резюме. ***Актуальність.*** Порушення консолідації переломів стегнової кістки в пацієнтів літнього віку є клінічно значущою проблемою, що визначається не лише механічними, а й біологічними чинниками. Розуміння ролі передопераційних імунозапальних та остеометаболічних маркерів у формуванні результату зрощення залишається недостатнім. ***Мета:*** оцінити зв'язок передопераційних показників системного запалення, цитокінової регуляції та кісткового ремоделювання з наступним порушенням консолідації переломів стегнової кістки в пацієнтів похилого і старечого віку. ***Матеріали та методи.*** Одноцентрове ретроспективне когортне дослідження включало 43 осіб, прооперованих з приводу переломів стегнової кістки (2020–2022). Кожному пацієнту присвоювали категорію на основі клінічної та радіологічної оцінки через 6–12 місяців або

під час ревізійної операції: фізіологічна консолідація (n = 15), уповільнена консолідація (n = 17), незрощення (n = 11). Основним лабораторним показником було співвідношення RANKL/OPG (ліганд рецептора активатора ядерного фактора каппа B/остеопротегерин). Додатково оцінювали нейтрофільно-лімфоцитарний індекс (NLR), рівні C-реактивного білка (CRP), інтерлейкіну-6 (IL-6), фактора некрозу пухлини α (TNF-α), IL-10, трансформуючого фактора росту β (TGF-β), RANKL та OPG. Застосовано дисперсійний аналіз Велча, точний критерій Фішера — Фрімена — Холтона, корекцію Бенджаміні — Хохберга й Холма. ***Результати.*** При погіршенні консолідації NLR (2,2 ± 0,7 → 3,5 ± 1,1 → 5,1 ± 1,8), IL-6 (7,8 ± 2,6 → 15,4 ± ± 5,1 → 26,7 ± 8,9 пг/мл), TNF-α (9,6 ± 3,4 → 17,8 ± 5,7 → 29,3 ± ± 9,1 пг/мл) та співвідношення RANKL/OPG (0,29 ± 0,08 → 0,66 ± 0,19 → 1,49 ± 0,44; p < 0,001 для всіх) послідовно зростали (p < 0,001). Рівні IL-10 та TGF-β знижувалися. При порушеній консолідації співвідношення RANKL/OPG було вищим на 0,70 од. (95% довірчий інтервал 0,49–0,90; Hedges g = 1,63), IL-6 — на 12,04 пг/мл, TNF-α — на 12,72 пг/мл. Усі додаткові лабораторні відмінності, за винятком рівня моноцитів, залишалися вірогідними після корекції на множинні порівняння. ***Висновки.*** Порушення консолідації переломів стегнової кістки в пацієнтів літнього віку асоційоване з передопераційним прозапальним і резорбтивним профілем. Найбільші та найстійкіші відмінності виявлено для співвідношення RANKL/OPG, IL-6 і TNF-α. Результати відображають нескориговані клінічні асоціації та потребують підтвердження в проспективному дослідженні на незалежній вибірці.

Ключові слова: перелом стегнової кістки; уповільнена консолідація; незрощення; RANKL/OPG; інтерлейкін-6; фактор некрозу пухлини α; нейтрофільно-лімфоцитарний індекс; літній вік

UDC 617.582/.584-001.5-07:616.152.11-07)-036 DOI: https://doi.org/10.22141/1608-1706.5.27.2026.1115

V.A. Ivashchenko, I.R. Trutiak
Danylo Halytsky Lviv National Medical University, Lviv, Ukraine

Clinical significance of blood lactate in patients with long bone fractures of the lower extremities

Abstract. ***Background.*** *Blood lactate is a well-established biomarker of disease severity and prognosis in patients with diabetes mellitus, cardiovascular diseases, malignancies, and sepsis. However, evidence regarding its clinical significance in trauma patients with femoral and tibial fractures remains controversial. Objective: to determine the role and clinical utility of blood lactate levels in patients with long bone fractures of the lower extremities for predicting infectious complications.* ***Materials and methods.*** *A total of 82 adult patients were included in this study, 42 males and 40 females with a mean age of 59.33 years. Closed fractures were diagnosed in 73 patients, including 41 femoral and 32 tibial fractures. Open femoral fractures were observed in 4 patients, while 5 patients sustained open tibial fractures resulting from combat-related shrapnel injuries.* ***Results.*** *In patients with closed femoral fractures, normal blood lactate levels were associated with the feasibility of early definitive internal fixation without subsequent infectious complications. In contrast, patients with comminuted femoral shaft fractures frequently exhibited elevated lactate levels, which served as an indication to postpone definitive osteosynthesis until normalization of lactate concentrations. Persistently elevated or recurrently increased lactate levels were associated with the development of postoperative infectious complications. Among patients with closed tibial fractures, elevated blood lactate levels were observed in those with fracture fragment displacement and severe soft tissue edema; they normalized following anti-edema therapy. In patients with open femoral and tibial fractures, high lactate levels reflected the severity of soft tissue injury and the inflammatory response, thereby limiting the possibility of early conversion to definitive internal fixation.* ***Conclusions.*** *The present findings support the use of blood lactate measurement as a predictive biomarker of infectious complications in patients with femoral and tibial fractures.*

Keywords: *femoral fractures; tibial fractures; infectious complications; blood lactate*

Introduction

Blood lactate is a well-established biomarker used to monitor disease progression and predict clinical outcomes in patients with diabetes mellitus, cardiovascular diseases, malignancies, and sepsis [1–8]. However, the available evidence regarding the clinical utility of blood lactate measurement in patients with bone fractures remains inconsistent. Some authors have reported that blood lactate levels are not predictive of the post-traumatic period in patients with long bone fractures [9, 10]. In contrast, others have suggested that patients with long bone fractures and elevated blood lactate levels require close monitoring because hyperlactatemia may indicate an increased risk of fat embolism [11]. Furthermore, Chika E. Uzoigwe et al. demonstrated that patients with proximal femoral fractures and elevated venous lactate should be considered at increased risk of mortality [12]. Similarly, X. Chen et al. reported that elevated serum lactate concentration is an independent predictor of adverse 30-day outcomes following proximal femoral fractures, with blood lactate levels exceeding 2 mmol/L being associated with a significantly increased risk of mortality [13]. V. Oladipo et al. also found that elevated blood lactate levels were associated with postoperative complications in patients undergoing surgical fixation of long bone fractures of the lower extremities [14]. Likewise, Y. Nishida et al. demonstrated that a preoperative blood lactate level of ≥ 2 mmol/L was as-

© «Травма» / «Trauma» («Travma»), 2026
© Видавець Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2026

Для кореспонденції: Іващенко Віталій Андрійович, аспірант, кафедра травматології, ортопедії та воєнно-польової хірургії, ДНТ «Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького», вул. Пекарська, 69, м. Львів, 79010, Україна; e-mail: vitaliyiv21@gmail.com; тел.: +380 (67) 170-09-23
For correspondence: Vitalii Ivashchenko, PhD-student, Department of Traumatology, Orthopedics and Military Field Surgery, Danylo Halytsky Lviv National Medical University, Pekarska st., 69, Lviv, 79010, Ukraine; e-mail: vitaliyiv21@gmail.com; phone: +380 (67) 170-09-23
Full list of authors information is available at the end of the article.

sociated with a higher incidence of early postoperative complications in patients with isolated extremity fractures [15].

Despite these findings, the role of blood lactate measurement in patients with bone fractures remains controversial. In particular, its value in determining the optimal timing of definitive surgical intervention, guiding the conversion from temporary fracture stabilization to internal fixation, and predicting postoperative complications has yet to be clearly established.

The purpose was to determine the role and clinical utility of blood lactate levels in patients with long bone fractures of the lower extremities for predicting infectious complications.

Materials and methods

The study included 82 adult patients, 42 males and 40 females with a mean age of 59.33 years. Closed fractures were diagnosed in 73 patients, including 41 femoral and 32 tibial fractures. Open femoral fractures were observed in 4 patients, while 5 patients sustained open tibial fractures caused by combat-related shrapnel injuries.

Patients with comorbidities known to affect blood lactate levels, including diabetes mellitus, malignancies, and cardiovascular diseases were excluded from the study.

Participants with closed femoral and tibial fractures were admitted within 6 hours after injury, whereas those with combat-related injuries were referred from previous levels of medical care 5–14 days after sustaining them.

Upon admission, all patients underwent complete blood count and biochemical blood tests, and C-reactive protein levels were determined. Blood lactate levels were quantitatively measured upon admission to the hospital, immediately before surgery, and on postoperative day 3 using GEM Premier 3500 and GEM Premier 4000 blood gas analyzers.

Instrumental assessment included plain radiography and computed tomography, the latter being performed in patients with comminuted and intra-articular fractures.

On admission, blood lactate levels in patients with closed femoral fractures ranged from 0.8 to 6.5 mmol/L, with a mean value of 2.78 mmol/L. In participants with closed tibial fractures, they ranged from 1.2 to 5.1 mmol/L, with a mean value of 3.07 mmol/L. The highest lactate concentrations were observed in patients with comminuted fractures accompanied by marked displacement of fracture fragments.

Among 4 patients with open femoral fractures, admission blood lactate levels ranged from 3.0 to 6.8 mmol/L, with a mean of 5.03 mmol/L. In participants with open tibial fractures, they ranged from 1.3 to 6.3 mmol/L, with a mean of 3.72 mmol/L.

Results

Among 15 patients with closed proximal femoral fractures admitted within 6 hours of injury, blood lactate levels were within the normal range (0.8–1.8 mmol/L; mean 1.68 mmol/L). Following a brief preoperative evaluation, these patients underwent urgent internal fixation using proximal femoral nail antirotation. A slight postoperative increase in blood lactate was observed, with normalization before hospital discharge. No postoperative infectious complications occurred in this group.

Twelve patients with closed comminuted femoral shaft fractures had elevated blood lactate levels ranging from 2.2 to 6.5 mmol/L (mean 5.1 mmol/L), which were interpreted as an early marker of an increased risk of complications. These participants were initially managed with skeletal traction until lactate levels normalized, followed by open reduction and internal fixation with plates and screws. In one of these patients, whose preoperative blood lactate level was 2.3 mmol/L, a surgical site infection developed during the postoperative period, accompanied by an increase in blood lactate to 5.3 mmol/L. Following surgical wound opening, thorough debridement, and irrigation with antiseptic solutions, the infectious process was subsided, and the lactate level decreased to 2.1 mmol/L by postoperative day 3.

The remaining 14 patients with closed fractures of the femoral shaft and distal metaphysis, whose blood lactate levels were within the normal range or mildly elevated (up to 2.2 mmol/L, with a mean of 1.97 mmol/L), underwent internal fracture fixation. Intramedullary nailing with a locking nail was performed in 11 patients, while plate-and-screw osteosynthesis was performed in the remaining 3 patients. The postoperative course was uneventful in 13 patients. One patient, whose preoperative blood lactate level was 2.2 mmol/L, developed a postoperative inflammatory soft tissue infiltrate that resolved with conservative treatment.

Among the 32 patients, 18 with closed displaced tibial shaft fractures and marked soft tissue swelling at admission had blood lactate levels exceeding 2.2 mmol/L (mean 4.08 mmol/L). These patients were treated with external fixation and anti-edema therapy. By postoperative day 2–3, the soft tissue edema of the lower leg had subsided, and the blood lactate level had decreased to ≤ 2.1 mmol/L.

In the remaining 14 patients with closed tibial fractures, minor fragment displacement, and moderate edema, blood lactate levels were ≤ 2.1 mmol/L, with a mean level of 1.76 mmol/L. These patients underwent internal fixation of the tibial fracture, with an uneventful postoperative course.

All open fractures were initially stabilized using external fixation devices. All combat-injured patients presented with soft tissue inflammation without clinical evidence of purulent wound discharge. All four patients with open femoral fractures presented with elevated blood lactate levels on admission (mean 5.03 mmol/L). This finding was attributed to the characteristics of combat-related shrapnel injuries involving extensive bone and soft tissue damage, retained foreign bodies, and associated inflammation. Therefore, conversion to internal osteosynthesis was performed in three patients after wound healing and normalization of parameters associated with the risk of complications, including a reduction in blood lactate levels to 1.4 ± ± 0.3 mmol/L. In one wounded patient whose blood lactate level did not decrease below 2.5 mmol/L, the external fixation device remained the definitive method of femoral fracture treatment.

All five patients with open tibial fractures had elevated blood lactate levels, with a mean of 3.72 mmol/L. Lactate levels did not decrease below 2.2 mmol/L during hospitalization. Therefore, conversion to an alternative fracture fixation method was not performed in these patients.

Discussion

Contemporary management of lower extremity fractures emphasizes early surgical intervention with anatomical fracture reduction and stable internal fixation. This approach provides reliable stabilization, reduces the risk of malunion and nonunion, facilitates early mobilization and rehabilitation, shortens the period of temporary disability, and minimizes time of prolonged limb immobilization, preventing joint contractures. However, as with any surgical procedure, internal fixation carries a risk of postoperative complications.

Patients with combat-related injuries have soft tissue damage and bacterially contaminated or infected wounds, which primarily require control of the infection and wound healing or reconstructive closure. Initial fracture stabilization in these patients is achieved using an external fixation device, while internal osteosynthesis is delayed.

To minimize the risk of postoperative complications, several diagnostic parameters reflecting the patient's overall condition and the status of the surgical site should be assessed before planned internal osteosynthesis. The primary prerequisites include wound healing, resolution of soft tissue edema and inflammation, adequate limb perfusion, normalization of body temperature, and normal values of complete blood count parameters, C-reactive protein, and blood lactate levels.

It is important to note that in one patient with a shrapnel-induced femoral fracture and five patients with shrapnel-induced tibial fractures, complete blood count parameters and C-reactive protein levels normalized following soft tissue wound healing. However, blood lactate levels remained at or above 2.2 mmol/L. This was considered an indicator of an increased risk of complications associated with internal fracture fixation; therefore, treatment with external fixation was continued. In our opinion, blood lactate levels in patients with femoral and tibial fractures may serve as a sensitive marker of potential surgical site infections.

Conclusions

1. Fractures of the femur and tibia with fragment displacement are associated with elevated blood lactate levels, while complete blood count and C-reactive protein levels in such patients may remain within the normal range.

2. Internal fixation is the optimal treatment method for fractures of the long bones of the lower extremities; however, to ensure an uncomplicated postoperative course, the condition of the surgical site, the patient's overall clinical status, and markers of infectious complications should be taken into account, among which blood lactate is an important indicator.

References

1. Andersen LW, Mackenhauer J, Roberts JC, Berg KM, Cocchi MN, Donnino MW. Etiology and therapeutic approach to elevated lactate levels. Mayo Clin Proc. 2013 Oct;88(10):1127-40. doi: 10.1016/j.mayocp.2013.06.012.

2. Shang XL, Liu DW, Wang XT, He HW, Zhang HM, Su LX, Pan P. The relationship between arterial blood lactate clearance, prognosis and myocardial damage in patients with septic shock after early goal-directed therapy. Zhonghua Nei Ke Za Zhi. 2018 May 1;57(5):345-350. doi: 10.3760/cma.j.issn.0578-1426.2018.05.008 (in Chinese).

3. Riveiro DF, Oliveira VM, Braunner JS, Vieira SR. Evaluation of Serum Lactate, Central Venous Saturation, and Venous-Arterial Carbon Dioxide Difference in the Prediction of Mortality in Postcardiac Arrest Syndrome. J Intensive Care Med. 2016 Sep;31(8):544-52. doi: 10.1177/0885066615592865.

4. Villar J, Short JH, Lighthall G. Lactate Predicts Both Short- and Long-Term Mortality in Patients With and Without Sepsis. Infect Dis (Auckl). 2019 Aug 6;12:1178633719862776. doi: 10.1177/1178633719862776.

5. Ahlgrim C, Baumstark MW, Roecker K. Clarifying the Link Between the Blood Lactate Concentration and Cardiovascular Risk. Int J Sports Med. 2022 Dec;43(13):1106-1112. doi: 10.1055/a-1812-5840.

6. Aleksandar J, Vladan P, Markovic-Jovanovic S, Stolic R, Mitic J, Smilic T. Hyperlactatemia and the Outcome of Type 2 Diabetic Patients Suffering Acute Myocardial Infarction. J Diabetes Res. 2016;2016:6901345. doi: 10.1155/2016/6901345.

7. Chen J, Huang Z, Chen Y, et al. Lactate and lactylation in cancer. Sig Transduct Target Ther. 2025;10:38. doi: 10.1038/s41392-024-02082-x.

8. Pérez-Tomás R, Pérez-Guillén I. Lactate in the Tumor Microenvironment: An Essential Molecule in Cancer Progression and Treatment. Cancers (Basel). 2020 Nov 3;12(11):3244. doi: 10.3390/cancers12113244.

9. Hong J, Malkoc A, Salahpour S, Wong DT, Dong F, Neeki M. Emergent surgical interventions in noncritical traumatic long bone fractures and lactate monitoring: a retrospective cohort study. Ann Med Surg (Lond). 2023 Apr 4;85(4):753-757. doi: 10.1097/MS9.0000000000000435.

10. Jonsson MH, Hommel A, Turkiewicz A, Ekelund U, Melander O, Englund M, Bentzer P. Plasma lactate at admission does not predict mortality and complications in hip fracture patients: a prospective observational study. Scand J Clin Lab Invest. 2018 Oct;78(6):508-514. doi: 10.1080/00365513.2018.1514650.

11. Bhumireddy CS, Kamath SU, Krishnamurthy SL. Is Serum Lactic Acid a Reliable Indicator for Diagnosing Fat Embolism Syndrome? J Clin Diagn Res. 2018 Oct;12(10):RC01-RC03. doi: 10.7860/JCDR/2018/35705.1216.

12. Uzoigwe CE, Venkatesan M, Smith R, Burnand HGF, Young PS, Cheesman CL, Middleton RG. Serum lactate is a prognostic indicator in patients with hip fracture. Hip Int. 2012 Sep-Oct;22(5):580-4. doi: 10.5301/HIP.2012.9762.

13. Chen X, Zhang J, Zhang Y, Lin Y, Liu Z, Wang X, Sun T. Serum lactate concentration on admission to hospital predicts the postoperative mortality of elderly patients with hip fractures 30 days after surgery Am J Transl Res. 2021;13(9):10363-10371.

14. Oladipo V, Portney D, Haber J, Baker H, Strelzow J. Lactic acid levels are associated with morbidity, length of stay, and total treatment costs in urban trauma patients with lower extremity long bone fractures. Eur J Orthop Surg Traumatol. 2024 May;34(4):1963-1970. doi: 10.1007/s00590-024-03877-y.

15. Nishida Y, Yamamoto R, Ono S, Sasaki J. Association between preoperative lactate level and early complications after surgery for isolated extremity fracture. BMC Musculoskelet Disord. 2024 Apr 23;25(1):314. doi: 10.1186/s12891-024-07409-x.

Received 03.08.2026
Revised 01.09.2026
Accepted 10.09.2026

Information about authors

Vitalii Ivashchenko, PhD-student, Department of Traumatology, Orthopedics and Military Field Surgery, Danylo Halytsky Lviv National Medical University, Lviv, Ukraine; e-mail: vitaliyiv21@gmail.com; phone: +380 (67) 170-09-23; https://orcid.org/0000-0002-4132-1447

Ihor Trutiak, MD, DSc, PhD, Professor, Department of Traumatology, Orthopedics and Military Field Surgery, Danylo Halytsky Lviv National Medical University, Lviv, Ukraine; e-mail: ihortrutiak@yahoo.com; https://orcid.org/0000-0001-8157-3449

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. I.R. Trutiak — conceptualization and study design, review and editing; V.A. Ivashchenko — data collection and processing, formal analysis, writing.

Іващенко В.А., Трутяк І.Р.

ДНТ «Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького», м. Львів, Україна

Клінічне значення лактату крові в пацієнтів із переломами довгих кісток нижніх кінцівок

Резюме. ***Актуальність.*** Лактат крові є біомаркером тяжкості захворювання та прогнозу в пацієнтів із цукровим діабетом, серцево-судинними й онкологічними захворюваннями, а також із сепсисом. Проте дані щодо його клінічного значення у травмованих із переломами стегна й гомілки є контроверсійними. ***Мета:*** визначити роль та місце показника лактату крові в осіб із переломами довгих кісток нижніх кінцівок щодо прогнозування інфекційних ускладнень. ***Матеріали та методи.*** Під нашим спостереженням знаходилося 82 повнолітні пацієнти: 42 чоловіки та 40 жінок, середній вік яких становив 59,33 року. Закриті переломи діагностовано в 73 осіб: стегна — у 41, гомілки — у 32. Відкриті переломи стегна були у 4, а кісток гомілки — у 5 пацієнтів із бойовими осколковими пораненнями. ***Результати.*** У хворих із закритими переломами стегнової кістки нормальні показники лактату асоціювалися з можливістю раннього виконання внутрішнього остеосинтезу без розвитку інфекційних ускладнень. Натомість при багатоуламкових переломах діафіза стегнової кістки збільшення рівня лактату був підставою для відтермінування остеосинтезу до його нормалізації, а стійке або повторне зростання показника супроводжувалося розвитком післяопераційних інфекційних ускладнень. У пацієнтів із закритими переломами великогомілкової кістки підвищення вмісту лактату спостерігалося при зміщеннях уламків і вираженому набряку м'яких тканин, він нормалізувався після протинабрякової терапії. В осіб із відкритими переломами стегнової та великогомілкової кісток високі концентрації лактату відображали тяжкість ушкодження м'яких тканин і запального процесу, що обмежувало можливість швидкої конверсії та внутрішньої фіксації. ***Висновки.*** Отримані результати підтверджують доцільність визначення рівня лактату крові як маркера ризику інфекційних ускладнень у травмованих із переломами стегна й гомілки.

Ключові слова: переломи стегнової кістки; переломи кісток гомілки; інфекційні ускладнення; лактат крові

DOI: https://doi.org/10.22141/1608-1706.5.27.2026.1116

Поляченко Ю.В.[1], Грицай М.П.[1], Колов Г.Б.[1], Половий А.С.[2], Лисак А.С.[3], Омельченко Т.М.[2]
[1]ДУ «Національний інститут травматології та ортопедії НАМН України», м. Київ, Україна
[2]Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, м. Київ, Україна
[3]ДУ «Головний медичний клінічний центр Міністерства внутрішніх справ України», м. Київ, Україна

Лікування пацієнтів із застосуванням техніки Masquelet і методу дистракційного остеосинтезу при критичних дефектах великогомілкової кістки, ускладнених остеомієлітом

Резюме. ***Актуальність.*** *Техніка Masquelet (induced membrane technique) і дистракційний остеогенез за Ілізаровим є загальновизнаними методиками лікування пацієнтів із сегментарними дефектами великогомілкової кістки, що асоційовані з хронічним остеомієлітом. Прямих порівняльних досліджень у вітчизняній літературі немає, а у світовій є лише досить обмежена кількість публікацій з невеликою кількістю пацієнтів у групах.* ***Мета:*** *провести порівняльний ретроспективний аналіз клінічних результатів застосування техніки Masquelet і методу Ілізарова при лікуванні критичних дефектів великогомілкової кістки, ускладнених остеомієлітом.* ***Матеріали та методи.*** *Було проліковано 167 пацієнтів із критичними дефектами великогомілкової кістки, ускладненими остеомієлітом. Після застосування критеріїв включення та виключення були сформовані дві групи: перша — група Masquelet — 39 пацієнтів, виключно бойові поранення; друга — група Ілізарова — 47 пацієнтів після бойових і небойових поранень.* ***Результати та висновки.*** *Техніка Masquelet і метод Ілізарова є ефективними методами лікування критичних дефектів великогомілкової кістки, ускладнених остеомієлітом, із частотою консолідації 97,4 і 100 % відповідно. Техніка Masquelet забезпечує вірогідно коротші терміни консолідації (168,08 ± 62,00 доби проти 258,18 ± 157,16 доби, p < 0,001), перевага становить 90 діб (3 місяці). Ця перевага підтверджена стратифікованим аналізом у підгрупах з дефектом 4–6 см (p = 0,002) і 6–9 см (p = 0,008). Наявність Klebsiella pneumoniae або Pseudomonas aeruginosa є несприятливим мікробіологічним предиктором тривалості консолідації незалежно від обраного методу (p < 0,05) і може потребувати повторної хірургічної санації та комбінованої цільової антибіотикотерапії. Оцінка за шкалою ASAMI не виявила статистично значущої різниці між методами щодо кісткових результатів (92,3 проти 83,3 %; p = 0,210). Функціональні результати демонструють тенденцію на користь техніки Masquelet (94,9 проти 83,3 %; p = 0,093).*

Ключові слова: *великогомілкова кістка; техніка Masquelet; дистракційний остеогенез; апарат зовнішньої фіксації; кістковий дефект; остеомієліт; критичний кістковий дефект; інфекція; «нещаслива тріада»*

Вступ

Сегментарні дефекти великогомілкової кістки, асоційовані з хронічним остеомієлітом, залишаються однією з найскладніших проблем реконструктивної ортопедії. В умовах збройного конфлікту в Україні потік пацієнтів з вогнепальними та мінно-вибуховими ураженнями суттєво зріс, що зробило питання вибору оптимальної хірургічної стратегії особливо актуальним. Техніка Masquelet (induced membrane technique) і дистракційний остеогенез за Ілізаровим є загальновизнаними методиками лікування, проте прямих порівняльних досліджень у вітчизняній літературі немає, а у

© «Травма» / «Trauma» («Travma»), 2026
© Видавець Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2026

Для кореспонденції: Омельченко Тарас Миколайович, доктор медичних наук, професор, кафедра травматології та ортопедії, Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, бульв. Тараса Шевченка, 13, м. Київ, 01601, Україна; e-mail: tnomelchenko@gmail.com; тел.: +380 (67) 945-03-63
For correspondence: Taras M. Omelchenko, MD, DSc, PhD, Professor, Department of Traumatology and Orthopedics, Bogomolets National Medical University, Taras Shevchenko boulevard, 13, Kyiv, 01601, Ukraine; e-mail: tnomelchenko@gmail.com; phone: +380 (67) 945-03-63
Full list of authors information is available at the end of the article.

світовій є лише досить обмежена кількість публікацій з невеликою кількістю хворих у групах.

Мета: провести порівняльний ретроспективний аналіз клінічних результатів застосування техніки Masquelet і методу Ілізарова при лікуванні критичних дефектів великогомілкової кістки, ускладнених остеомієлітом.

Матеріали та методи

У період з квітня 2017 по квітень 2025 року у відділенні кістково-гнійної хірургії ДУ «Національний інститут травматології та ортопедії НАМН України» було проліковано 167 пацієнтів із критичними дефектами великогомілкової кістки, ускладненими остеомієлітом.

Критерії включення до дослідження:

1. Критичний дефект великогомілкової кістки. За критичний дефект було прийнято сегментарний дефект кістки, що більше ніж удвічі перевищує діаметр ураженої кістки; таким чином нами були включені в дослідження пацієнти з мінімальним сегментарним дефектом 4 см.

2. Наявність хронічного остеомієліту великогомілкової кістки, підтвердженого клінічними, рентгенологічними й мікробіологічними дослідженнями. Хронічним вважався остеомієліт тривалістю не менше ніж 6 тижнів від моменту первинного інфікування з наявністю характерних морфологічних ознак некрозу кісткової тканини. Випадки гострого остеомієліту без хронізації процесу до дослідження не включалися.

3. Випадки, коли була застосована техніка Masquelet або методика Ілізарова з метою заміщення критичного дефекту великогомілкової кістки.

Критерії виключення:

1. Відсутність клініко-лабораторного підтвердження остеомієлітичного процесу в пацієнта.

2. Використання інших, окрім Masquelet або техніки Ілізарова, методик або їх комбінацій з метою заміщення дефекту кісткової тканини.

3. Порушення техніки виконання методики Masquelet або техніки дистракційного остеогенезу на різних етапах лікування.

4. Незавершені випадки лікування або неможливість відслідкувати віддалені результати лікування.

Критерії невключення:

1. Вік до 18 років на момент первинної госпіталізації.

2. Локалізація кісткового дефекту в іншій анатомічній ділянці: стегнова кістка, малогомілкова кістка, кістки стопи тощо.

3. Первинний (гематогенний) остеомієліт без попередньої травми чи оперативного втручання.

4. Розмір сегментарного кісткового дефекту, що не досягає критичного — менше ніж 2 діаметри ураженої великогомілкової кістки у відповідному сегменті (менше за 4 см).

5. Дефекти кісток унаслідок резекції з приводу первинної або метастатичної пухлини.

6. Тяжка декомпенсована соматична патологія в пацієнта, що обумовлювала абсолютні протипоказання до планового оперативного втручання.

Усім пацієнтам проводився комплекс клінічних, інструментальних, лабораторних і мікробіологічних методів обстеження. Клінічне обстеження включало оцінку загального стану пацієнта, локального статусу ураженої кінцівки (наявність норицевих ходів, характер і об'єм гнійних виділень, стан шкірних покривів і м'яких тканин, ступінь функціональних порушень). Рентгенологічне обстеження виконувалось у стандартних проєкціях на всіх етапах лікування — при госпіталізації, після кожного оперативного втручання й у динаміці спостереження — з метою визначення розміру кісткового дефекту, оцінки формування кісткового регенерату та відстеження процесу консолідації. Стан магістрального кровопостачання ураженої кінцівки оцінювався за допомогою ультразвукової доплерографії судин гомілки. Лабораторне обстеження передбачало загальний аналіз крові з лейкоцитарною формулою, визначення рівня С-реактивного білка, прокальцитоніну та швидкості осідання еритроцитів для моніторингу перебігу інфекційного процесу. Мікробіологічне дослідження проводилося шляхом посіву інтраопераційного матеріалу з визначенням збудника і його чутливості до антибактеріальних препаратів.

Відсутність рецидиву інфекційного процесу визначалася за сукупністю критеріїв, оцінених не менше ніж через 12 місяців після завершення основного етапу лікування: це відсутність норицевих ходів, нормалізація показників системних маркерів запалення (рівень С-реактивного білка, швидкість осідання еритроцитів, лейкоцитарна формула крові), відсутність ознак прогресуючої кісткової деструкції, відсутність потреби в повторному хірургічному втручанні з приводу рецидиву інфекційного процесу, відсутність місцевих клінічних ознак запалення.

Після застосування критеріїв включення та виключення нами були сформовані дві групи: перша — група Masquelet — 39 пацієнтів, виключно бойові поранення; друга — група Ілізарова — 47 пацієнтів після бойових і небойових поранень.

Загальна характеристика груп. Група пацієнтів, пролікованих за методикою дистракційного остеогенезу за Ілізаровим (апарат зовнішньої фіксації (АЗФ)), налічувала 47 пацієнтів, серед яких переважали чоловіки — 44 особи (93,6 %), жінок було 3 (6,4 %). Середній вік пацієнтів становив 42,08 ± 8,38 року, з діапазоном від 21 до 55 років. Середня давність травми на момент госпіталізації до спеціалізованого відділення становила 268,40 ± 165,12 дня (від 10 до 640 днів). До надходження у відділення пацієнтам було проведено від 2 до 12 хірургічних втручань.

Група пацієнтів, пролікованих за методикою Masquelet, налічувала 39 пацієнтів: 37 чоловіків (94,9 %) і 2 жінки (5,1 %). Середній вік становив 39,28 ± 10,16 року (від 19 до 65 років). Середня давність травми до госпіталізації становила 215,95 ± 114,83 дня (від 50 до 480 днів). Кількість хірургічних втручань до початку лікування за методикою Masquelet варіювала від 2 до 17.

Розміри кісткового дефекту. У групі АЗФ розподіл пацієнтів за розміром кісткового дефекту великогоміл-

кової кістки був таким: дефект від 4 до 6 см виявлено у 22 пацієнтів (47 %), дефект від 6 до 9 см — також у 22 пацієнтів (47 %), дефекти розміром 9 см і більше були наявними в 3 пацієнтів (6 %). Отже, переважна більшість пацієнтів мала дефекти в діапазоні 4–9 см.

У групі Masquelet дефект від 4 до 6 см зафіксовано у 18 пацієнтів (46,15 %), дефект від 6 до 9 см — у 13 пацієнтів (33,33 %), дефекти ≥ 9 см — у 8 пацієнтів (20,51 %). Порівняно з групою АЗФ у групі Masquelet спостерігалася вища частка пацієнтів з великими дефектами (≥ 9 см) — 20,51 проти 6 %.

Стан шкірних покривів. У групі АЗФ задовільний стан шкірних покривів відзначався лише в 1 пацієнта (2 %). Значна рубцева трансформація шкіри виявлена у 20 пацієнтів (55 %), а дефект шкірних покривів, що потребував хірургічного заміщення, — у 26 пацієнтів (43 %). Отже, у переважної більшості пацієнтів групи АЗФ спостерігалися виражені трофічні порушення шкіри гомілки.

У групі Masquelet картина принципово відрізнялася: задовільний стан шкіри зафіксовано у 24 пацієнтів (61,54 %), рубцева трансформація — у 7 пацієнтів (17,95 %), дефект шкірних покривів, що потребував попереднього ортопластичного заміщення, відзначався у 8 пацієнтів (20,51 %). Значно вища частка пацієнтів із задовільним станом шкіри у групі Masquelet відображає відомий принцип: методика Masquelet потребує адекватного м'якотканинного покриву як обов'язкової умови для успішного виконання.

Стан магістральних судин. Ушкодження магістральних судин гомілки з перебудовою кровообігу за колатеральним типом, підтверджене доплерографічним дослідженням, відзначалось у 14 пацієнтів групи АЗФ (30 %). У групі Masquelet ушкодження магістральних судин гомілки виявлено у 12 пацієнтів (30,77 %). Частота судинних порушень була практично ідентичною в обох групах, що свідчить про подібну тяжкість вихідного судинного статусу.

Стан периферичних нервів. У групі АЗФ ушкодження малогомілкового нерва діагностовано в 3 пацієнтів (6 %), ушкодження великогомілкового нерва — у 5 пацієнтів (11 %). У групі Masquelet ушкодження малогомілкового нерва відзначалось у 5 пацієнтів (12,82 %), ушкодження великогомілкового нерва — у 2 пацієнтів (5,13 %). Загальна частота периферичних нейропатій була подібною між групами, хоча в групі АЗФ переважало ушкодження великогомілкового нерва, тоді як у групі Masquelet — малогомілкового.

Стан м'язів гомілки. Ішемія скелетних м'язів гомілки зафіксована у 22 пацієнтів групи АЗФ (47 %) і 17 пацієнтів групи Masquelet (43,59 %). Значні дефекти м'язової тканини гомілки, що визначають порушення функціонального стану, виявлено в 15 пацієнтів групи АЗФ (32 %) і лише в 5 пацієнтів групи Masquelet (12,82 %). Отже, у групі АЗФ значно частіше спостерігалися значні дефекти м'язової тканини (32 проти 12,82 %), що відображає більшу тяжкість вихідного стану м'яких тканин у цій групі.

Мікробіологічні результати. В обох групах домінуючим збудником інфекційного процесу в ділянці кісткового дефекту був *Staphylococcus aureus*: у групі АЗФ — 21 пацієнт (45 %), у групі Masquelet — 19 пацієнтів (48,72 %).

Pseudomonas aeruginosa виявлено у 9 пацієнтів групи АЗФ (19 %) і 6 пацієнтів групи Masquelet (17,95 %). *Klebsiella pneumoniae* — у 8 пацієнтів групи АЗФ (17 %) і 6 пацієнтів групи Masquelet (17,95 %).

Escherichia coli виявлена в 3 пацієнтів групи АЗФ (7 %) і 5 пацієнтів групи Masquelet (12,82 %). *Enterobacter* spp. визначено у 2 пацієнтів групи АЗФ (4 %); у групі Masquelet цей збудник не зафіксований. Натомість у групі Masquelet виявлено *Acinetobacter* spp. у 2 пацієнтів (5,13 %), якого не відзначалось у групі АЗФ. *Proteus mirabilis* зустрічався у 2 пацієнтів групи АЗФ (4 %) і в 1 пацієнта групи Masquelet (2,56 %).

Загалом мікробіологічний склад обох груп був подібним: переважання грампозитивної кокової флори (*S. aureus*) із суттєвою часткою грамнегативних мікроорганізмів (*Pseudomonas aeruginosa, Klebsiella pneumoniae*), що характерно для хронічного посттравматичного остеомієліту після вогнепальних поранень.

Результати

Середня тривалість перебудови кісткового регенерату в групі АЗФ становила 258,18 ± 157,16 дня (від 120 до 1000 днів). Значний діапазон варіації пояснюється тяжкістю інфекційного процесу, станом м'яких тканин і кровопостачанням, а також рівнем комплаєнсу з пацієнтом. Полілокальний кістковий транспорт був застосований у 8 пацієнтів — 17 %, а кісткова автопластика на етапі стиковки була виконана в 13 пацієнтів — 27,6 %. Формування кісткового регенерату, здатного повноцінно переносити вагу тіла пацієнта, досягнуто в усіх 47 хворих (100 %).

У групі Masquelet середня тривалість консолідації кісткового трансплантату становила 168,08 ± 62,00 дня (від 100 до 370 днів). Перебудова кісткового трансплантату досягнута в усіх 39 пацієнтів (100 %). Рецидив інфекційного процесу спостерігався в 6 пацієнтів (15,4 %), що потребувало проведення повторної санації та респейсерування. Критичний лізис трансплантату, що потребував повторної кісткової пластики, відзначений у 3 пацієнтів (7,7 %). А використання так званих розширювачів об'єму на другому етапі при лікуванні за технікою Masquelet було в 38,5 % пацієнтів. Для остаточної фіксації на другому етапі в групі Masquelet найчастіше був використаний інтрамедулярний блокуючий стрижень — у 22 пацієнтів (56,4 %). Фіксація пластинами використана в 13 пацієнтів (33,3 %), переважно при локалізації дефекту в дистальному відділі великогомілкової кістки, де анатомічні умови обмежують застосування стрижня. У 4 пацієнтів (10,3 %) апарат зовнішньої фіксації залишено як остаточний метод стабілізації у зв'язку з незадовільним станом м'яких тканин.

Оцінку результатів лікування у групі АЗФ проведено за шкалою ASAMI [1]. Відмінні та добрі кісткові результати досягнуті в 41 пацієнта (83,7 %), відмінні та добрі функціональні результати — також у 41 паці-

єнта (83,7 %). Задовільні й незадовільні результати, як кісткові, так і функціональні, зафіксовані у 8 пацієнтів (16,3 %). У відстроченому періоді двом пацієнтам (4,3 %) була виконана ампутація кінцівки — через 1,5 і 2 роки після завершення лікування — внаслідок рецидиву інфекційного процесу та наростання трофічних розладів.

У групі Masquelet результати лікування також оцінено за шкалою ASAMI. Кісткові результати: відмінні — у 23 пацієнтів (59,0 %), добрі — у 13 (33,3 %), задовільні — у 2 (5,1 %), незадовільні — в 1 (2,6 %). Сукупна частка відмінних і добрих кісткових результатів становила 92,3 % (36 із 39 пацієнтів). Функціональні результати: відмінні — у 24 пацієнтів (61,5 %), добрі — у 13 (33,3 %), задовільні — в 1 (2,6 %), незадовільні — у 1 (2,6 %). Відмінні та добрі функціональні результати досягнуті в 94,9 % пацієнтів (37 із 39).

Порівняння між групами за шкалою ASAMI не виявило статистично значущої різниці в кісткових результатах: 92,3 % у групі Masquelet проти 83,3 % у групі АЗФ. Функціональні результати демонструють клінічно значущу тенденцію на користь техніки Masquelet (94,9 проти 83,3 %), яка не досягла рівня статистичної значущості при наявному розмірі вибірки.

Обговорення

Головною знахідкою цього дослідження є вірогідна перевага техніки Masquelet над методом Ілізарова за термінами загоєння кісткового дефекту — у середньому на 90 діб швидше ($p < 0,01$). Середній термін консолідації в групі Masquelet становив 168,08 ± 62,00 доби проти 258,18 ± 157,16 доби в групі Ілізарова. Принципово важливо, що ця перевага підтверджена при стратифікованому аналізі в підгрупах з дефектом 4–6 см ($p = 0,002$) і 6–9 см ($p = 0,008$). Клінічне значення різниці в 90 днів є суттєво значимим фактором, адже три місяці без апарата зовнішньої фіксації позитивно впливають на якість життя пацієнта та функціональний результат у подальшому. Отримані дані узгоджуються з результатами міжнародних досліджень: Ahmed et al. (2025) у систематичному огляді при оцінці > 1600 пацієнтів вказували, що середній час до консолідації при техніці Masquelet становить 5–7 місяців, тоді як при дистракційному остеогенезі — 8–14 місяців [2]. Morelli et al. (2016) у метааналізі на основі 731 клінічного спостереження показали, що тривалість лікування при техніці Masquelet коротша на 3,2 місяця ($p < 0,01$) [3].

Статистичний аналіз не виявив вірогідної різниці між групами за віком ($p = 0,07$), розміром кісткового дефекту ($p = 0,47$), станом кровопостачання ($p = 0,46$) та іннервації кінцівки ($p = 0,37$). Відсутність вірогідної різниці за розміром дефекту є особливо важливою: вона підтверджує, що розмір дефекту не був фактором при формуванні груп і не визначав вибір методу лікування ($p = 0,11$). Отже, виявлена різниця в термінах консолідації не може бути пояснена вихідними демографічними відмінностями або тяжкістю кісткового ураження і відображає реальне порівняння ефективності двох методик.

Таблиця 1. Результати лікування через 12 місяців

Показник	Група АЗФ (n = 47)	Група Masquelet (n = 39)
Консолідація		
Консолідація кісткового дефекту, n (%)	47 (100)	39 (100)
Середній термін консолідації (діб)	258,18 ± 157,16	168,08 ± 62,00
Кісткові результати (ASAMI)		
Відмінні (Excellent), n (%)	25 (52,1)	23 (59,0)
Добрі (Good), n (%)	15 (31,3)	13 (33,3)
Задовільні (Fair), n (%)	5 (10,4)	2 (5,1)
Незадовільні (Poor), n (%)	3 (6,3)	1 (2,6)
Відмінні + добрі, n (%)	40 (83,3)	36 (92,3)
Функціональні результати (ASAMI)		
Відмінні (Excellent), n (%)	22 (45,8)	24 (61,5)
Добрі (Good), n (%)	18 (37,5 %)	13 (33,3 %)
Задовільні (Fair), n (%)	5 (10,4)	1 (2,6)
Незадовільні (Poor), n (%)	3 (6,3)	1 (2,6)
Відмінні + добрі, n (%)	40 (83,3)	37 (94,9)
Ускладнення		
Рецидив інфекційного процесу, n (%)	–	6 (15,4)
Інфекція позакісткових елементів АЗФ, n (%)	34 (72,3)	–
Критичний лізис трансплантату, n (%)	–	3 (7,7)

Разом з тим групи суттєво відрізнялися за тяжкістю ушкоджень м'яких тканин та анамнезом захворювання, і ця відмінність заслуговує на окреме обговорення. Якість шкірних покривів у групі Masquelet була вірогідно кращою, ніж у групі АЗФ ($p < 0,01$), як і збереження м'язів гомілки. Кількість хірургічних втручань до початку реконструктивного лікування в групі АЗФ була вірогідно більшою ($p < 0,01$), що відображає значно складніший і триваліший доопераційний анамнез цих пацієнтів. Це свідчить про те, що групи формувалися відповідно до клінічних показань: пацієнти з більш тяжкими ушкодженнями м'яких тканин і стійкою мультирезистентною флорою частіше були проліковані за методикою Ілізарова. Слід зауважити, що саме на цьому фоні техніка Masquelet демонструє кращі часові показники у групі з більш сприятливими вихідними умовами, що лише підкреслює реальну ефективність методу Ілізарова. Водночас цей факт вказує на обов'язкову необхідність попередньої підготовки м'яких тканин як неодмінну умову застосування техніки Masquelet.

Masquelet & Begue (2010) категорично наголошують: будь-який дефект шкіри або некомпенсоване порушення кровопостачання є протипоказанням до виконання другого етапу до повного відновлення м'якотканинного покриву [4]. У нашій серії 26 пацієнтів (66,7 %) з групи Masquelet мали дефекти шкірних покривів, що потребували хірургічного заміщення. Наявність дефекту шкіри в значної кількості пацієнтів даної групи не означала абсолютну неможливість застосування техніки Masquelet, а вказувала на необхідність додаткових реконструктивних процедур як обов'язкового етапу лікування.

За наявності *Staphylococcus aureus* — найпоширенішого збудника в обох групах — консолідація в групі Masquelet наставала вірогідно швидше, ніж у групі Ілізарова, у середньому на ~90 діб ($p < 0,01$). Аналогічна ситуація спостерігалась і при *Klebsiella pneumoniae*: перевага Masquelet становила також ~90 діб. Принципово інша картина щодо *Pseudomonas aeruginosa*: при виявленні цього збудника вірогідної різниці в швидкості консолідації між методиками виявлено не було ($p = 0,16$). Ця знахідка має важливе клінічне значення: *Pseudomonas aeruginosa*, завдяки здатності до формування біоплівок і вираженій антибіотикорезистентності, здатна руйнувати індуковану мембрану й інгібувати остеогенез трансплантату [5]. Отже, наявність *Pseudomonas aeruginosa* нівелює часову перевагу методики Masquelet і є вагомим аргументом на користь методу Ілізарова або принаймні потребує обов'язкової цільової терапії та повторної мікробіологічної верифікації перед другим етапом.

На окрему увагу заслуговує аналіз підгрупи надвеликих дефектів (≥ 9 см). При таких розмірах вірогідної різниці в швидкості зрощення між методиками виявлено не було ($p = 0,27$). Основним обмеженням техніки Masquelet при великих дефектах є доступний об'єм автотрансплантату з крила клубової кістки. Karger et al. (2012) визначили оптимальні розміри для техніки Masquelet у межах до 8–10 см, хоча технічно описували випадки заміщення дефектів до 25 см [6]. У нашій серії єдина невдача в групі Masquelet сталась саме при дефекті 10 см з мікробіологічно визначеною *Pseudomonas aeruginosa*, що є поєднанням одразу двох несприятливих чинників. Метод Ілізарова, навпаки, принципово не обмежений розміром дефекту: ми успішно пролікували пацієнтів з дефектами до 15 см, що підтверджується даними Aktuglu et al. (2019) на вибірці 1779 пацієнтів [7].

Abulaiti et al. (2017) у систематичному огляді показали, що психологічний стрес, асоційований із тривалим носінням апарата Ілізарова, реєструється в 30–40 % пацієнтів, а в 1,6 % стає причиною ампутації за наполяганням самого хворого [8]. Попри 100% частоту консолідації в групі Ілізарова, необхідно враховувати сукупний тягар специфічних ускладнень цього методу. Середній термін лікування 258,18 ± 157,16 доби (≈ 8,6 місяця) в поєднанні з інфекціями позакісткових елементів апарата в 72,3 % пацієнтів суттєво ускладнює перебіг лікування. На особливу увагу заслуговують відстрочені ампутації у 2 пацієнтів (4,3 %) нашої групи Ілізарова через рецидив інфекції та трофічні ускладнення, що виникли через 1,5–2 роки після завершення лікування. Цей факт підкреслює принципову відмінність між кістковою консолідацією як технічним результатом і довготривалим функціональним успіхом лікування. Rohilla et al. (2016) описували схожий показник ампутацій у 4,2 % навіть після досягнення консолідації при великих інфікованих дефектах великогомілкової кістки [3].

Узагальнення всіх тверджень дозволяє сформулювати диференціальний клінічний алгоритм вибору методу лікування. Техніка Masquelet є методом вибору при дефектах до 9 см за умови наявності або технічної можливості досягнення задовільного стану м'яких тканин, відсутності *Pseudomonas aeruginosa* або можливості її ерадикації до другого етапу, а також у пацієнтів з низьким комплаєнсом щодо тривалого носіння апарата зовнішньої фіксації. Метод Ілізарова залишається незамінним при дефектах > 9 см, значних ушкодженнях м'яких тканин, що не підлягають заміщенню, за наявності агресивної мультирезистентної мікрофлори, а також у випадках, де необхідне одночасне виправлення кутових або ротаційних деформацій. Слід підкреслити, що обидва методи продемонстрували частоту консолідації до 100 %, тому вибір методики визначається насамперед очікуваним терміном лікування, оцінкою ризиків ускладнень та індивідуальними характеристиками пацієнта.

Відсутність статистично значущої різниці в кісткових результатах ASAMI між групами ($p = 0,210$) узгоджується з даними міжнародних метааналізів. Morelli et al. (2016) показали, що кісткові результати за шкалою ASAMI є порівнянними між методом Ілізарова та технікою Masquelet [9]. Rohilla et al. (2016) у проспективному рандомізованому дослідженні також не виявили статистично значущої різниці в кісткових результатах між методами ($p > 0,05$) [9].

Більш виражена тенденція до переваги техніки Masquelet за функціональними результатами ASAMI (94,9 проти 83,3 %; p = 0,093) має чітке клінічне пояснення. Функціональна компонента шкали ASAMI безпосередньо залежить від обсягу рухів у суглобах, наявності кульгавості та больового синдрому, що суттєво визначаються тривалістю іммобілізації. Середній термін лікування в групі АЗФ (258,18 ± 157,16 доби) майже в 1,5 раза перевищував аналогічний показник у групі Masquelet (168,08 ± 62,00 доби, p < 0,001), що є провідним чинником розвитку контрактур суглобів і м'язової атрофії — факторів, що знижують функціональну оцінку ASAMI незалежно від якості кісткового зрощення.

Принципово важливим є те, що статистичний аналіз не виявив вірогідної різниці між групами за розміром кісткового дефекту (p = 0,47), а розподіл пацієнтів за розміром дефекту є практично ідентичним в обох групах. Отже, числова перевага групи Masquelet за результатами ASAMI не пов'язана з відмінностями у вихідній тяжкості кісткового ураження і відображає реальний вплив тривалості лікування на функціональне відновлення пацієнта.

Факт досягнення 100% консолідації в групі АЗФ при одночасній наявності 16,7 % задовільних і незадовільних результатів ASAMI і 4,3 % відстрочених ампутацій підкреслює принципову відмінність між рентгенологічним зрощенням і повноцінним функціональним відновленням, що вимірюється за шкалою ASAMI і є кінцевою метою лікування пацієнта.

Висновки

1. Техніка Masquelet і метод Ілізарова є ефективними методиками лікування критичних дефектів великогомілкової кістки, ускладнених остеомієлітом, із частотою консолідації 97,4 і 100 % відповідно.

2. Техніка Masquelet забезпечує вірогідно коротші терміни консолідації (168,08 ± 62,00 доби проти 258,18 ± 157,16 доби, p < 0,001), перевага становить 90 діб (3 місяці). Ця перевага підтверджена при стратифікованому аналізі в підгрупах з дефектами 4–6 см (p = 0,002) і 6–9 см (p = 0,008).

3. Провідними предикторами тривалості консолідації для техніки Masquelet є розмір дефекту (ρ = 0,80, p < 0,001) і стан м'яких тканин (ρ = 0,36; p = 0,023). Метод найефективніший при дефектах до 9 см і можливості забезпечити задовільний покрив м'яких тканин.

4. Метод Ілізарова є незамінним при дефектах > 9 см, значних ушкодженнях м'яких тканин і в ситуаціях, коли забезпечити необхідний об'єм автотрансплантату неможливо. Однак він асоціюється з тривалим носінням апарата зовнішньої фіксації (у середньому 258 діб), специфічними ускладненнями (інфекція позакісткових елементів — 72,3 %) і ризиком відстрочених ампутацій (4,3 %).

5. Наявність *Klebsiella pneumoniae* або *Pseudomonas aeruginosa* є несприятливим мікробіологічним предиктором тривалості консолідації незалежно від обраного методу (p < 0,05) і може потребувати повторної хірургічної санації та комбінованої цільової антибіотикотерапії.

6. Оцінка за шкалою ASAMI не виявила статистично значущої різниці між методами в кісткових результатах (92,3 проти 83,3 %; p = 0,210). Функціональні результати демонструють тенденцію на користь техніки Masquelet (94,9 проти 83,3 %; p = 0,093), що пояснюється вірогідно коротшими строками іммобілізації, які запобігають розвитку контрактур суглобів і м'язової атрофії.

Перспективи подальших досліджень: проведення проспективного дослідження щодо вивчення можливостей використання методики Masquelet і техніки дистракційного остеогенезу за Ілізаровим у наведеної категорії пацієнтів; проведення порівняльних досліджень з іншими методиками заміщення дефектів кісткової тканини.

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

Список літератури

1. Ali OM, Amen ZM. Management of fibular hemimelia (congenital absence of fibula) using Ilizarov method in Sulaimani. European Scientific Journal. 2015;11:1857-7881.

2. Ahmed H, Shakshak M, Trompeter A. A review of the Masquelet technique in the treatment of lower limb critical-size bone defects. Ann R Coll Surg Engl. 2025;107(6):383-389.

3. Morelli I, Drago L, George DA, Gallazzi E, Scarponi S, Romano CL. Masquelet technique: myth or reality? A systematic review and meta-analysis. Injury. 2016;47(Suppl 6):S68-76.

4. Masquelet AC, Begue T. The concept of induced membrane for reconstruction of long bone defects. Orthop Clin North Am. 2010;41(1):27-37.

5. Panteli M, Giannoudi M, Pountos I, Giannoudis PV. Multidrug-resistant Gram-negative osteomyelitis: a 10-year study. Injury. 2018;49(10):1880-1887.

6. Karger C, Kishi T, Schneider L, Fitoussi F, Masquelet AC; French Society of Orthopaedic Surgery and Traumatology (SoFCOT). Treatment of posttraumatic bone defects by the induced membrane technique. Orthop Traumatol Surg Res. 2012;98(1):97-102.

7. Aktuglu K, Erol K, Vahabi A. Ilizarov bone transport and treatment of critical-sized tibial bone defects: a narrative review. J Orthop Traumatol. 2019;20(1):22.

8. Abulaiti A, Muheremu A, Kengedayir Y, Abudoureyimu A. The psychological impact of external fixation using the Ilizarov or Orthofix LRS method to treat tibial osteomyelitis with a bone defect. Injury. 2017;48(12):2842-2847.

9. Rohilla R, Siwach K, Devgan A, Singh R, Wadhwani J, Ahmed N. Outcome of distraction osteogenesis by ring fixator in infected, large bone defects of tibia. J Clin Orthop Trauma. 2016;7(Suppl 2):201-8.

Отримано/Received 30.06.2026
Рецензовано/Revised 10.08.2026
Прийнято до друку/Accepted 21.08.2026

Information about authors

I. Poliachenko, State Institution "National Institute of Traumatology and Orthopedics of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine; https://orcid.org/0000-0003-1814-4240; Scopus ID 6506344483

M. Gritsai, State Institution "National Institute of Traumatology and Orthopedics of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine

G. Kolov, State Institution "National Institute of Traumatology and Orthopedics of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine

A. Polovyi, Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine

A. Lysak, State Institution "Main Medical Clinical Center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine", Kyiv, Ukraine

T. Omelchenko, MD, DSc, PhD, Professor, Department of Traumatology and Orthopedics, Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine; e-mail: tnomelchenko@gmail.com; https://orcid.org/0000-0003-1722-0803; Scopus ID 57278917200

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.

I.V. Poliachenko[1], M.P. Gritsai[1], G.B. Kolov[1], A.S. Polovyi[2], A.S. Lysak[3], T.M. Omelchenko[2]
[1]State Institution "National Institute of Traumatology and Orthopedics of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine
[2]Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine
[3]State Institution "Main Medical Clinical Center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine", Kyiv, Ukraine

Treatment of patients with critical tibial defects complicated by osteomyelitis using the Masquelet technique and distraction osteosynthesis

Abstract. ***Background.*** The Masquelet technique (induced membrane technique) and distraction osteogenesis using the Ilizarov method are well-recognized methods for the treatment of patients with segmental defects of the tibia associated with chronic osteomyelitis. There are no direct comparative studies in the domestic literature, and in the international literature, there are only a fairly limited number of publications with a small number of patients in groups. The purpose was to conduct a comparative retrospective analysis of clinical outcomes when using the Masquelet technique and the Ilizarov method in the treatment of critical tibial defects complicated by osteomyelitis. ***Materials and methods.*** A total of 167 patients with critical defects of the tibia complicated by osteomyelitis were treated. After applying the inclusion and exclusion criteria, two groups were formed: the first one, Masquelet group, comprised 39 patients with exclusively combat-related injuries, while the second one, the Ilizarov group, included 47 patients with both combat- and non-combat-related injuries. ***Results and conclusions.*** The Masquelet technique and the Ilizarov method are effective treatments for critical tibial defects complicated by osteomyelitis, with consolidation rates of 97.4 and 100 %, respectively. The Masquelet technique results in significantly shorter healing times (168.08 ± 62.00 vs. 258.18 ± 157.16 days, $p < 0.001$), representing a 90-day (3-month) advantage. This advantage was confirmed in a stratified analysis in the 4–6-cm ($p = 0.002$) and 6–9-cm ($p = 0.008$) subgroups. The presence of *Klebsiella pneumoniae* or *Pseudomonas aeruginosa* is an unfavorable microbiological predictor of consolidation duration, regardless of the method chosen ($p < 0.05$), and may require repeat surgical debridement and combined targeted antibiotic therapy. Assessment using the ASAMI scale revealed no statistically significant difference between the methods in terms of bone outcomes (92.3 vs. 83.3 %; $p = 0.210$). Functional outcomes show a trend in favor of the Masquelet technique (94.9 vs. 83.3 %; $p = 0.093$).

Keywords: tibia; Masquelet technique; distraction osteogenesis; external fixation device; bone defect; osteomyelitis; critical bone defect; infection; "unfortunate triad"

УДК 616.711.1:612.76:004.942 *DOI: https://doi.org/10.22141/1608-1706.5.27.2026.1117*

Слинько Є.І., Нехлопочин О.С., Фортуненко В.І., Вербов В.В., Деркач Ю.В.
Інститут нейрохірургії ім. акад. А.П. Ромоданова НАМН України, м. Київ, Україна

Розподіл вертикального навантаження між опорними структурами та регіонарний напружений стан фіброзного кільця шийного відділу хребта під час згинання й розгинання: скінченно-елементне дослідження

Резюме. ***Актуальність.*** *Дегенеративні захворювання шийного відділу хребта є однією з провідних причин хронічного болю й неврологічного дефіциту. Однією з передумов їх розвитку вважають зміну розподілу навантаження між передніми і задніми опорними структурами. Кількісна оцінка розподілу в інтактному відділі потрібна для вивчення дегенерації та планування втручань з мінімальним впливом на суміжні сегменти.* ***Мета:*** *оцінити розподіл навантаження між дисками, суглобами та зв'язками на рівнях C2-C3 — C6-C7 під час згинання й розгинання і зіставити внутрішньодисковий тиск із напруженим станом секторів фіброзного кільця.* ***Матеріали та методи.*** *Скінченно-елементну модель C0-Th1 побудовано за даними комп'ютерної томографії. До потилиці прикладали вертикальну силу 50 Н, еквівалентну вазі голови, і задавали рух від +54,9° згинання до –44,5° розгинання (176 станів). Розподіл навантаження визначали методом діаграми вільного тіла, фіброзне кільце аналізували посекторно.* ***Результати.*** *У навантаженому нейтральному положенні через диски передавалося від 39 % зовнішнього навантаження на C4-C5 до 77 % — на C6-C7, через дуговідросткові суглоби — 28–57 %. Суглобовий шлях переважав на C4-C5, тоді як на C2-C3 у всьому діапазоні домінував дисковий. Внутрішньодисковий тиск становив 0,147–0,294 МПа. Під час згинання суглоби розмикалися, а натяг заднього зв'язкового комплексу створював протилежну реакцію, унаслідок чого вертикальна складова дискової сили сягала приблизно подвійного зовнішнього навантаження: тиск зростав до 0,940 МПа на C5-C6. Під час розгинання більшу частину навантаження на середньо- та нижньошийних рівнях сприймали суглоби. Піковий контактний тиск зростав у 3–5 разів і досягав 10,62 МПа на C3-C4. Горизонтальна складова контактної сили становила –124,2 Н, була спрямована дозаду і відображала значну зсувну компоненту. На C5-C6 відносно низький внутрішньодисковий тиск поєднувався зі зростанням еквівалентного напруження до 8,2 МПа і максимального головного напруження розтягу в передньому секторі кільця. Глобальна відповідь моделі узгоджувалася з опублікованими даними: обсяг рухів C2-C7 становив 59,1°, максимальний реакційний момент — 2,42 Н · м.* ***Висновки.*** *Розподіл навантаження між опорними структурами залежить від положення голови і рівня сегмента. Ці дані можуть слугувати референтною основою для оцінювання наслідків дегенеративних змін і хірургічних втручань. Внутрішньодисковий тиск не повністю характеризує стан периферичних відділів кільця і потребує доповнення аналізом еквівалентних і головних напружень.*

Ключові слова: *шийний відділ хребта; скінченно-елементний аналіз; розподіл навантаження; дуговідросткові суглоби; внутрішньодисковий тиск; фіброзне кільце*

Вступ

Дегенеративні захворювання шийного відділу хребта посідають одне з провідних місць серед причин хронічного болю і неврологічного дефіциту в дорослих. Їхні клінічні прояви варіюють від локального болю в шиї та обмеження рухливості до корінцевих синдромів і мієлопатії, зумовлених компресією нервових структур грижовими випинаннями міжхребцевого диска, остеофітами й гіпертрофованими елементами заднього опорного комплексу [1–4].

© «Травма» / «Trauma» («Travma»), 2026
© Видавець Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2026

Для кореспонденції: Нехлопочин Олексій Сергійович, PhD, старший науковий співробітник відділу спінальної нейрохірургії, Інститут нейрохірургії імені акад. А.П. Ромоданова, вул. Платона Майбороди, 32, Київ, 04050, Україна; e-mail: AlexeyNS@gmail.com, тел.: +380 (95) 033-04-48
For correspondence: Oleksii S. Nekhlopochyn, PhD, Senior Research Associate in the Department of Spinal Neurosurgery, Romodanov Neurosurgery Institute, 32 Platona Maiborody st., Kyiv, 04050, Ukraine; e-mail: AlexeyNS@gmail.com, phone: +380 (95) 033-04-48
Full list of authors information is available at the end of the article.

Передня шийна дискектомія зі спондилодезом залишається основним методом хірургічного лікування при компресії нервових структур на рівні міжхребцевого диска [5, 6]. Усуваючи джерело компресії, втручання водночас змінює умови передавання навантаження як в оперованому, так і в суміжних сегментах: усунення рухливості на одному рівні супроводжується перерозподілом навантаження на суміжні сегменти. Такий перерозподіл розглядають як один з можливих механізмів дегенерації суміжних рівнів, яку виявляють у віддаленому періоді в значної частини оперованих хворих [7, 8].

Розуміння механізмів цього перерозподілу потребує уявлення про те, як осьове навантаження розподіляється в інтактному шийному відділі [9]. Шийний відділ є багатокомпонентною опорною структурою, у якій навантаження від ваги голови передається через передню колону — тіла хребців і міжхребцеві диски — і через задній опорний комплекс, утворений дуговідростковими (фасетковими) суглобами. Зв'язковий апарат обмежує надмірну рухливість і бере участь у перерозподілі навантаження під час руху. Порушення балансу між цими шляхами передавання розглядають як один з механізмів дегенеративного ураження сегмента [10, 11].

Традиційно осьову опорну функцію пов'язують переважно з міжхребцевим диском, тоді як дуговідростковим суглобам відводять роль обмежувачів руху, які вмикаються здебільшого під час розгинання. Водночас дані експериментальних і розрахункових досліджень свідчать, що задній опорний комплекс бере участь у передаванні осьового навантаження і в нейтральному положенні, а його внесок суттєво залежить від положення голови та рівня сегмента [12–14].

Клінічне значення має не лише величина навантаження на диск, а і його розподіл усередині диска. Формування грижових випинань пов'язують з ушкодженням волокон фіброзного кільця на тлі дегенеративних змін пульпозного ядра, причому переважно задня і задньобічна локалізація випинань визначає ризик компресії спинного мозку і корінців спинномозкових нервів [15]. Відповідно напружений стан окремих секторів фіброзного кільця під час фізіологічних рухів становить самостійний клінічний інтерес, проте вивчений істотно менш докладно, ніж стан пульпозного ядра [16, 17].

Внутрішньодисковий тиск широко застосовують як показник навантаження диска, і він добре охарактеризований в експериментальних працях [18–20]. Проте тиск у пульпозному ядрі відображає переважно гідростатичний стан центральної частини диска й не характеризує напруженого стану периферичних відділів фіброзного кільця, які сприймають розтягувальне та зсувне навантаження під час згинання. Якою мірою низький внутрішньодисковий тиск або його зниження відповідає дійсному розвантаженню диска як цілого, залишається недостатньо вивченим [21]. Це питання має пряме клінічне застосування: якщо розвантаження ядра може поєднуватися зі зростанням напружень у кільці, то оцінювання стану диска лише за тиском здатне недооцінювати навантаження на його периферичні відділи.

Пряме вимірювання розподілу навантаження між структурами сегмента в живому організмі недоступне, а кадаверні експерименти обмежені можливістю реєструвати лише окремі величини. Скінченно-елементне моделювання дає змогу водночас оцінювати механічну відповідь різних структур сегмента в усьому діапазоні руху [22–25]. Проте інтерпретація результатів залежить від обраних граничних умов, властивостей матеріалів і точності відновлення силового балансу.

Метою дослідження була кількісна оцінка розподілу вертикального навантаження, що імітує вагу голови, між міжхребцевими дисками, дуговідростковими суглобами та зв'язковим комплексом на рівнях C2-C3 — C6-C7 під час згинання й розгинання, а також зіставлення внутрішньодискового тиску з напруженим станом переднього і заднього секторів фіброзного кільця.

Матеріали та методи

Скінченно-елементна модель

Дослідження виконано з використанням тривимірної скінченно-елементної моделі шийного відділу хребта, побудованої на підставі даних комп'ютерної томографії 36-річної пацієнтки без клінічних і КТ-ознак патології шийного відділу хребта. Модель охоплює неперервний сегмент від потиличної кістки (C0) до першого грудного хребця (Th1) і містить 71 113 вузлів і 243 939 скінченних елементів.

Кісткові структури дискретизовано тетраедральними елементами першого порядку з роздільним моделюванням кортикального та губчастого шарів. Міжхребцеві диски й суглобовий хрящ дискретизовано гексаедральними елементами. Кожен із шести дисків складається з 2300 елементів: 1300 елементів пульпозного ядра та 1000 елементів фіброзного кільця, розподілених по двадцяти концентричних шарах із почерговим кутом армування. Суглобовий хрящ дискретизовано 8256 гексаедральними елементами. Текторіальну мембрану і поперечну зв'язку атланта змодельовано трикутними оболонковими елементами (1020 елементів). Потиличну кістку змодельовано оболонкою з 4355 трикутних елементів і визначено як жорстке тіло.

Під час побудови скінченно-елементної моделі використано методику, запропоновану M.R. Herron і співавт. [23]. Водночас вихідний підхід було модифіковано й розширено. На відміну від моделі, описаної авторами, у якій нижні шийні й верхньогрудні структури використовували переважно як опорну ділянку, у розробленій нами моделі хребці C7 і Th1 не об'єднували в єдине недеформівне тіло, а подали як самостійні деформівні структури. Завдяки цьому рівень C7-Th1 разом з міжхребцевим диском, дуговідростковими суглобами та зв'язковим апаратом було повноцінно включено до розрахункової ділянки, що дало змогу аналізувати його кінематичні й напружено-деформовані характеристики. Крім того, параметри матеріалів окремих анатомічних компонентів уточнено на підставі даних сучасніших публікацій (табл. 1) [26–47].

Підготовку скінченно-елементної моделі, виконання числових розрахунків і постпроцесинговий аналіз результатів здійснювали в програмному середовищі FEBio Studio версії 3.1.0 з використанням розв'язувача FEBio версії 4.12 [48]. Програмний комплекс розроблено Weiss Laboratory Університету Юти та Ateshian Laboratory Колумбійського університету (США); він поширюється як програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом за ліцензією MIT.

Тип аналізу — квазістатичний нелінійний з автоматичним керуванням кроком; критерії збіжності методу Ньютона: відносна нев'язка за переміщеннями 0,001, відносна нев'язка за енергією 0,01. Для пульпозного ядра ($\nu = 0,49$) застосовано трипольове формулювання гексаедральних елементів, яке запобігає ефекту об'ємного блокування.

Властивості матеріалів

Властивості матеріалів моделі подано в табл. 1.

Зв'язковий апарат

Зв'язки подано нелінійними пружинними елементами, об'єднаними в набори: передня поздовжня зв'язка, задня поздовжня, капсули дуговідросткових суглобів C2-Th1, жовта зв'язка, міжостьова, капсули суглобів C0-C1 і C1-C2, комплекс верхньошийних зв'язок (крилоподібні, верхівкова, передня та задня атлантопотиличні мембрани).

Кожна пружина працює за індивідуальною нелінійною кривою «сила — видовження», масштабованою коефіцієнтом, що дорівнює площі поперечного перерізу відповідної зв'язки, яка припадає на одну пружину. Масштабні коефіцієнти становлять: передня і задня поздовжні зв'язки — 0,200 мм^2; міжостьова — 0,167 мм^2; капсула суглоба — 0,050 мм^2; жовта зв'язка — 0,043 мм^2. Усі криві містять зону провисання: при від'ємному видовженні сила дорівнює нулю, що відтворює нездатність зв'язки чинити опір стисненню.

Контактні взаємодії

У моделі відтворено суглобові контакти на восьми рівнях — C0-C1, C1-C2, C2-C3, C3-C4, C4-C5, C5-C6, C6-C7 і C7-Th1. На кожному рівні окремо моделювали праве та ліве зчленування, що загалом становило 16 контактних взаємодій. Суглобові поверхні задавали як ковзний контакт без тертя з можливістю розмикання і без передавання розтягувальних зусиль. Контактну взаємодію реалізовували двопрохідним методом доповнених множників Лагранжа з автоматичним визначенням штрафного коефіцієнта.

Навантаження та граничні умови

Нижню поверхню Th1 жорстко закріплювали за всіма ступенями свободи. Навантаження прикладали до жорсткого тіла C0; воно охоплювало два компоненти.

Перший компонент — вертикальна сила 50 Н, що імітує вагу голови. Силу прикладали до центра мас жорсткого тіла C0 і спрямовували вертикально вниз. Навантаження лінійно зростало у фазі осідання ($t = 0...1$), після чого залишалося сталим. Інших об'ємних і поверхневих навантажень не задавали. Початкового тиску в пульпозному ядрі штучно не задавали; він формувався внаслідок дії вертикального навантаження та кінематично заданого руху голови.

Другим компонентом був кінематично заданий рух голови: заданий поворот жорсткого тіла C0 у сагітальній площині $\theta(t)$ і пов'язане з поворотом горизонтальне зміщення $x(\theta)$. Траєкторія відтворювала дугу руху голо-

Таблиця 1. Властивості матеріалів моделі

Структура	Тип елемента	Модель матеріалу	Параметри
Кортикальна кістка	tet4	Ортотропна пружна	$E_1 = E_2 = 8000$ МПа; $E_3 = 12\,000$ МПа; $G_{12} = 2857$ МПа; $G_{23} = G_{13} = 3677$ МПа; $\nu_{12} = 0,40$; $\nu_{23} = \nu_{13} = 0,25$
Губчаста кістка	tet4	Neo-Hookean	$E = 100$ МПа; $\nu = 0,3$
Пульпозне ядро	hex8	Neo-Hookean (three-field)	$E = 1$ МПа; $\nu = 0,49$
Фіброзне кільце: матриця	hex8	Holmes-Mow	$E = 5$ МПа; $\nu = 0,4$; коефіцієнт нелінійності $\beta = 3,4$
Фіброзне кільце: волокна	hex8	Fiber-exp-pow, дві родини	$\xi = 0,296$ МПа; $\alpha = 65$; $\beta = 2$; кут армування ±45° (периферія) ... ±25° (центр)
Суглобовий хрящ	hex8	Neo-Hookean	$E = 10$ МПа; $\nu = 0,3$
Текторіальна мембрана	tri3 (оболонка)	Neo-Hookean	$E = 10$ МПа; $\nu = 0,3$; товщина 1,0 мм
Поперечна зв'язка атланта	tri3 (оболонка)	Neo-Hookean	$E = 70$ МПа; $\nu = 0,3$; товщина 1,0 мм
Зв'язки	Нелінійні пружини	Індивідуальні криві «сила — видовження» із зоною провисання	

Примітка: волокна фіброзного кільця працюють винятково на розтяг і не сприймають стискальних напружень; кут армування змінюється від ±45° у зовнішніх шарах до ±25° у внутрішніх.

ви, попередньо отриману для цієї моделі при навантаженні чистим моментом. Вертикальне переміщення голови залишали вільним; переміщення й повороти поза сагітальною площиною блокували.

М'язовий апарат у моделі не відтворювали: рух голови задавали кінематично, а не активними силами. Момент, потрібний для відтворення траєкторії, реєстрували як реакційний момент жорсткого тіла C0.

У межах досягнутої збіжності траєкторія охоплювала діапазон від +54,9° згинання до –44,5° розгинання. Усього отримано 176 станів рівноваги. За нейтральне приймали положення, у якому вертикальне навантаження було прикладене повністю, а кут згинання-розгинання голови становив менш ніж 0,1° за модулем. Від цього стану відлічували зміни всіх показників.

Загальний вигляд скінченно-елементної моделі подано на рис. 1.

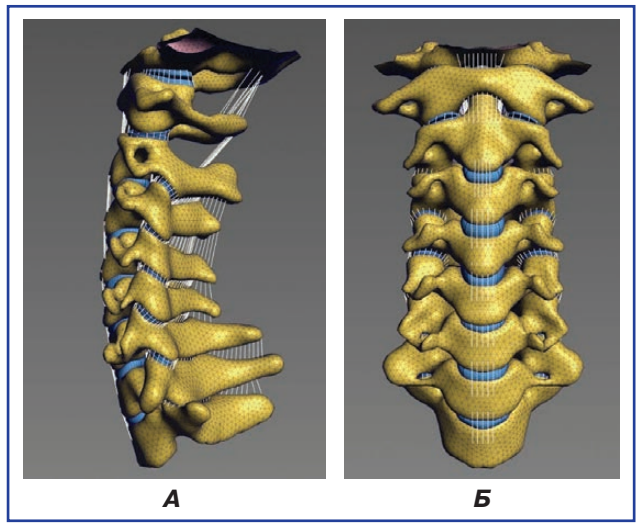


Рисунок 1. Скінченно-елементна модель, використана для аналізу: А) вигляд збоку; Б) вигляд спереду

Розрахунок розподілу навантаження: діаграма вільного тіла

Розподіл вертикального навантаження визначали методом діаграми вільного тіла, а не опосередкованим оцінюванням. Для кожного сегмента в кожному зі 176 станів обчислювали три рівнодійні сили, прикладені до вищерозташованого хребця.

Рівнодійну через диск визначали інтегруванням напружень по січній площині, проведеній через центр диска перпендикулярно до його осі в деформованій конфігурації:

$$F_диск = \Sigma\ (\sigma_e \cdot n) \cdot A_e,$$

де σ_e — тензор напружень Коші елемента; n — нормаль до січної площини (визначали методом головних компонент за вузлами диска); A_e — площа перерізу елемента, оцінювана як A_e = V_e/h_e (V_e — об'єм елемента, h_e — його протяжність уздовж n).

Такий підхід ураховує клиноподібну деформацію та неоднорідність товщини диска краще, ніж об'ємне усереднення, при якому товщина і напруження виявляються корельованими. Наближення A = V/h — основне джерело нев'язки балансу: воно не дає точної площі перетину для довільно деформованого елемента. Якість відновлення силового балансу охарактеризовано величиною нев'язки.

Рівнодійну в суглобі обчислювали як векторну суму вузлових контактних сил за лівою і правою ведучими (master) поверхнями. Використання лише ведучих поверхонь унеможливлювало подвійний облік, оскільки ведуча й ведена поверхні контактної пари несли рівні та протилежно спрямовані сили.

Рівнодійну зв'язок обчислювали як векторну суму, а не як суму модулів. Для кожної пружини визначали, який з її вузлів належав вищерозташованому хребцю, після чого відповідний вектор сили натягу прикладали до цього хребця. Належність вузлів визначали методом аналізу зв'язності кісткових елементів.

Внутрішньодисковий тиск обчислювали як гідростатичну складову тензора напружень у ядрі: IDP = $= -(\sigma xx + \sigma yy + \sigma zz)/3$; додатне значення відповідало стисненню. Головні напруження $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ визначали як власні значення тензора напружень кожного елемента.

Піковий контактний тиск визначали як максимальне вузлове значення контактного тиску на об'єднаних правій і лівій суглобових поверхнях відповідного рівня.

Показники розподілу навантаження

Для характеристики розподілу навантаження розраховували два показники з різним фізичним змістом.

Частка прикладеного вертикального навантаження. Вертикальне переміщення голови залишали вільним, тому єдиною зовнішньою вертикальною силою було навантаження 50 Н. Для кожного шляху передавання розраховували:

$$S_диск = F_диск, z/50\ Н;\ S_суглоб = F_суглоб, z/50\ Н;\ S_зв'язки = F_зв'язки, z/50\ Н.$$

Ділянка значень S не обмежена інтервалом від 0 до 100 %: за умови протилежно спрямованих сил окремі частки набувають від'ємних значень, а сума решти перевищує 100 %. Такі значення відображають внутрішню силову рівновагу сегмента. Нев'язку балансу визначали як R = 100 % – S_диск – S_суглоб – S_зв'язки.

Індекс відносного переважання суглобової сили. Показник унормовано на суму модулів нормальних компонент двох опорних шляхів:

$$I_суглоб = |F_суглоб, n|/(|F_суглоб, n| + |F_диск, n|) \times 100\ \%.$$

Показник є безрозмірним і не унормований на величину прикладеного навантаження; він не становить частки від прикладених 50 Н. Застосування показника має певні обмеження: при компресійних нормальних компонентах обох шляхів він характеризує співвідношення двох компресійних шляхів передавання, тоді як при зміні знаку дискової компоненти (перехід диска до осьового розтягу) її модуль зберігається в знаменнику, і

індекс відображає співвідношення модулів протилежно спрямованих сил. Це обмеження істотне для інтерпретації значень у положеннях вираженого розгинання.

Оцінювані показники та статистика

Статистичні характеристики добирали з урахуванням фізичного змісту показника та можливої зміни його знаку. Для внутрішньодискового тиску використовували медіану. Для максимального головного напруження σ_1 використовували 95-й перцентиль, що характеризував верхню частину розподілу його значень; під час секторного аналізу фіброзного кільця додатково визначали медіану σ_1 і частку елементів із $\sigma_1 > 0$, які характеризують відповідно типовий стан елементів і поширеність розтягувальної максимальної головної компоненти. Для мінімального головного напруження σ_3 використовували 5-й перцентиль. Для еквівалентного напруження за Мізесом і максимального дотичного напруження використовували 95-й перцентиль, для відносного об'єму J — середнє значення.

Знак напруженого стану визначали поелементно за всією множиною елементів: від'ємний 95-й перцентиль σ_1 не виключає додатних значень у верхніх 5 % елементів розподілу.

Диски розділено на шість рівнів методом аналізу зв'язності сітки. Фіброзне кільце розділено на чотири сектори за азимутальним кутом навколо центра диска: передній ($|\varphi| \leq 45°$), задній ($|\varphi| \geq 135°$), лівий і правий бічні. Порівняльний аналіз між рівнями виконано за переднім і заднім секторами, які відображають передньозадній перерозподіл навантаження, що становить предмет цього дослідження.

Усі статистичні розрахунки та побудову графіків виконували у вільному програмному середовищі R, що поширюється за ліцензією GNU General Public License (GPL), з використанням безкоштовної версії інтегрованого середовища розробки RStudio Desktop 2024.12.1+563 Kousa Dogwood (ліцензія GNU Affero General Public License, AGPL v3; Posit Software, PBC, Boston, MA, США).

Результати

Перевірка силової рівноваги

На рівні C1-C2, де міжхребцевий диск анатомічно відсутній, основним компресійним шляхом передавання навантаження були суглобові поверхні. У навантаженому нейтральному положенні їхня вертикальна контактна сила становила 49,9 Н при прикладеному навантаженні 50 Н, що вказує на мінімальний внесок вертикальних складових верхньошийних зв'язок і мембран та підтверджує внутрішню узгодженість передавання навантаження в моделі.

Якість відновлення силового балансу оцінювали за величиною нев'язки R. Її розподіл за рівнями та положеннями в скороченому вигляді наведено нижче.

Середня нев'язка балансу за всіма сегментами та положеннями становила 10 %, медіанна — 10 %, максимальна — 39 %. У діапазоні ±5° відносно нейтрального положення середня нев'язка дорівнювала 5 %, медіанна — 4 %, максимальна — 12 %; найбільші значення спостерігали в крайніх положеннях: у фазі згинання (понад +30°) середня нев'язка — 13 %, максимальна — 39 %, у фазі розгинання (менше ніж −30°) — 10 і 36 % відповідно.

Основними джерелами нев'язки були поелементне усереднення тензора напружень у вихідних даних розв'язувача і наближене оцінювання площі перетину елемента січною площиною. Найбільші значення нев'язки припадали на крайні положення при вираженій клиноподібній деформації диска.

Кінематика та реакційний момент

Кут Кобба C2-C7 становив +20,8° у навантаженому нейтральному положенні, −15,3° при максимальному згинанні та +43,8° у крайньому досягнутому розгинанні (−44,5°). Повний обсяг рухів субаксіального відділу дорівнював 59,1° при популяційній нормі 55,3 ± ± 16,0°.

Сегментарний обсяг рухів становив 12,1° для C2-C3, 13,7° для C3-C4, 12,2° для C4-C5, 11,6° для C5-C6 і 9,5° для C6-C7. Перші чотири значення перебували в межах норми 10,0–16,4°; рівень C6-C7 демонстрував дещо меншу рухливість, що може бути пов'язано з близькістю до жорстко закріпленої основи.

Реакційний момент становив 0,95 Н · м у нейтральному положенні, досягав максимуму 2,42 Н · м під час згинання і знижувався до 0,51 Н · м при максимальному розгинанні. Максимальне значення не перевищувало верхньої межі діапазону моментів, які зазвичай застосовують під час експериментального тестування шийного відділу хребта (1,0–2,5 Н · м).

Сегментарні кути в навантаженому нейтральному положенні становили: C2-C3 — +9,3°, C3-C4 — −1,1°, C4-C5 — +2,7°, C5-C6 — +7,0°, C6-C7 — +2,8°. Лордозна дуга була нерівномірною: найбільший сегментарний лордоз припадав на C2-C3, тоді як сегмент C3-C4 перебував у незначному кіфозі. Вершина лордозної дуги в навантаженому стані припадала на тіло C4: його зміщення від хорди C2-C7 становило +5,23 мм проти +5,01 мм у C5 і +3,57 мм у C3.

У фазі осідання під дією вертикального навантаження шийний лордоз зростав з 16,8° до 20,8°. Приріст розподілявся між сегментами нерівномірно: C3-C4 — +2,4°, C2-C3 — +1,8°, C4-C5 — +0,9°, C5-C6 — +0,6°, тоді як кут C6-C7 змінювався на 1,7° у кіфотичному напрямку. Отже, вертикальне навантаження не лише збільшувало лордоз, а й перебудовувало його форму. Отримане під навантаженням значення 20,8° було порівнянним із клінічною нормою 13,9 ± 12,3°, оскільки рентгенологічні вимірювання виконують у положенні стоячи, тобто під вагою голови.

Розподіл вертикального навантаження: трикомпонентний баланс

Прикладене вертикальне навантаження 50 Н розподілялося між трьома шляхами передавання. Їхні частки, обчислені за формулами згідно з описаною методикою, подано в табл. 2.

У навантаженому нейтральному положенні диск передавав від 39 % (C4-C5) до 77 % (C6-C7) прикладеного вертикального навантаження, дуговідросткові суглоби — від 28 % (C6-C7) до 57 % (C4-C5). Внесок зв'язкового комплексу у вертикальний баланс у навантаженому нейтральному положенні був невеликим: його частка не перевищувала 9 % за модулем; від'ємний знак відповідав спрямованій донизу силі, яка додатково притягувала вищерозташований хребець, тобто зв'язки не підтримували, а злегка притягували вищерозташований хребець.

Як ілюстрацію на рис. 2 подано розподіл еквівалентних напружень за Мізесом у міжхребцевих дисках у різних функціональних положеннях шийного відділу хребта.

При максимальному згинанні контактна сила в дуговідросткових суглобах дорівнювала нулю на всіх субаксіальних рівнях унаслідок розмикання суглобових поверхонь. Водночас розрахункова вертикальна складова дискової сили становила 198–226 % прикладеного навантаження, а внесок зв'язкового комплексу — від –113 до –150 %. Натяг заднього зв'язкового комплексу і суглобових капсул створював додаткову компресійну силу, що передавалася через диск. Отже, вертикальна складова дискової сили приблизно вдвічі перевищувала вагу голови. З огляду на зростання нев'язки балансу в крайніх положеннях ці значення слід тлумачити як оцінкові.

Наведені частки розраховано відносно глобальної вертикальної осі. При великих кутах вона істотно відхиляється від локальної осі сегмента, тому ці значення не тотожні стисненню вздовж нормалі до замикальних пластинок.

При максимальному розгинанні (–44,5°) основна частина вертикального навантаження на середньо- та нижньошийних рівнях передавалася через дуговідросткові суглоби. Частка суглобів зростала до 91–141 % на рівнях C3-C4, C4-C5, C5-C6 і C6-C7, тоді як частка диска на рівнях C4-C5 і C5-C6 набувала від'ємних значень (–9 і –18 % відповідно). Від'ємний знак означав, що розрахункова вертикальна складова рівнодійної сили через диск була спрямована вгору, тобто диск не підтримував, а притягував вищерозташований хребець. Зв'язковий комплекс під час розгинання створював додаткове притягання (–10...–35 %), зумовлене натягом передньої поздовжньої зв'язки та капсул.

Рівень C2-C3 вирізнявся іншою поведінкою: під час розгинання його диск зберігав додатну частку (86 %), а суглоби несли лише 27 %. Отже, на рівні C2-C3 в усіх положеннях переважав дисковий шлях передавання навантаження.

Індекс відносного внеску суглобового шляху передавання навантаження

У навантаженому нейтральному положенні індекс I_суглоб становив 60 % на C4-C5, 51 % на C3-C4, 43 % на C5-C6, 31 % на C2-C3 і 27 % на C6-C7. При розгинанні до –35° він сягав 98 % на C4-C5 і C5-C6, тоді як на C2-C3 не перевищував 41 % (рис. 3).

Таблиця 2. Частки прикладеного вертикального навантаження (S = F_z/50 H), %

Сегмент	Диск	Суглоб	Зв'язки	Нев'язка R
Нейтральне положення				
C2-C3	67	30	–2	5
C3-C4	47	48	–3	9
C4-C5	39	57	–1	5
C5-C6	50	38	0	12
C6-C7	77	28	–9	4
Крайнє згинання				
C2-C3	201	0	–140	39
C3-C4	226	0	–150	24
C4-C5	210	0	–138	28
C5-C6	198	0	–117	19
C6-C7	204	0	–113	8
Крайнє розгинання				
C2-C3	86	27	–24	11
C3-C4	39	103	–35	–6
C4-C5	–9	141	–31	–1
C5-C6	–18	91	–10	36
C6-C7	14	99	–11	–2

Примітка: компоненти округлено до цілих відсотків; нев'язку R розраховано за неокругленими значеннями, тому візуальна сума рядка може відрізнятися від наведеної нев'язки в межах 1 %.

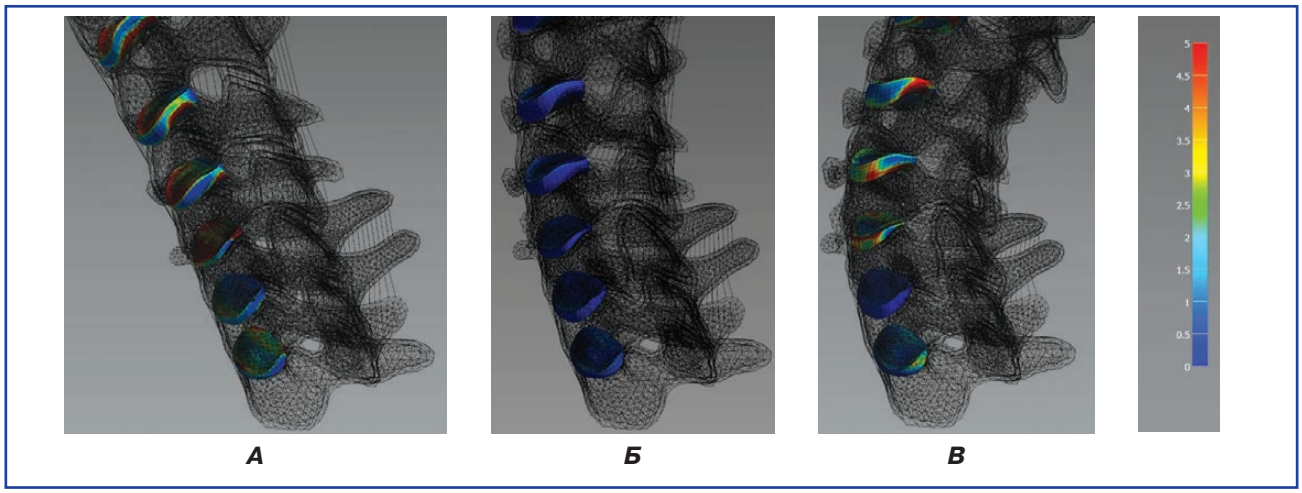


Рисунок 2. Розподіл еквівалентних напружень за Мізесом ($\sigma_{екв}$, МПа) у міжхребцевих дисках у різних функціональних положеннях шийного відділу хребта: А) максимальне згинання (+54,9°); Б) навантажене нейтральне положення (0°); В) максимальне розгинання (–44,5°)

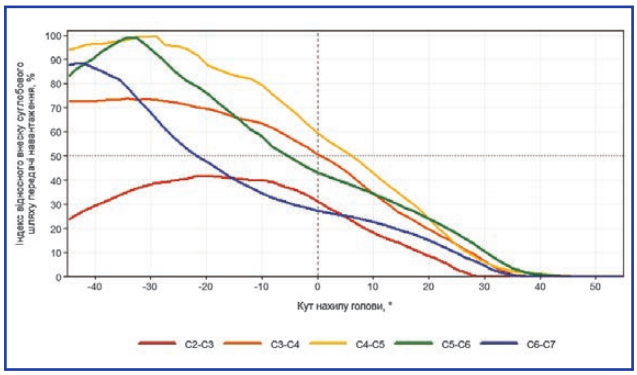


Рисунок 3. Індекс відносного переважання суглобової сили I_суглоб залежно від кута згинання/розгинання голови (від'ємні значення — розгинання, додатні — згинання). Значення 50 % відповідає рівності модулів нормальних компонент суглобової та дискової сили

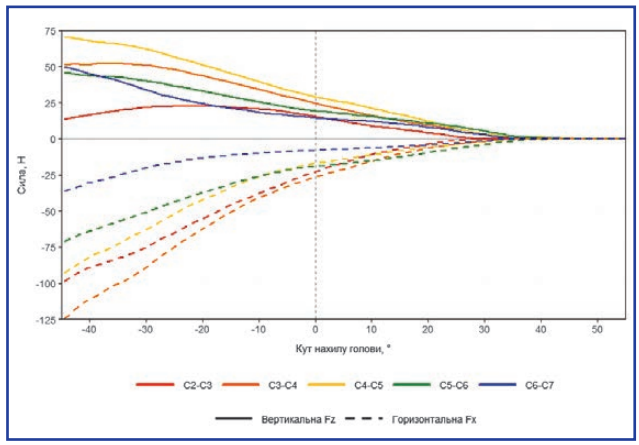


Рисунок 4. Вертикальна (F_z) і горизонтальна (F_x) складові контактної сили в дуговідросткових суглобах. Від'ємне значення F_x відповідає напряму дозаду

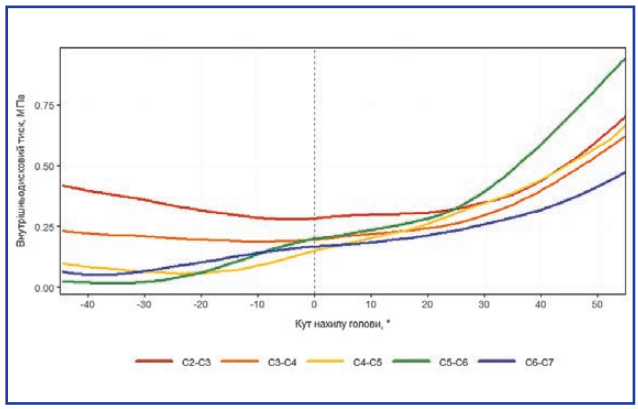


Рисунок 5. Внутрішньодисковий тиск у пульпозному ядрі на рівнях C2-C3 — C6-C7 (медіана за елементами ядра)

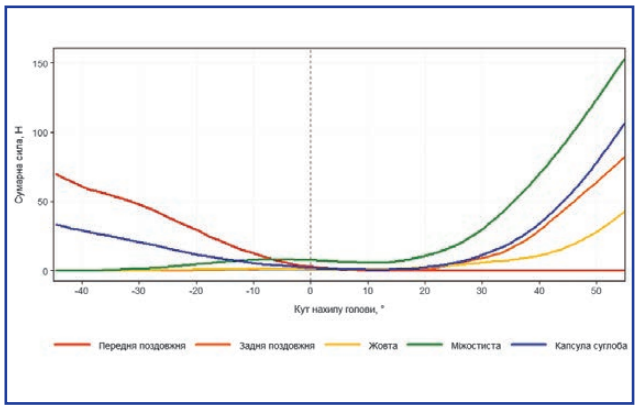


Рисунок 6. Скалярна сума натягів пружин за групами зв'язок залежно від кута згинання-розгинання голови

Послідовність наростання суглобової компоненти навантаження

Суглобова компонента навантаження наростала на різних рівнях неодночасно. Аналіз кутів досягнення порогових значень індексу виявив певну міжрівневу послідовність. Наведені кути відповідають досягненню заданого значення індексу, але не моменту первинного контакту суглобових поверхонь. Визначення моменту вмикання суглоба потребувало б аналізу першої усталеної появи контактної сили або площі контакту, якого в цій роботі не проводили.

Рівень C4-C5 першим досягав індексу 25 % — при +20°, а рівності суглобової та дискової нормальних компонент (індекс 50 %) — при +6°, тобто ще до нейтрального положення. Для C3-C4 рівність досягалася в нейтралі, для C5-C6 — при –5°, для C6-C7 — при –22°. На рівні C2-C3 індекс не досягав 50 % у жодному положенні.

Напрям контактної сили в суглобі

Контактна сила в дуговідростковому суглобі є вектором, тому характер навантаження, що передається на суміжні структури сегмента, визначається не лише її величиною, а й напрямом. При крайньому досягнутому розгинанні горизонтальна складова контактної сили перевищувала вертикальну на рівнях C2-C3, C3-C4, C4-C5 і C5-C6 (рис. 4). Найбільшу за модулем горизонтальну складову зареєстровано на C3-C4: вона становила –124,2 Н при вертикальній складовій 51,4 Н. Від'ємний знак відповідав напряму дозаду. Такий напрям сили узгоджується з формуванням зсувної компоненти навантаження на диск.

Контактний тиск у дуговідросткових суглобах

Піковий контактний тиск у дуговідросткових суглобах істотно зростав під час розгинання. У навантаженому нейтральному положенні контакт зберігався на всіх субаксіальних рівнях, а піковий тиск становив від 0,91 МПа на C6-C7 до 2,10 МПа на C3-C4. При крайньому досягнутому розгинанні тиск збільшувався в 3–5 разів і становив від 4,50 МПа (C2-C3) до 10,62 МПа (C3-C4); на рівнях C4-C5, C5-C6 і C6-C7 він дорівнював 5,31, 6,69 і 5,66 МПа відповідно. Максимальний тиск зареєстровано на рівні C3-C4.

Рівні максимального контактного тиску та максимальної контактної сили збігалися не повністю. Найбільшу рівнодійну контактну силу в сагітальній площині під час розгинання зареєстровано на C3-C4 (134,4 Н) і C4-C5 (116,8 Н), тоді як за тиском рівень C4-C5 (5,31 МПа) поступався рівню C5-C6 (6,69 МПа), який ніс меншу силу (84,4 Н). Такий незбіг може бути пов'язаний з відмінностями площі та просторового розподілу контакту суглобових поверхонь: при більшій площі контакту та сама сила створює менший тиск. Площі контакту в цій роботі безпосередньо не обчислювали, тому це пояснення має характер припущення.

Внутрішньодисковий тиск

Внутрішньодисковий тиск відображає гідростатичний стан пульпозного ядра і широко застосовується як показник навантаження міжхребцевого диска, що допускає зіставлення з результатами експериментальних вимірювань. У навантаженому нейтральному положенні тиск формувався під дією вертикальної сили 50 Н. Під час згинання і розгинання його зміна відображала спільну дію сталого вертикального навантаження, кінематично заданого руху голови, реакційного моменту, натягу зв'язок і контакту в дуговідросткових суглобах. Для аналізу використовували медіанне значення за елементами ядра (рис. 5). Початковий тиск у пульпозному ядрі штучно не задавали.

На рис. 5 подано рівні C2-C3 — C6-C7; показники C7-Th1 аналізували окремо і до графіка не включали. У навантаженому нейтральному положенні тиск становив від 0,147 МПа (C4-C5) до 0,294 МПа (C7-Th1), що відповідає фізіологічному діапазону тиску спокою шийного диска. Розподіл внутрішньодискового тиску загалом узгоджувався з оберненим співвідношенням між навантаженням ядра і часткою навантаження, яка передавалася через дуговідросткові суглоби; найменший тиск зафіксовано на рівні C4-C5, де суглоби несли найбільшу частку навантаження (57 %). Строгу обернену пропорційність статистично не перевіряли.

Під час згинання тиск зростав на всіх рівнях. Найбільшу величину зафіксовано на рівні C5-C6 (0,940 МПа); приріст від нейтрального положення також був максимальним (+0,745 МПа). Це узгоджувалося з трикомпонентним балансом: при максимальному згинанні вертикальна складова дискової сили сягала 198–226 % прикладеного навантаження одночасно з вираженим натягом заднього зв'язкового комплексу.

Під час розгинання внутрішньодисковий тиск знижувався, що узгоджувалося зі зростанням внеску заднього опорного комплексу в передавання навантаження. Винятком був C2-C3, де тиск залишався відносно високим при низькому значенні індексу I_суглоб — близько 25 %.

Напружений стан пульпозного ядра

Медіанний внутрішньодисковий тиск характеризує ядро загалом, але не дає змоги установити, чи зберігається стиснення в усьому його об'ємі; для цього виконано поелементний аналіз головних напружень. На рівнях C2-C3, C3-C4, C4-C5 і C5-C6 максимальне головне напруження було від'ємним в усіх без винятку елементах ядра: навіть його 95-й перцентиль (найменш стиснена частина) у нейтральному положенні становив від –0,167 до –0,097 МПа, а 5-й перцентиль мінімального головного напруження — від –0,413 до –0,206 МПа. Це відповідає стану тривісного стиснення. На рівнях C6-C7 і C7-Th1 додатне максимальне головне напруження виявлено лише в 0,9 % елементів.

У навантаженому нейтральному положенні 95-й перцентиль еквівалентного напруження за Мізесом становив 0,035–0,108 МПа і був у 2–5 разів нижчим за медіанний внутрішньодисковий тиск, що дорівнював 0,147–0,294 МПа; співвідношення цих показників становило 0,18–0,46. Таке співвідношення вказувало на переважно гідростатичний характер напруженого стану пульпозного ядра.

Зміна об'єму пульпозного ядра

Відносний об'єм ядра використовували для оцінювання його деформаційної відповіді на зміну положення голови. У навантаженому нейтральному положенні розрахунковий об'єм ядра зменшувався на 0,9–1,7 % відносно вихідної ненавантаженої конфігурації. Під час згинання зменшення об'єму посилювалося на всіх рівнях; найбільшу зміну виявлено на C5-C6 — на 5,2 % відносно вихідної ненавантаженої конфігурації та додатково на 4,0 % відносно навантаженого нейтрального положення. Під час розгинання ступінь зменшення об'єму знижувався: на рівні C5-C6 розрахунковий об'єм відрізнявся від вихідного ненавантаженого значення лише на 0,3 %, що узгоджувалося з низьким внутрішньодисковим тиском.

Фіброзне кільце: передній відділ

Передній сектор фіброзного кільця аналізували окремо, щоб оцінити зміну його напруженого стану під час розгинання. Основне завдання полягало в тому, щоб установити, чи відповідає зміна напружень у цьому секторі динаміці внутрішньодискового тиску, чи ці показники характеризують різні компоненти механічної відповіді диска.

Напружений стан переднього сектора оцінювали за трьома показниками. Еквівалентне напруження за Мізесом, подане 95-м перцентилем, характеризувало інтенсивність складного напруженого стану в найнавантаженішій частині сектора, але не давало змоги визначити, що переважало — розтяг чи стиснення. Медіана максимального головного напруження σ_1 характеризувала типовий стан елементів: додатне значення вказувало на наявність розтягувальної головної компоненти, тоді як від'ємне означало, що більш ніж у половині елементів спостерігався стан тривісного стиснення. Частка елементів із $\sigma_1 > 0$ показувала поширеність розтягувальної компоненти в межах усього сектора. Спільний аналіз цих показників давав змогу відрізнити локальне підвищення інтенсивності напружень від поширеності додатної максимальної головної компоненти.

У навантаженому нейтральному положенні еквівалентне напруження переднього сектора залишалося низьким на всіх рівнях і становило від 0,160 МПа на C5-C6 до 0,939 МПа на C7-Th1. Під час згинання воно зростало до 2,261–6,280 МПа, досягаючи найбільших значень на рівнях C5-C6 і C4-C5 — 6,280 і 6,108 МПа відповідно. Під час розгинання діапазон $\sigma_{екв}$ становив 0,456–8,218 МПа. На більшості рівнів значення були нижчими, ніж під час згинання: наприклад, на C4-C5 — 4,277 проти 6,108 МПа, на C6-C7 — 0,865 проти 2,758 МПа. Винятком був рівень C5-C6, на якому $\sigma_{екв}$ під час розгинання зростало до 8,218 МПа і перевищувало відповідне значення під час згинання.

Під час розгинання в передньому секторі переважала додатна максимальна головна компонента. Медіана σ_1 була додатною на всіх рівнях і становила від +0,142 до +2,026 МПа. Частка елементів із $\sigma_1 > 0$ сягала 100 % на рівнях C2-C3 — C6-C7 і 87,3 % на рівні C7-Th1. Отже, розтягувальна максимальна головна компонента виникала практично в усьому об'ємі переднього сектора, а не лише в окремих найнавантаженіших елементах. Водночас додатне значення σ_1 не означає тривісного розтягу: в одному елементі додатна σ_1 могла поєднуватися з від'ємними σ_2 і σ_3.

Під час згинання спостерігали протилежну картину. Медіана σ_1 була від'ємною на всіх рівнях, а частка еле-

Таблиця 3. Напружений стан переднього відділу фіброзного кільця

Рівень	Нейтраль: $\sigma_{екв}$, МПа	Згинання: $\sigma_{екв}$, МПа	Розгинання: $\sigma_{екв}$, МПа	Розгинання: медіана σ_1, МПа	Розгинання: частка елементів $\sigma_1 > 0$, %	Згинання: частка елементів $\sigma_1 > 0$, %
C2-C3	0,414	3,354	1,621	0,791	100,0	24,5
C3-C4	0,395	3,604	2,114	1,081	100,0	38,5
C4-C5	0,190	6,108	4,277	2,026	100,0	31,6
C5-C6	0,160	6,280	8,218	1,751	100,0	7,9
C6-C7	0,668	2,758	0,865	0,688	100,0	9,9
C7-Th1	0,939	2,261	0,456	0,142	87,3	12,0

Таблиця 4. Динаміка показників C5-C6 зі збільшенням кута розгинання

Показник	–25°	–35°	–44,5°
Внутрішньодисковий тиск (медіана), МПа	0,034	0,017	0,024
$\sigma_{екв}$ переднього сектора (95-й перцентиль), МПа	2,318	5,303	8,218
σ_1 переднього сектора (медіана), МПа	+1,013	+1,377	+1,751
Частка елементів $\sigma_1 > 0$, %	100	100	100
Індекс I_суглоб, %	85	98	83

ментів із $\sigma_1 > 0$ не перевищувала 38,5 %. На рівні С5-С6 вона становила лише 7,9 %. Водночас мінімальне головне напруження сягало виражених від'ємних значень — від –3,7 до –8,1 МПа. Отже, високі значення $\sigma_{екв}$, зареєстровані в передньому секторі під час згинання, відображали інтенсивний складний напружений стан з переважанням компресійної компоненти, а не поширений розтяг.

С5-С6 був єдиним рівнем, на якому $\sigma_{екв}$ переднього сектора під час розгинання перевищувало значення під час згинання.

Щоб перевірити, чи не зумовлене високе значення 95-го перцентиля під час згинання поодинокими екстремальними елементами, додатково проаналізували розподіл $\sigma_{екв}$ у передньому секторі С5-С6. Медіана становила 2,245 МПа, 75-й перцентиль — 3,514 МПа, 90-й — 4,922 МПа, 95-й — 6,280 МПа, а максимальне значення — 8,076 МПа. Послідовне зростання показників від медіани до верхніх перцентилів і порівняно невелика різниця між 95-м перцентилем і максимумом вказують на наявність групи елементів з високими напруженнями, а не одиничного числового викиду.

Щоб оцінити динаміку виявлених змін, показники С5-С6 додатково проаналізували при розгинанні –25°, –35° і –44,5°.

На рівні С5-С6 у діапазоні розгинання від –25° до –44,5° внутрішньодисковий тиск залишався низьким, тоді як $\sigma_{екв}$ і медіана σ_1 переднього сектора послідовно зростали, а частка елементів із $\sigma_1 > 0$ зберігалася на рівні 100 %. Отже, у межах цієї моделі внутрішньодисковий тиск не характеризував повною мірою напружений стан переднього відділу фіброзного кільця.

Отримана картина узгоджується з перерозподілом навантаження в бік заднього опорного комплексу. На користь цього свідчать низький внутрішньодисковий тиск і високі значення індексу I_суглоб у дослідженому діапазоні розгинання. Водночас горизонтальна складова контактної сили на рівні С5-С6 становила –70,9 Н і була спрямована дозаду. Такий напрям сили узгоджується з формуванням зсувного навантаження диска та розтягувальної максимальної головної компоненти в його передньому секторі. Запропоноване пояснення слід розглядати як інтерпретацію розрахованих полів напружень і суглобових реакцій, а не як безпосередньо виміряний шлях передавання навантаження.

Фіброзне кільце: задній відділ і регіонарний розподіл напружень

Під час згинання додатна максимальна головна компонента переважала в задньому секторі на всіх рівнях. Частка елементів із $\sigma_1 > 0$ становила 79,2–98,5 %, а медіана σ_1 — від +0,367 до +0,624 МПа (табл. 5). Передній відділ на тих самих рівнях перебував у протилежному, переважно компресійному режимі (табл. 3). Отже, під час згинання розподіл максимального головного напруження в передньому і задньому секторах був протилежним.

Під час розгинання поширеність додатної максимальної головної компоненти в задньому відділі загалом зменшувалася, проте вираженість змін істотно різнилася між рівнями. Частка елементів із $\sigma_1 > 0$ знижувалася до 10,6 % на С5-С6 і 22,5 % на С6-С7, до 36,0 % на С3-С4, тоді як на С4-С5, С2-С3 і С7-Th1 додатна σ_1 зберігалась у 55,0, 62,7 і 62,5 % елементів відповідно. У передньому відділі під час розгинання, навпаки, додатна максимальна головна компонента поширювалася практично на весь об'єм сектора (табл. 3). Найвираженіші протилежні зміни поширеності додатної σ_1 у передньому та задньому секторах спостерігали на середньо- і нижньошийних рівнях, особливо на С5-С6.

На рівні С5-С6 інтенсивність складного напруженого стану заднього відділу була порівняно невисокою. Еквівалентне напруження заднього сектора становило 0,994 МПа під час згинання і 1,532 МПа під час розгинання (табл. 5). Для порівняння: передній сектор того самого рівня вирізнявся істотно вищими значеннями $\sigma_{екв}$. Отже, під час згинання задній сектор вирізнявся поширеною розтягувальною головною компонентою при невисокій загальній інтенсивності напруженого стану, тоді як у передньому секторі високі значення $\sigma_{екв}$ поєднувалися з переважно компресійним режимом.

Найбільшу передньозадню асиметрію за $\sigma_{екв}$ зареєстровано на рівні С4-С5 під час згинання та на С5-С6 під час розгинання. У цих станах $\sigma_{екв}$ переднього відділу перевищувало відповідне значення заднього відділу в 7,8 і 5,4 раза відповідно. Ці співвідношення відображають різницю інтенсивності складного напруженого стану, але самі по собі не дають змоги визначити, що переважало в секторі — розтяг чи стиснення.

Таблиця 5. Напружений стан заднього відділу фіброзного кільця

Рівень	Згинання: $\sigma_{екв}$, МПа	Згинання: медіана σ_1, МПа	Згинання: частка $\sigma_1 > 0$, %	Розгинання: $\sigma_{екв}$, МПа	Розгинання: медіана σ_1, МПа	Розгинання: частка $\sigma_1 > 0$
С2-С3	2,517	+0,513	91,6	1,972	+0,051	62,7
С3-С4	0,740	+0,367	96,0	1,144	–0,088	36,0
С4-С5	0,785	+0,501	98,5	1,340	+0,019	55,0
С5-С6	0,994	+0,624	96,8	1,532	–0,196	10,6
С6-С7	0,754	+0,399	92,1	0,792	–0,083	22,5
С7-Th1	2,254	+0,475	79,2	1,714	+0,026	62,5

Рівні C2-C3 і C7-Th1 відрізнялися від загальної закономірності: під час розгинання $\sigma_{екв}$ заднього відділу на них перевищувало значення переднього відділу. Особливість C7-Th1 могла бути зумовлена впливом жорсткого закріплення Th1 на локальний шлях передавання навантаження. Тому результати C7-Th1 слід тлумачити з урахуванням його розташування поблизу межі моделі. На рівні C2-C3 розподіл напружень між переднім і заднім відділами залишався рівномірнішим, що може відображати відносно більшу роль диска в передаванні навантаження на цьому рівні.

Під час розгинання найбільші значення $\sigma_{екв}$ серед усіх секторів зареєстровано в бічних відділах C3-C4: 15,9 МПа справа і 15,8 МПа зліва. Оскільки бічні сектори не поділяли на передньобічні та задньобічні ділянки і не зіставляли систематично між рівнями, ці значення окремо не інтерпретували. Отже, показник C5-C6 слід розглядати як максимальний серед передніх, але не серед усіх секторів кільця.

Зв'язковий апарат

Динаміку натягу зв'язкових структур залежно від кута згинання-розгинання голови подано на рис. 6, де наведено скалярну суму натягів усіх пружин відповідної групи за сукупністю субаксіальних рівнів.

Навантаження кожної групи зв'язок оцінювали за скалярною сумою сил натягу пружин, які її становлять. Цей показник відображає сумарне залучення зв'язкової структури до обмеження руху, але не характеризує напряму рівнодійної сили й локального розподілу навантаження всередині зв'язки.

Розподіл натягів відповідав очікуваній функціональній поведінці зв'язок. Передня поздовжня зв'язка навантажувалася переважно під час розгинання, тоді як задня поздовжня, жовта та міжостьова зв'язки — переважно під час згинання. Капсули дуговідросткових суглобів залучалися як під час згинання, так і під час розгинання, проте вираженість їхнього натягу істотно різнилася між рівнями.

На окремих субаксіальних рівнях при максимальному розгинанні скалярна сума натягів пружин передньої поздовжньої зв'язки становила 6–21 Н. При максимальному згинанні відповідні міжрівневі діапазони становили 10–17 Н для задньої поздовжньої, 4–11 Н для жовтої та 23–28 Н для міжостьової зв'язки. Отже, серед перелічених груп під час згинання найбільшу скалярну суму натягів відзначено для міжостьової зв'язки.

Таблиця 6. Скалярна сума натягів пружин капсул дуговідросткових суглобів при максимальному проаналізованому згинанні й розгинанні, Н

Рівень	Згинання	Розгинання
C2-C3	21	4
C3-C4	23	4
C4-C5	27	4
C5-C6	12	21
C6-C7	19	0

Найбільш виражені міжрівневі відмінності виявлено для капсул дуговідросткових суглобів. Під час згинання капсульні пружини були навантажені на всіх субаксіальних рівнях, причому мінімальну скалярну суму натягів зареєстровано на C5-C6 — 12 Н. Під час розгинання розподіл істотно змінювався: на C5-C6 цей показник зростав до 21 Н, тоді як на решті рівнів не перевищував 4 Н. Отже, C5-C6 був єдиним рівнем із вираженим збільшенням капсульного натягу під час переходу від згинання до розгинання.

Підвищений натяг капсульних пружин C5-C6 під час розгинання не супроводжувався максимальною контактною реакцією дуговідросткового суглоба. Вертикальна складова контактної сили на цьому рівні становила 45,7 Н і була нижчою, ніж на C4-C5 і C3-C4 — 70,5 і 51,4 Н відповідно. Рівнодійна контактна сила в сагітальній площині також була нижчою: 84,4 Н на C5-C6 проти 116,8 Н на C4-C5 і 134,4 Н на C3-C4. Отримані дані показують, що натяг капсули не визначається безпосередньо величиною контактної реакції і залежить також від локальної кінематики сегмента і взаємного положення суглобових поверхонь.

Обговорення

Отримані результати показують, що зміна положення голови супроводжується не лише перерозподілом навантаження між міжхребцевим диском і дуговідростковими суглобами, а й різною механічною відповіддю окремих компонентів диска. Найбільш виражене розходження виявлено на рівні C5-C6: під час розгинання внутрішньодисковий тиск залишався низьким, тоді як $\sigma_{екв}$ і медіана σ_1 переднього сектора фіброзного кільця зростали. Отже, у межах цієї моделі внутрішньодисковий тиск не характеризував повною мірою навантаження всіх компонентів міжхребцевого диска.

Розгинання супроводжувалося збільшенням навантаження дуговідросткових суглобів і появою значної спрямованої дозаду горизонтальної складової контактної сили. Ці зміни узгоджуються з поєднанням стиснення дуговідросткових суглобів, зсувного навантаження диска та додатної максимальної головної компоненти в його передньому секторі. У навантаженому нейтральному положенні суглобовий шлях передавання навантаження був найбільш вираженим на C4-C5, тоді як на C2-C3 в усьому дослідженому діапазоні зберігалося переважання дискового шляху. Отримані результати стосуються однієї інтактної геометричної моделі й самі по собі не доводять зв'язку виявлених механічних закономірностей з розвитком дегенеративних змін.

Біомеханічна правдоподібність моделі

Глобальна механічна реакція моделі загалом відповідала опублікованим нормативним даним. Повний обсяг рухів (range of motion, ROM) C2-C7 становив 59,1° при опублікованому нормативному значенні 55,3 ± 16,0°, отриманому на 1230 асимптомних добровольцях [49]. Сегментарний ROM становив 9,5–13,7°, що відповідає діапазону, встановленому в експери-

ментальних дослідженнях за стандартизованих умов навантаження [50]. Внутрішньодисковий тиск у навантаженому нейтральному положенні становив 0,147–0,294 МПа і перебував у межах значень, зареєстрованих *in vivo* та на кадаверних препаратах [20, 51, 52], а також у діапазоні, розрахованому в багатотільній моделі [53]. Максимальний реакційний момент становив 2,42 Н · м і не перевищував верхньої межі діапазону моментів, які застосовують під час експериментального тестування шийного відділу хребта, — від 1,5 Н · м [54] до 2,5 Н · м [55]. На рівні C1-C2, де міжхребцевий диск анатомічно відсутній, контактна сила становила 49,9 Н при прикладеному вертикальному навантаженні 50 Н. Ці показники свідчать про узгодженість глобальної механічної відповіді моделі з опублікованими нормативними даними, проте не замінюють її повноцінної валідації, особливо щодо локальних напружень і контактних тисків.

Розподіл навантаження між передньою та задньою опорними структурами

Отриманий розподіл узгоджується з уявленням про триколонну будову шийного відділу. У кадаверному експерименті G.P. Pal і H.H. Sherk через передню колону, утворену тілами хребців і міжхребцевими дисками, передавалося 36 % прикладеного навантаження, а через кожну з двох задніх колон, утворених суглобовими відростками, — по 32 % [56]. У цій моделі в навантаженому нейтральному положенні частка диска становила від 39 % (C4-C5) до 77 % (C6-C7), а частка дуговідросткових суглобів — від 28 % (C6-C7) до 57 % (C4-C5), тобто величини того самого порядку. Істотним доповненням є виявлена міжрівнева неоднорідність: на C4-C5 суглобовий шлях переважав уже в нейтральному положенні, тоді як на C2-C3 і C6-C7 зберігалося переважання дискового шляху. Усереднене за колоною значення, отримане в класичному експерименті, приховує ці міжрівневі відмінності.

Постановка задачі в цій роботі відрізняється від умов зазначеного експерименту: навантаження прикладали до жорсткого тіла C0 при вільному вертикальному переміщенні голови, що дало змогу простежити перерозподіл в усьому діапазоні згинання і розгинання, а не лише в нейтральному положенні.

Внутрішньодисковий тиск

Розрахункові значення внутрішньодискового тиску в навантаженому нейтральному положенні (0,147–0,294 МПа) порівнянні з опублікованими даними. S. Hattori і співавт. при дискографічній реєстрації *in vivo* отримали в середньому близько 0,3 МПа в розслабленому положенні та до 0,45 МПа в положенні сидячи [52]. J. Pospiech і співавт. при реєстрації на препаратах отримали близькі значення в нейтральному положенні [20], а P.A. Cripton і співавт. показали лінійну залежність тиску від осьового стиснення з піковими значеннями 2,4–3,5 МПа при навантаженні 800 Н [51]. У багатотільній моделі R. Arshad і співавт. тиск у нейтральній позі становив 0,2–0,56 МПа без додаткового навантаження і 0,39–0,93 МПа при зовнішньому осьовому навантаженні 40 Н [53].

Значення цієї моделі розташовані біля нижньої межі наведеного діапазону. Відносно низькі значення могли бути пов'язані з відсутністю компресійної дії м'язових сил, а також із відмінностями геометрії, матеріальних параметрів та умов навантаження. Тому отримані показники характеризують пасивну механічну відповідь моделі шийного відділу під дією ваги голови, а не повний внутрішньодисковий тиск *in vivo*.

Навантаження дуговідросткових суглобів під час розгинання

Збільшення контактного тиску в дуговідросткових суглобах під час розгинання та його зниження аж до розмикання суглобових поверхонь під час згинання відповідають експериментальним спостереженням. N.V. Jaumard і співавт. під час реєстрації на кадаверних препаратах зі збереженням суглобової капсули зафіксували на рівні C5-C6 приріст контактного тиску на 67,6 ± 26,9 кПа при розгинальному моменті 2,4 Н · м і зниження на 10,3 ± 9,7 кПа при згинальному моменті 2,7 Н · м [57]. Абсолютні значення в цій моделі вищі, проте слід зауважити, що пряме зіставлення некоректне: в експерименті реєстрували приріст тиску в одній точці суглоба при невеликому моменті, тоді як у моделі обчислювали піковий тиск на всій контактній ділянці при кінематично заданому розгинанні до –44,5° під сталим вертикальним навантаженням. Порівнянними є спрямованість і характер змін, але не їхня абсолютна величина.

Істотним доповненням до експериментальних даних є векторний характер контактної реакції. При крайньому досягнутому розгинанні горизонтальна складова перевищувала вертикальну на чотирьох із п'яти субаксіальних рівнів і сягала –124,2 Н на C3-C4. Реєстрація лише контактного тиску або лише вертикальної складової не дає змоги виявити горизонтальний компонент реакції, який може істотно впливати на зсувне навантаження сегмента. Роль дуговідросткового суглоба як структури, що сприймає одночасно компресійну та зсувну складові, обговорюється в оглядових працях з біомеханіки дуговідросткового суглоба [12, 14, 57].

Розходження між станом ядра і переднього сектора фіброзного кільця

Основне спостереження цієї роботи — збереження низького внутрішньодискового тиску при одночасному зростанні напружень у передньому секторі фіброзного кільця — узгоджується з уявленням про функціональне розмежування механічної відповіді компонентів диска. У навантаженому нейтральному положенні 95-й перцентиль $\sigma_{екв}$ у ядрі був у 2–5 разів нижчим за медіанний внутрішньодисковий тиск, що вказує на переважно гідростатичний характер його напруженого стану. Внутрішньодисковий тиск переважно характеризував стан пульпозного ядра, але не відображав повною мірою напруженого стану периферичних відділів фіброзного

кільця, які сприймають розтягувальне та зсувне навантаження.

Потенційна клінічна значущість такого розмежування може бути пов'язана з регіонарними відмінностями міцнісних властивостей фіброзного кільця. У працях D.L. Skaggs і співавт. показано регіонарну неоднорідність міцності на розтяг з меншими значеннями в задньобічній ділянці порівняно з передньою [58]; E.R. Acaroglu і співавт. установили, що дегенерація та вік істотно знижують напруження руйнування при відносно стабільній деформації руйнування [59]. Обидві роботи виконано на поперекових препаратах, а порівнянних за обсягом даних для шийного фіброзного кільця істотно менше. Тому перенесення цих закономірностей на шийний рівень слід розглядати як припущення, що потребує окремої експериментальної перевірки, а не як установлений факт.

Рівнеспецифічність результатів і клінічний контекст

Найбільш виражене розходження між станом ядра і переднього сектора кільця виявлено на рівні C5-C6. Цей рівень найчастіше вражається дегенеративним процесом: у рентгенологічному дослідженні 1581 пацієнта віком від 18 до 97 років ознаки дегенерації диска виявлено в 53,9 % обстежених, а найбільшу частоту і вираженість змін зареєстровано саме на C5-C6; спондилолістез натомість частіше реєстрували на C4-C5 [60]. Збіг розрахункового й епідеміологічного «пікового» рівня сам по собі не доводить причинного зв'язку: цю роботу виконано на одній інтактній моделі без аналізу дегенеративних варіантів геометрії. Проте цей збіг визначає напрям подальшого аналізу.

Поєднання найвищого внутрішньодискового тиску і найбільшого зменшення об'єму пульпозного ядра під час згинання, послідовного зростання напружень переднього сектора й вираженого капсульного натягу під час розгинання дає підстави розглядати C5-C6 як рівень з потенційно несприятливим механічним профілем.

Обернену залежність — вплив стану диска на навантаження задніх структур — описано в розрахункових працях. M. Hussain і співавт. показали, що характер зниження висоти диска в передньому та задньому відділах визначає контактне навантаження дуговідросткових суглобів при помірній і вираженій дегенерації [61]. X.-Y. Cai і співавт. встановили, що розрахункові сили в дуговідросткових суглобах при дегенерації диска істотно залежать від способу задання руху [62]. Останнє спостереження прямо стосується цієї роботи: рух голови задавали кінематично за траєкторією, отриманою при навантаженні чистим моментом, і отримані значення слід тлумачити з урахуванням саме такого способу задання руху.

Практичне значення отриманих даних пов'язане передусім з оцінюванням стану диска. Якщо внутрішньодисковий тиск використовують як єдиний показник навантаження, стан переднього відділу кільця в розгинальних положеннях голови може бути недооцінений. Це стосується і віддалених наслідків переднього шийного спондилодезу: за даними A.S. Hilibrand і співавт., симптомна патологія суміжного рівня розвивалася з частотою близько 2,9 % на рік і більш ніж у чверті оперованих упродовж десяти років; найбільший ризик автори пов'язували зі спондилодезом одного рівня з включенням п'ятого або шостого шийного хребця та з наявними до операції рентгенологічними ознаками дегенерації суміжних рівнів [63]. У подальшому систематичному огляді B.D. Lawrence і співавт. до чинників ризику також віднесено спондилодез, суміжний з рівнями C5-C6 і/або C6-C7, вік < 60 років і наявну грижу диска при частоті розвитку симптомної дегенерації 1,6–4,2 % на рік [64].

Цю роботу виконано на інтактній моделі, яка не моделює стан після спондилодезу, тому отримані результати не можуть безпосередньо підтвердити або спростувати механізми розвитку патології суміжних сегментів. Вони характеризують вихідний розподіл навантаження в інтактному шийному відділі хребта, відносно якого надалі можуть оцінюватися зміни, спричинені дегенеративними процесами або хірургічним втручанням.

Водночас у межах єдиної розрахункової постановки та за однакових граничних умов було комплексно оцінено низку показників, які в скінченно-елементних дослідженнях шийного відділу хребта зазвичай аналізують окремо або не включають до комплексної оцінки. До них належали: розкладання навантаження на три шляхи передавання за допомогою діаграми вільного тіла з кількісною оцінкою нев'язки силового балансу; аналіз векторного характеру контактної реакції дуговідросткових суглобів з виокремленням її горизонтальної складової, а не лише визначенням пікового контактного тиску; секторний аналіз фіброзного кільця за трьома взаємодоповнюваними показниками — еквівалентним напруженням, медіаною максимального головного напруження та часткою елементів з його додатними значеннями; оцінювання зміни відносного об'єму пульпозного ядра поряд з внутрішньодисковим тиском і поелементним аналізом головних напружень; а також визначення розподілу натягу зв'язок за групами й рівнями із зіставленням з контактною реакцією відповідного дуговідросткового суглоба. Аналіз виконано не лише в окремих дискретних положеннях, а й у 176 квазістатичних рівноважних станах, які охоплювали весь досягнутий діапазон згинання та розгинання. До моделі також було включено рівень C7-Th1 як деформівний функціональний сегмент.

За результатами проведеного пошуку літератури нам не вдалося виявити публікацій, у яких у межах однієї моделі та за єдиних умов навантаження одночасно поєднували б оцінювання шляхів передавання навантаження, диско-зв'язкового апарату, внутрішньодискових показників і векторної контактної реакції дуговідросткових суглобів упродовж повного діапазону згинання й розгинання.

Отримані результати можуть слугувати основою для подальших досліджень у двох напрямах. Перший полягає у вивченні біомеханічних передумов розвитку дегенеративних змін: кількісно описаний розподіл навантаження в інтактному сегменті формує референтну основу, відносно якої можна оцінювати

вплив зменшення висоти диска, зміни сагітального профілю та дегенерації окремих тканин. Другий напрям пов'язаний з оптимізацією та індивідуалізацією хірургічної корекції. Визначення частки навантаження, що передається через міжхребцеві диски, дуговідросткові суглоби та зв'язковий апарат на кожному рівні й у кожному положенні, дає змогу порівнювати наслідки різних варіантів втручання не лише за зміною обсягу рухів, а й за характером перерозподілу навантаження між опорними структурами. Реалізація обох напрямів потребує розширення дослідження на серію моделей з різною геометрією, властивостями тканин і ступенем дегенеративних змін, а також на моделі, що відтворюють різні варіанти хірургічного втручання.

Обмеження дослідження. Робота має низку обмежень. По-перше, використано одну геометричну модель, побудовану за даними однієї пацієнтки без ознак патології, тому міжіндивідуальну варіабельність форми хребців, орієнтації суглобових поверхонь і сагітального профілю не враховано. По-друге, м'язовий апарат не відтворювали, а рух голови задавали кінематично; це виключає компресійну дію м'язових сил, яка *in vivo* істотно збільшує навантаження сегмента. По-третє, кісткові та м'якотканинні компоненти описували пружними і гіперпружними моделями без урахування в'язкопружних і поропружних ефектів; тому результати характеризують квазістатичну відповідь моделі й не відображають часозалежної поведінки тканин. По-четверте, нев'язка балансу вільного тіла становила в середньому 10 % і сягала 39 % у крайніх положеннях, що пов'язано з наближеним оцінюванням площі перетину елемента; з огляду на це показники часток навантаження в крайніх положеннях слід розглядати як оцінкові.

Висновки

1. Розподіл вертикального навантаження між міжхребцевим диском, дуговідростковими суглобами та зв'язковим комплексом істотно залежить від положення голови й від рівня сегмента. У навантаженому нейтральному положенні суглобовий шлях передавання був найбільш вираженим на С4-С5, тоді як на С2-С3 в усьому дослідженому діапазоні зберігалося переважання дискового шляху.

2. Під час згинання дуговідросткові суглоби розмикалися, а натяг заднього зв'язкового комплексу супроводжувався збільшенням розрахункової вертикальної складової дискової сили приблизно до подвоєної величини прикладеного навантаження.

3. Під час розгинання основна частина вертикального навантаження на середньо- та нижньошийних рівнях передавалася через дуговідросткові суглоби. Значна спрямована дозаду горизонтальна складова контактної сили, що виникала при цьому, узгоджувалася з формуванням зсувної компоненти навантаження на сегмент.

4. На рівні С5-С6 під час розгинання низький внутрішньодисковий тиск поєднувався з послідовним зростанням еквівалентного напруження та медіани максимального головного напруження в передньому секторі фіброзного кільця. У межах дослідженої моделі внутрішньодисковий тиск не відображав повною мірою навантаження периферичних компонентів диска.

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

Список літератури

1. Mansfield M, Smith T, Spahr N, Thacker M. Cervical spine radiculopathy epidemiology: A systematic review. Musculoskeletal Care. 2020;18(4):555-567. doi: 10.1002/msc.1498, PMID: 32710604.

2. Watkins RGt, Watkins RG, 3rd. Cervical Disc Herniations, Radiculopathy, and Myelopathy. Clin Sports Med. 2021;40(3):513-539. doi: 10.1016/j.csm.2021.03.006, PMID: 34051944.

3. Woods BI, Hilibrand AS. Cervical radiculopathy: epidemiology, etiology, diagnosis, and treatment. J Spinal Disord Tech. 2015;28(5):E251-259. doi: 10.1097/BSD.0000000000000284, PMID: 25985461.

4. Balmaceno-Criss M, Singh M, Daher M, Buchbinder R, Diebo BG, Daniels AH. Degenerative Cervical Myelopathy: History, Physical Examination, and Diagnosis. Journal of Clinical Medicine. 2024;13(23). doi: 10.3390/jcm13237139, PMID: 39685599.

5. Bębenek A, Godlewski B. Anterior cervical discectomy and fusion (ACDF) with and without plating: A comparison of radiological and clinical outcomes. Adv Clin Exp Med. 2024;33(8):881-888. doi: 10.17219/acem/172062, PMID: 37767764.

6. Epstein NE, Agulnick MA. Review of anterior cervical diskectomy/fusion (ACDF) using different polyetheretherketone (PEEK) cages. Surg Neurol Int. 2022;13:556. doi: 10.25259/sni_992_2022, PMID: 36600749.

7. Xu S, Liang Y, Zhu Z, Qian Y, Liu H. Adjacent segment degeneration or disease after cervical total disc replacement: a meta-analysis of randomized controlled trials. Journal of Orthopaedic Surgery and Research. 2018;13(1):244. doi: 10.1186/s13018-018-0940-9, PMID: 30285807.

8. Hirvonen T, Hämäläinen M, Konsti J, Antinheimo J, Numminen J, Siironen J, et al. Comparable long-term outcomes in patients undergoing total disc replacement or anterior cervical discectomy and noninstrumented fusion. Spine J. 2023;23(12):1817-1829. doi: 10.1016/j.spinee.2023.08.019, PMID: 37660896.

9. Bogduk N, Mercer S. Biomechanics of the cervical spine. I: Normal kinematics. Clin Biomech (Bristol). 2000;15(9):633-648. doi: 10.1016/s0268-0033(00)00034-6, PMID: 10946096.

10. Ansaripour H, Ferguson SJ, Flohr M. In Vitro Biomechanics of the Cervical Spine: A Systematic Review. J Biomech Eng. 2022;144(10). doi: 10.1115/1.4054439, PMID: 35482019.

11. Dandumahanti BP, Subramaniyam M. Biomechanical analysis of cervical spine (C2-C7) at different flexed postures. Int J Artif Organs. 2024;47(3):205-211. doi: 10.1177/03913988241229625, PMID: 38362810.

12. Jaumard NV, Bauman JA, Weisshaar CL, Guarino BB, Welch WC, Winkelstein BA. Contact pressure in the facet joint during sagittal bending of the cadaveric cervical spine. J Biomech Eng. 2011;133(7):071004. doi: 10.1115/1.4004409, PMID: 21823743.

13. Rong X, Wang B, Ding C, Deng Y, Chen H, Meng Y, et al. The biomechanical impact of facet tropism on the intervertebral disc and facet joints in the cervical spine. Spine J. 2017;17(12):1926-1931. doi: 10.1016/j.spinee.2017.07.009, PMID: 28713050.

14. Whyte T, Barker JB, Cronin DS, Dumas GA, Nolte LP, Cripton PA. Load-Sharing and Kinematics of the Human Cervical Spine Under Multi-Axial Transverse Shear Loading: Combined Experimental and Computational Investigation. J Biomech Eng. 2021;143(6). doi: 10.1115/1.4050030, PMID: 33537737.

15. Abbed KM, Coumans JV. Cervical radiculopathy: pathophysiology, presentation, and clinical evaluation. Neurosurgery. 2007;60(1 Supp1 1):S28-34. doi: 10.1227/01.Neu.0000249223.51871.C2, PMID: 17204882.

16. Carrera CX, Achilova F, Rozenfeld S, Daniels AH. Pathophysiology, diagnosis, and management of cervical disc herniation. Am J Med. 2026;139(8):979-987. doi: 10.1016/j.amjmed.2026.03.009, PMID: 41881325.

17. Daentzer D, Welke B, Baseem Ismail A, Daentzer J, Plagge J. [Cervical disc herniation : Symptomatology, diagnostics, therapy]. Orthopadie (Heidelb). 2025;54(1):26-39. doi: 10.1007/s00132-024-04582-8, PMID: 39560707.

18. Chang L, Wang H, Guo Y, Cai Z, Zhan H. Experimental and numerical analysis of biomechanical effects in cervical spine positioning rotation manipulation. Int J Numer Method Biomed Eng. 2022;38(12):e3651. doi: 10.1002/cnm.3651, PMID: 36166310.

19. James CM, Brismée JM, St-Pierre MO, Descarreaux M, Hooper TL, Nougarou F, et al. Variability of Intradiscal Pressure During Cervical Spine Posterior-Anterior Mobilization: A Cadaveric Investigation. J Manipulative Physiol Ther. 2022;45(7):522-530. doi: 10.1016/j.jmpt.2022.10.003, PMID: 36529553.

20. Pospiech J, Stolke D, Wilke HJ, Claes LE. Intradiscal pressure recordings in the cervical spine. Neurosurgery. 1999;44(2):379-384; discussion 384-375. doi: 10.1097/00006123-199902000-00078, PMID: 9932892.

21. Crawford MT, Brismée JM, St-Pierre MO, Bellot N, Sizer PS, Sobczak S. Cervical intradiscal pressure responses to end-range supine postures: a cadaveric investigation. BMC Musculoskelet Disord. 2025;26(1):1038. doi: 10.1186/s12891-025-09284-6, PMID: 41225498.

22. Bahreinizad H, Paulon GM, Wei L, Chowdhury SK. An MRI-derived head-neck finite element model. Biomech Model Mechanobiol. 2025;24(6):2195-2215. doi: 10.1007/s10237-025-02013-x, PMID: 41042433.

23. Herron MR, Park J, Dailey AT, Brockmeyer DL, Ellis BJ. Febio finite element models of the human cervical spine. J Biomech. 2020;113:110077. doi: 10.1016/j.jbiomech.2020.110077, PMID: 33142209.

24. Manickam PS, Roy S. The biomechanical study of cervical spine: A Finite Element Analysis. Int J Artif Organs. 2022;45(1):89-95. doi: 10.1177/0391398821995495, PMID: 33645324.

25. Yoganandan N, Kumaresan S, Voo L, Pintar FA. Finite element applications in human cervical spine modeling. Spine (Phila Pa 1976). 1996;21(15):1824-1834. doi: 10.1097/00007632-199608010-00022, PMID: 8855470.

26. Ayturk UM, Puttlitz CM. Parametric convergence sensitivity and validation of a finite element model of the human lumbar spine. Comput Methods Biomech Biomed Engin. 2011;14(8):695-705. doi: 10.1080/10255842.2010.493517, PMID: 21229413.

27. Brolin K, Halldin P. Development of a finite element model of the upper cervical spine and a parameter study of ligament characteristics. Spine (Phila Pa 1976). 2004;29(4):376-385. doi: 10.1097/01.brs.0000090820.99182.2d, PMID: 15094533.

28. Buchweitz N, Sun Y, Kelley J, Porto SC, Wang S, Reitman CA, et al. Characterizing the Baseline Regional Biphasic Mechanical Properties of Cervical Intervertebral Discs. Ann Biomed Eng. 2025;53(9):2333-2345. doi: 10.1007/s10439-025-03759-2, PMID: 40399746.

29. Buchweitz N, Sun Y, Porto SC, Wang S, Reitman CA, Yao H, Wu Y. Characterizing baseline fixed charge density in human cervical intervertebral discs. J Biomech. 2025;181:112554. doi: 10.1016/j.jbiomech.2025.112554, PMID: 39892283.

30. Cortes DH, Jacobs NT, DeLucca JF, Elliott DM. Elastic, permeability and swelling properties of human intervertebral disc tissues: A benchmark for tissue engineering. J Biomech. 2014;47(9):2088-2094. doi: 10.1016/j.jbiomech.2013.12.021, PMID: 24438768.

31. Ha SK. Finite element modeling of multi-level cervical spinal segments (C3-C6) and biomechanical analysis of an elastomer-type prosthetic disc. Med Eng Phys. 2006;28(6):534-541. doi: 10.1016/j.medengphy.2005.09.006, PMID: 16278091.

32. Ivancic PC, Coe MP, Ndu AB, Tominaga Y, Carlson EJ, Rubin W, et al. Dynamic mechanical properties of intact human cervical spine ligaments. Spine J. 2007;7(6):659-665. doi: 10.1016/j.spinee.2006.10.014, PMID: 17998125.

33. Jacobs NT, Cortes DH, Peloquin JM, Vresilovic EJ, Elliott DM. Validation and application of an intervertebral disc finite element model utilizing independently constructed tissue-level constitutive formulations that are nonlinear, anisotropic, and time-dependent. J Biomech. 2014;47(11):2540-2546. doi: 10.1016/j.jbiomech.2014.06.008, PMID: 24998992.

34. Komeili A, Rasoulian A, Moghaddam F, El-Rich M, Li LP. The importance of intervertebral disc material model on the prediction of mechanical function of the cervical spine. BMC Musculoskelet Disord. 2021;22(1):324. doi: 10.1186/s12891-021-04172-1, PMID: 33794848.

35. Leahy PD, Puttlitz CM. The effects of ligamentous injury in the human lower cervical spine. J Biomech. 2012;45(15):2668-2672. doi: 10.1016/j.jbiomech.2012.08.012, PMID: 22939289.

36. Lee SH, Cho TH, Kwon HJ, Hong JE, Lee YH, Yang HM. An anatomical and radiological study of the tectorial membrane and its clinical implications. Sci Rep. 2022;12(1):21480. doi: 10.1038/s41598-022-25213-2, PMID: 36509799.

37. Mattucci SF, Moulton JA, Chandrashekar N, Cronin DS. Strain rate dependent properties of younger human cervical

spine ligaments. J Mech Behav Biomed Mater. 2012;10:216-226. doi: 10.1016/j.jmbbm.2012.02.004, PMID: 22520433.

38. Nordberg RC, Kim AN, Hight JM, Meka RS, Elder BD, Hu JC, Athanasiou KA. Biochemical and biomechanical characterization of the cervical, thoracic, and lumbar facet joint cartilage in the Yucatan minipig. J Biomech. 2022;142:111238. doi: 10.1016/j.jbiomech.2022.111238, PMID: 35933954.

39. Osth J, Brolin K, Svensson MY, Linder A. A Female Ligamentous Cervical Spine Finite Element Model Validated for Physiological Loads. J Biomech Eng. 2016;138(6):061005. doi: 10.1115/1.4032966, PMID: 26974520.

40. Phuntsok R, Ellis BJ, Herron MR, Provost CW, Dailey AT, Brockmeyer DL. The occipitoatlantal capsular ligaments are the primary stabilizers of the occipitoatlantal joint in the craniocervical junction: a finite element analysis. J Neurosurg Spine. 2019;30(5):593-601. doi: 10.3171/2018.10.SPINE181102, PMID: 30771758.

41. Phuntsok R, Mazur MD, Ellis BJ, Ravindra VM, Brockmeyer DL. Development and initial evaluation of a finite element model of the pediatric craniocervical junction. Journal of Neurosurgery Pediatrics. 2016;17(4):497-503. doi: 10.3171/2015.8.PEDS15334, PMID: 26684768.

42. Singh N, Trajkovski A, Trajkovski J, Kunc R, Matas JFR. A Pilot Study on the Age-Dependent, Biomechanical Properties of Longitudinal Ligaments in the Human Cervical Spine. Bioengineering (Basel, Switzerland). 2025;12(1). doi: 10.3390/bioengineering12010061, PMID: 39851335.

43. Trajkovski A, Omerovic S, Hribernik M, Prebil I. Failure properties and damage of cervical spine ligaments, experiments and modeling. J Biomech Eng. 2014;136(3):031002. doi: 10.1115/1.4026424, PMID: 24389891.

44. Ueno K, Liu YK. A three-dimensional nonlinear finite element model of lumbar intervertebral joint in torsion. J Biomech Eng. 1987;109(3):200-209. doi: 10.1115/1.3138670, PMID: 3657107.

45. Wolny R, Wiczenbach T, Pachocki L, Andrzejewska-Sroka A, Sabik A, Meronk B, et al. Experimental evaluation and constitutive modelling of cervical spine ligaments under low and high strain rates. Sci Rep. 2025;15(1):40139. doi: 10.1038/s41598-025-23918-8, PMID: 41249271.

46. Yoganandan N, Kumaresan S, Pintar FA. Geometric and mechanical properties of human cervical spine ligaments. J Biomech Eng. 2000;122(6):623-629. doi: 10.1115/1.1322034, PMID: 11192384.

47. Zhang QH, Teo EC, Ng HW, Lee VS. Finite element analysis of moment-rotation relationships for human cervical spine. J Biomech. 2006;39(1):189-193. doi: 10.1016/j.jbiomech.2004.10.029, PMID: 16271604.

48. Maas SA, Ellis BJ, Ateshian GA, Weiss JA. FEBio: finite elements for biomechanics. J Biomech Eng. 2012;134(1):011005. doi: 10.1115/1.4005694, PMID: 22482660.

49. Yukawa Y, Kato F, Suda K, Yamagata M, Ueta T. Age-related changes in osseous anatomy, alignment, and range of motion of the cervical spine. Part I: Radiographic data from over 1,200 asymptomatic subjects. Eur Spine J. 2012;21(8):1492-1498. doi: 10.1007/s00586-012-2167-5, PMID: 22310883.

50. Liebsch C, Greiner-Perth AK, Vogt M, Vieres V, Jonas R, Kienle A, Wilke HJ. Intervertebral disc degeneration, age, and sex affect the range of motion of the cervical spine. Sci Rep. 2025;15(1):23540. doi: 10.1038/s41598-025-07182-4, PMID: 40604084.

51. Cripton PA, Dumas GA, Nolte LP. A minimally disruptive technique for measuring intervertebral disc pressure in vitro: application to the cervical spine. J Biomech. 2001;34(4):545-549. doi: 10.1016/s0021-9290(00)00205-0, PMID: 11266680.

52. Hattori S, Oda H, Kawai S. Cervical intradiscal pressure in movements and traction of the cervical spine. Zeitschrift für Orthopädie und ihre Grenzgebiete. 1981;119(6):568-569.

53. Arshad R, Schmidt H, El-Rich M, Moglo K. Sensitivity of the Cervical Disc Loads, Translations, Intradiscal Pressure, and Muscle Activity Due to Segmental Mass, Disc Stiffness, and Muscle Strength in an Upright Neutral Posture. Front Bioeng Biotechnol. 2022;10:751291. doi: 10.3389/fbioe.2022.751291, PMID: 35573240.

54. Panjabi M, Dvorak J, Duranceau J, Yamamoto I, Gerber M, Rauschning W, Bueff HU. Three-dimensional movements of the upper cervical spine. Spine (Phila Pa 1976). 1988;13(7):726-730. doi: 10.1097/00007632-198807000-00003, PMID: 3194778.

55. Wilke HJ, Kienle A, Werner K, Liebsch C. Range of Motion and Neutral Zone of All Human Spinal Motion Segments: A Data Collection of 30 Years of In Vitro Experiments Performed Under Standardized Testing Conditions. JOR Spine. 2025;8(1):e70052. doi: 10.1002/jsp2.70052, PMID: 40046266.

56. Pal GP, Sherk HH. The vertical stability of the cervical spine. Spine (Phila Pa 1976). 1988;13(5):447-449. doi: 10.1097/00007632-198805000-00001, PMID: 3187688.

57. Jaumard NV, Welch WC, Winkelstein BA. Spinal facet joint biomechanics and mechanotransduction in normal, injury and degenerative conditions. J Biomech Eng. 2011;133(7):071010. doi: 10.1115/1.4004493, PMID: 21823749.

58. Skaggs DL, Weidenbaum M, Iatridis JC, Ratcliffe A, Mow VC. Regional variation in tensile properties and biochemical composition of the human lumbar anulus fibrosus. Spine (Phila Pa 1976). 1994;19(12):1310-1319. doi: 10.1097/00007632-199406000-00002, PMID: 8066509.

59. Acaroglu ER, Iatridis JC, Setton LA, Foster RJ, Mow VC, Weidenbaum M. Degeneration and aging affect the tensile behavior of human lumbar anulus fibrosus. Spine (Phila Pa 1976). 1995;20(24):2690-2701. doi: 10.1097/00007632-199512150-00010, PMID: 8747247.

60. Tao Y, Galbusera F, Niemeyer F, Samartzis D, Vogele D, Wilke HJ. Radiographic cervical spine degenerative findings: a study on a large population from age 18 to 97 years. Eur Spine J. 2021;30(2):431-443. doi: 10.1007/s00586-020-06615-0, PMID: 33025192.

61. Hussain M, Natarajan RN, An HS, Andersson GB. Patterns of height changes in anterior and posterior cervical disc regions affects the contact loading at posterior facets during moderate and severe disc degeneration: a poroelastic C5-C6 finite element model study. Spine (Phila Pa 1976). 2010;35(18):E873-881. doi: 10.1097/BRS.0b013e3181dc60a9, PMID: 21289493.

62. Cai XY, Sang D, Yuchi CX, Cui W, Zhang C, Du CF, Liu B. Using finite element analysis to determine effects of the motion loading method on facet joint forces after cervical

disc degeneration. Comput Biol Med. 2020;116:103519. doi: 10.1016/j.compbiomed.2019.103519, PMID: 31710870.

63. Hilibrand AS, Carlson GD, Palumbo MA, Jones PK, Bohlman HH. Radiculopathy and myelopathy at segments adjacent to the site of a previous anterior cervical arthrodesis. J Bone Joint Surg Am. 1999;81(4):519-528. doi: 10.2106/00004623-199904000-00009, PMID: 10225797.

64. Lawrence BD, Hilibrand AS, Brodt ED, Dettori JR, Brodke DS. Predicting the risk of adjacent segment pathology in the cervical spine: a systematic review. Spine (Phila Pa 1976). 2012;37(22 Suppl):S52-64. doi: 10.1097/BRS.0b013e31826d60fb, PMID: 22885828.

Отримано/Received 20.06.2026
Рецензовано/Revised 04.08.2026
Прийнято до друку/Accepted 18.08.2026

Information about authors

Ievgenii I. Slynko, MD, PhD, DSc, Professor, Head of the Department of Spinal Neurosurgery, Central Nervous System Trauma, Its Consequences and Fluid Dynamics Disorders, State Institution "Romodanov Neurosurgery Institute of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine; e-mail: inst.spine@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-4831-2711

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

Vitalii I. Fortunenko, 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

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

Yuriy V. Derkach, MD, PhD, Neurosurgeon, Department of Spinal Neurosurgery, Central Nervous System Trauma, Its Consequences and Fluid Dynamics Disorders, State Institution "Romodanov Neurosurgery Institute of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine; e-mail: 290986@ukr.net; https://orcid.org/0000-0003-0830-1169

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.

Ie.I. Slynko, O.S. Nekhlopochyn, V.I. Fortunenko, V.V. Verbov, Yu.V. Derkach
Romodanov Neurosurgery Institute of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Vertical load distribution between the support structures and regional annulus fibrosus stress patterns in the cervical spine during flexion and extension: a finite element study

Abstract. ***Background.*** Degenerative cervical spine disorders are one of leading causes of chronic pain and neurological deficit. Altered load distribution between the anterior and posterior support structures is considered an important biomechanical factor in their development. Quantifying load distribution in the intact spine is necessary to study degeneration and plan interventions with minimal impact on adjacent segments. The purpose was to assess load distribution between the discs, joints, and ligaments from C2-C3 to C6-C7 during flexion and extension, and to compare intradiscal pressure with the stress state of annulus fibrosus sectors. ***Materials and methods.*** A finite-element C0-Th1 cervical spine model was built from computed tomography data. A vertical 50 N force representing head weight was applied to the occiput while motion from +54.9° flexion to −44.5° extension was prescribed (176 states). Load distribution was determined using a free-body diagram, and the annulus fibrosus was analyzed by sectors. ***Results.*** In the loaded neutral position, the discs transmitted from 39 % of the external load at C4-C5 to 77 % at C6-C7, whereas the facet joints transmitted 28–57 %. The facet path dominated at C4-C5, while disc transmission dominated at C2-C3 throughout the range. Intradiscal pressure was 0.147–0.294 MPa. During flexion, the facets disengaged, and tension in the posterior ligamentous complex produced an opposing reaction; consequently, the vertical component of disc-transmitted force reached approximately twice the external load: the pressure rose to 0.940 MPa at C5-C6. During extension, the facets carried most of the load at the mid- and lower-cervical levels. Peak contact pressure increased three- to fivefold and reached 10.62 MPa at C3-C4. The horizontal contact-force component was −124.2 N, directed posteriorly, and reflected substantial shear. At C5-C6, relatively low intradiscal pressure coincided with an increase in equivalent stress to 8.2 MPa and tensile maximum principal stress in the anterior annulus sector. The global model response was consistent with published data: C2-C7 range of motion was 59.1°, and the maximum reaction moment was 2.42 N · m. ***Conclusions.*** Load distribution between the support structures depends on head position and segmental level. These data may provide a reference for assessing the effects of degenerative changes and surgeries. Intradiscal pressure does not fully characterize the state of peripheral annulus and should be supplemented by equivalent and principal stress analysis.

Keywords: cervical spine; finite element analysis; load distribution; facet joints; intradiscal pressure; annulus fibrosus

UDC 616.728.3-007.248:616.718.5-073.75 *DOI: https://doi.org/10.22141/1608-1706.5.27.2026.1118*

L.O. Kylymniuk[1], V.M. Kovalchuk[2], M.M. Matsipura[3], V.O. Movchaniuk[4], Yu.A. Kulyk[1]
[1]SI "Institute of Traumatology and Orthopedics of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine
[2]Shupyk National Healthcare University of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[3]National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine
[4]Medical and Diagnostic Center "Medilux", Vinnytsia, Ukraine

Morphometric parameters of the proximal tibia across joint line obliquity types in medial knee osteoarthritis

Abstract. ***Background.*** *The relationship between joint line obliquity and proximal tibial morphometry in medial knee osteoarthritis remains insufficiently investigated. This study aimed to evaluate proximal tibial morphometric parameters across different joint line obliquity types defined using the modified joint line obliquity (mJLO) method.* ***Materials and methods.*** *A retrospective cross-sectional analysis was performed using weight-bearing anteroposterior radiographs of 100 knees from 70 patients with Kellgren-Lawrence grade II–III medial knee osteoarthritis. Knees were classified according to mJLO as apex distal (AD), apex neutral (AN), or apex proximal (AP). Morphometric parameters were measured using either a reference axis extending from the intercondylar eminence to the tibial condyles: lateral tibial condyle angle (LTCA), lateral tibial plateau angle (LTPA), medial tibial plateau angle (MTPA), and medial tibial condyle angle (MTCA), or the tangent to the proximal tibial articular surface: LTCA2, LTPA2, MTPA2, and MTCA2. Statistical analysis included the Kruskal-Wallis test and Kendall's τ.* ***Results.*** *The AD, AN, and AP types accounted for 72.0, 25.0, and 3.0 % of knees, respectively. Significant group differences were found for LTPA ($p < 0.00001$), MTPA ($p = 0.02$), LTPA2 ($p < 0.00001$), and MTPA2 ($p < 0.00001$). These parameters correlated significantly with mJLO (all $p \leq 0.00001$). LTCA, MTCA, LTCA2, and MTCA2 showed no significant between-group differences or correlations with mJLO.* ***Conclusions.*** *Different mJLO types in medial knee osteoarthritis are associated with distinct patterns of proximal tibial morphology. LTPA, LTPA2, MTPA, and MTPA2 showed the strongest associations with mJLO and may provide a more detailed characterization of proximal tibial geometry.*

Keywords: *knee osteoarthritis; joint line obliquity; proximal tibia; radiographic morphometry; coronal alignment*

Introduction

Knee osteoarthritis is characterized by substantial morphological heterogeneity, reflected in variations in lower limb coronal alignment, joint line obliquity (JLO), and structural changes of the articular surfaces. Conventional assessment of coronal alignment primarily relies on the hip-knee-ankle angle together with standard osseous angular parameters, including the lateral distal femoral angle (LDFA) and the medial proximal tibial angle (MPTA). However, identical overall limb alignment may coexist with different JLO patterns, highlighting the need for separate assessment of the distal femoral and proximal tibial geometry [1–3].

Recently, JLO has gained increasing recognition as an important parameter of coronal knee geometry. The Coronal Plane Alignment of the Knee (CPAK) classification demonstrated that knees with similar overall limb alignment may exhibit different joint line orientations, suggesting that JLO represents an independent characteristic of coronal knee morphology with potential implications for knee phenotyping and preoperative planning [2].

Available evidence has demonstrated that JLO is associated with the morphology of the proximal tibiofibular joint, suggesting a close relationship with the spatial organization of the proximal tibia [4].

© «Травма» / «Trauma» («Travma»), 2026
© Видавець Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2026

Для кореспонденції: Килимнюк Любов Олександрівна, докторка філософії (PhD), докторантка відділу спортивної та балетної травми ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», вул. Бульварно-Кудрявська, 27, м. Київ, 01601, Україна; e-mail: kylymniuk@gmail.com
For correspondence: Liubov Kylymniuk, PhD, Doctoral Student of the Department of Sports and Ballet Injuries, SI "Institute of Traumatology and Orthopedics of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine", Bulvarno-Kudriavska st., 27, Kyiv, 01601, Ukraine; e-mail: kylymniuk@gmail.com
Full list of authors information is available at the end of the article.

Subsequent studies have shown that, with increasing severity of osteoarthritis, the orientation of the tibiofemoral joint line progressively changes, whereas arithmetic JLO, which reflects the underlying osseous geometry — particularly the geometric relationship between the distal femur and the proximal tibia, remains relatively stable until the advanced stages of the disease [3]. These findings suggest that the assessment of JLO should take into account not only overall lower limb alignment but also the local morphological characteristics of the proximal tibia.

In addition, individual JLO parameters may be influenced by radiographic acquisition conditions, particularly the loading protocol used during full-length radiographs, as well as by the severity of osteoarthritis [5]. Interpretation of morphometric findings should therefore account for these factors.

Several methods have been proposed for assessing JLO, including the joint line orientation angle by femoral condyles, by middle knee joint space, by tibial plateau, Mikulicz joint line angle, and MPTA, as well as frontal alignment measures associated with knee JLO, such as the joint line convergence angle, knee-ankle joint angle, and hip-knee-ankle. Each of these parameters characterizes a different aspect of joint line orientation and coronal knee geometry [5].

Despite the widespread use of joint line orientation parameters in studies of osteotomy and knee arthroplasty, no standardized approach to JLO assessment has yet been established. Variability among JLO measurement methods hampers direct comparison across studies and underscores the need for standardized assessment techniques [5, 6].

Although interest in JLO in knee osteoarthritis has increased, most studies have focused on lower limb alignment, constitutional knee geometry, or the outcomes of corrective procedures. In contrast, the relationship between JLO types and the local morphometry of the proximal tibia remains insufficiently investigated, limiting the understanding of the structural heterogeneity of medial knee osteoarthritis.

The purpose was to evaluate the morphometric parameters of the proximal tibia in patients with medial knee osteoarthritis across different joint line orientation types defined according to the modified joint line obliquity (mJLO) method.

Materials and methods

The study included the radiographic evaluation of 100 knees from 70 patients with primary Kellgren-Lawrence grade II–III knee osteoarthritis predominantly affecting the medial compartment. The mean age was 63.56 ± 8.10 years. The study population comprised 26 (37.14 %) men and 44 (62.86 %) women. Unilateral knee osteoarthritis was identified in 40 (57.14 %) patients, whereas 30 (42.86 %) had bilateral disease. The individual knee joint served as the unit of radiographic morphometric and statistical analysis. The overall study design and radiographic assessment workflow are presented in Fig. 1.

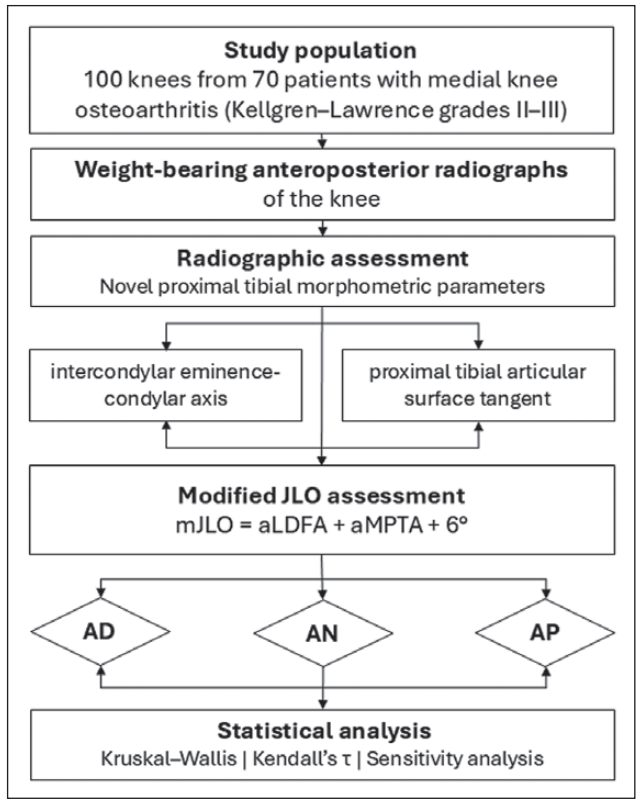


Figure 1. Flowchart of the study design and radiographic assessment protocol
Notes: aLDFA — anatomical lateral distal femoral angle; aMPTA — anatomical medial proximal tibial angle; AD — apex distal; AN — apex neutral; AP — apex proximal.

Inclusion criteria: primary Kellgren-Lawrence grade II–III knee osteoarthritis with predominant involvement of the medial compartment; a preserved lateral compartment; intact knee ligamentous structures; full knee extension or a flexion contracture of < 10°.

Exclusion criteria: bicompartmental knee osteoarthritis; secondary knee osteoarthritis; previous surgery involving the proximal tibia; knee ligament instability; active or latent infection.

Radiographic morphometric assessment was performed on standardized standing anteroposterior knee radiographs. Conventional alignment parameters, including the aMPTA and aLDFA, were measured according to standard methodology [7].

In addition, eight previously described proximal tibial morphometric parameters were evaluated according to the original measurement protocol described in detail in our previous study [8] and applied without modification in the present analysis. Four parameters — lateral tibial condyle angle (LTCA), lateral tibial plateau angle (LTPA), medial tibial plateau angle (MTPA), and medial tibial condyle angle (MTCA) — were based on a reference axis extending from the intercondylar eminence toward the tibial condyles and characterized the relationships among the tibial condyles, tibial plateau, and the anatomical axis of the tibia.

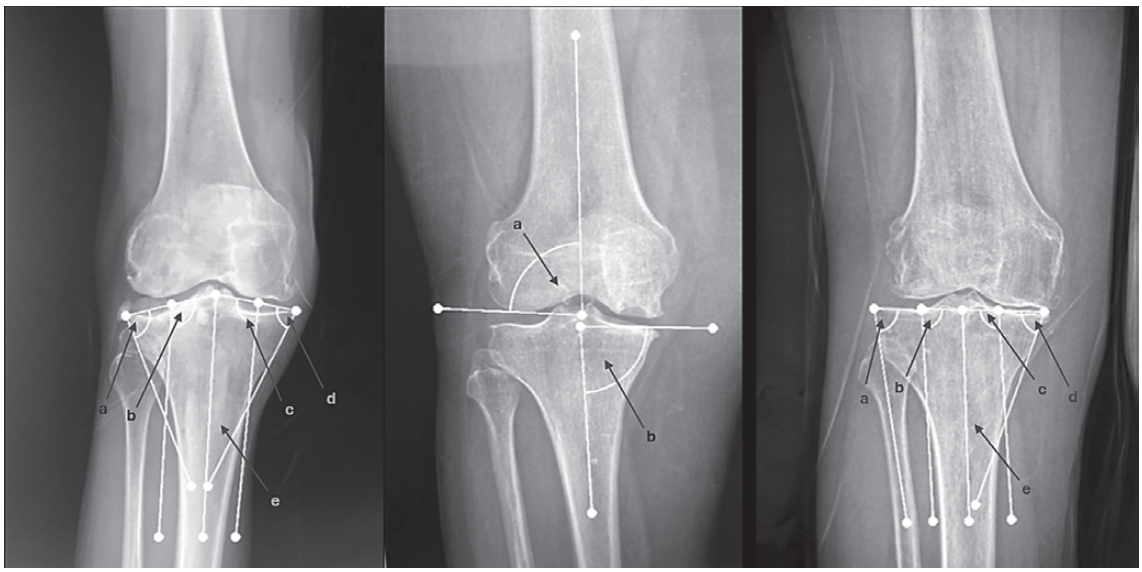


Figure 2. Radiographic measurement of proximal tibial morphometric parameters and mJLO: A — measurement of proximal tibial morphometric parameters relative to the intercondylar eminence-condylar axis in an AP knee: a) LTCA 83.0º, b) LTPA 105.8º, c) MTPA 95.3º, d) MTCA 75.5º, e) tibial anatomical axis; B — measurement of the mJLO indicating AN (86.1º + 85.8º + 6º = 177.9º): a) aLDFA 86.1º, b) aMPTA 85.8º; C — measurement of proximal tibial morphometric parameters relative to the tangent to the proximal tibial articular surface in an AD knee: a) LTCA2 79.3º, b) LTPA2 84.6º, c) MTPA2 93.6º, d) MTCA2 72.5º, e) tibial anatomical axis

The remaining four parameters (LTCA2, LTPA2, MTPA2, and MTCA2) were based on the tangent to the proximal tibial articular surface as the primary reference line.

JLO was assessed using a modified method based on the conceptual framework of the CPAK system [2]. The mJLO was calculated as follows: mJLO = aLDFA + aMPTA + 6°, where 6° is a correction factor accounting for the valgus deviation of the anatomical axis relative to the mechanical axis [7]. The resulting values were interpreted according to the classification thresholds proposed in the original CPAK methodology. Knees with mJLO < 177° were classified as AD, those with mJLO between 177 and 183° as AN, and those with mJLO > 183° as AP [2]. The original CPAK threshold values were adopted solely for categorization of JLO types and were not intended to imply direct equivalence with measurements based on mechanical alignment. Previous studies have demonstrated a strong correlation between morphological knee alignment parameters obtained from standard weight-bearing anteroposterior radiographs and full-length standing radiographs, supporting the validity of this approach for morphometric assessment [9].

The radiographic cohort was previously analyzed in studies evaluating proximal tibial morphology and joint line obliquity separately [8, 10]. The present study specifically investigates the relationship between proximal tibial morphometric parameters and mJLO types, which has not been previously evaluated.

The morphometric measurements were independently performed by two observers. Interobserver agreement was evaluated using the intraclass correlation coefficient based on a two-way mixed-effects model with absolute agreement. All measurements demonstrated excellent reliability, with intraclass correlation coefficient ≥ 0.85.

Radiographic morphometric measurements were performed using 3D Slicer (version 5.10.0; Surgical Planning Laboratory, Brigham and Women's Hospital, Boston, MA, USA). The radiographic measurement protocol, including the reference axes, morphometric parameters, and calculation of the mJLO, is illustrated in Fig. 2.

A sensitivity analysis was conducted to examine the robustness of the classification. The correction factor was varied by ± 1° (5 and 7°), while the original classification thresholds for the AD, AN, and AP groups remained unchanged, and changes in group allocation were evaluated.

Subsequently, differences in the predefined morphometric parameters were analyzed among the groups classified according to mJLO.

Statistical analysis. Data were analyzed using IBM SPSS Statistics for Windows, version 27.0.1 (IBM Corp., Armonk, NY, USA). Quantitative variables were summarized as mean ± standard deviation (M ± SD), whereas categorical variables were presented as counts (n) and percentages (%). The normality of continuous variables was evaluated using the Shapiro-Wilk test. A normal distribution was observed only for MTCA ($W = 0.9875$, $p = 0.4707$) and MTCA2 ($W = 0.9874$, $p = 0.4638$), whereas LTCA ($W = 0.9595$, $p = 0.0037$), LTPA ($W = 0.9402$, $p = 0.0002$), MTPA ($W = 0.8424$, $p < 0.001$), LTCA2 ($W = 0.9610$, $p = 0.0048$), LTPA2 ($W = 0.9603$, $p = 0.0042$), and MTPA2 ($W = 0.7405$, $p < 0.001$) showed statistically significant de-

viations from normality. Although most variables were not normally distributed, M ± SD was used for descriptive reporting, whereas non-parametric methods were applied for inferential analyses. Differences among independent groups were evaluated using the Kruskal-Wallis test, whereas relationships between variables were assessed using Kendall's rank correlation coefficient (τ). Statistical significance was defined as a two-sided p-value ≤ 0.05.

Ethical considerations. A retrospective observational cross-sectional study was performed in compliance with the ethical principles of the Declaration of Helsinki of the World Medical Association (7th revision, adopted at the 64th WMA General Assembly, Fortaleza, Brazil, October 2013) [11], the Convention on Human Rights and Biomedicine (Oviedo Convention, Council of Europe, Oviedo, Spain, April 4, 1997) [12], and the applicable national bioethical regulations [13]. Written informed consent was obtained from all participants after they had received detailed information about the study. Personal data were de-identified before analysis.

Results

Based on mJLO values, AD was identified in 72 knees (72.00 %), AN in 25 knees (25.00 %), and AP in 3 knees (3.00 %).

Sensitivity analysis using correction factors of 5 and 7° showed no significant changes in mJLO group allocation compared with the original 6° correction factor (all p > 0.05).

Analysis of proximal tibial morphometric parameters measured relative to the axis extending from the intercondylar eminence to the tibial condyles showed that the mean LTCA was 89.31 ± 7.09°. The lowest values were observed in the AP group; however, the between-group differences were not statistically significant (p = 0.22) (Table 1). No statistically significant correlation was found between LTCA and mJLO (τ = +0.05, p = 0.49).

The mean LTPA was 94.02 ± 5.07°. The highest values were identified in the AP group, whereas the lowest values were found in the AD group. The between-group differences were statistically significant (p < 0.00001). Higher LTPA values were associated with higher mJLO values, as confirmed by a moderate positive correlation between the variables (τ = +0.48, p < 0.0000001).

The mean MTPA was 101.70 ± 8.33°. The highest values were observed in the AD group and the lowest in the AP group. Significant differences were observed among the groups (p = 0.02). Higher MTPA values were associated with lower mJLO values, corresponding to a more distal joint line orientation, as confirmed by a weak negative correlation (τ = –0.30, p = 0.00001).

The mean MTCA was 80.78 ± 6.49°. The highest values were recorded in the AN group and the lowest in the AP group; however, the between-group differences were not statistically significant (p = 0.19). No significant correlation was observed between MTCA and mJLO (τ = +0.01, p = 0.83).

The distribution of proximal tibial morphometric parameters measured relative to the intercondylar eminence-condylar axis is presented in Fig. 3.

Analysis of proximal tibial morphometric parameters measured relative to the tangent to the proximal tibial articular surface showed that the mean LTCA2 was 80.78 ± 6.69°. The highest values were observed in the AN group and the lowest in the AD group; however, the between-group differences were not statistically significant (p = 0.61) (Table 2). No statistically significant correlation was found between LTCA2 and mJLO (τ = +0.05, p = 0.49).

The mean LTPA2 was 84.83 ± 4.49°. The highest values were observed in the AP group, whereas the lowest values were found in the AD group. The between-group differences were statistically significant (p < 0.00001). A moderate positive correlation was found between LTPA2 and mJLO

Table 1. Morphometric parameters of the proximal tibia measured relative to the axis extending from the intercondylar eminence to the tibial condyles, degrees (mean ± SD)

Parameter	mJLO type			p-value
	AD (n = 72)	AN (n = 25)	AP (n = 3)	
LTCA	89.52 ± 7.33	89.42 ± 6.57	83.33 ± 3.21	0.22
LTPA	92.65 ± 4.70	96.74 ± 3.09	104.33 ± 7.37	< 0.00001*
MTPA	102.00 ± 9.45	101.76 ± 3.36	94.00 ± 5.57	0.02*
MTCA	80.58 ± 6.37	81.92 ± 6.73	76.00 ± 7.21	0.19

Note (here and in Table 2): * — statistically significant at p ≤ 0.05.

Table 2. Morphometric parameters of the proximal tibia measured relative to the tangent to the proximal tibial articular surface, degrees (mean ± SD)

Parameter	mJLO type			p-value
	AD (n = 72)	AN (n = 25)	AP (n = 3)	
LTCA2	80.42 ± 6.86	81.80 ± 5.80	81.00 ± 11.14	0.61
LTPA2	83.44 ± 3.98	87.58 ± 2.80	95.33 ± 2.89	< 0.00001*
MTPA2	95.24 ± 7.54	92.06 ± 2.89	84.33 ± 2.52	< 0.00001*
MTCA2	71.71 ± 6.67	73.00 ± 7.36	66.67 ± 1.53	0.13

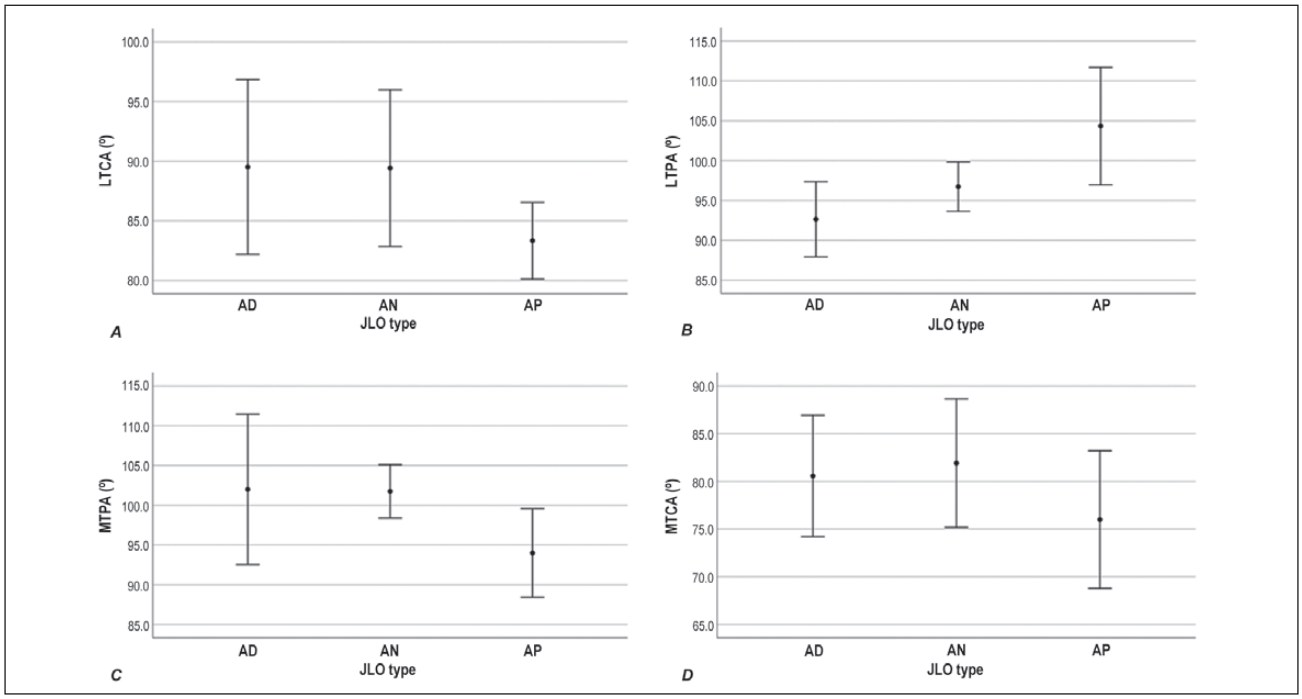


Figure 3. Comparison of proximal tibial morphometric parameters measured relative to the axis extending from the intercondylar eminence to the tibial condyles across mJLO types: A — lateral tibial condyle angle; B — lateral tibial plateau angle; C — medial tibial plateau angle; D — medial tibial condyle angle

($\tau = +0.53$, $p < 0.0000001$), indicating that higher LTPA2 values were associated with a more proximal joint line orientation.

The mean MTPA2 was 94.12 ± 6.92°. The highest values were observed in the AD group and the lowest in the AP group. The between-group differences were statistically significant ($p < 0.00001$). An inverse relationship was observed between MTPA2 and mJLO, as confirmed by a moderate negative correlation between the variables ($\tau = -0.56$, $p < 0.0000001$).

The mean MTCA2 was 71.88 ± 6.80°. The highest values were observed in the AN group and the lowest in the AP group; however, the between-group differences were not statistically significant ($p = 0.13$). No statistically significant correlation was identified between MTCA2 and mJLO ($\tau = -0.04$, $p = 0.56$).

The between-group variation in parameters measured relative to the proximal tibial articular surface tangent is illustrated in Fig. 4.

Discussion

In the present study, the AD orientation type was identified in 72.00 % of knees, AN in 25.00 %, and AP in 3.00 %. Despite using a modified method for calculating mJLO based on standard short radiographs, the observed distribution closely corresponded to that reported in studies employing the original CPAK system. Mulpur et al. revealed frequencies of 74.0, 22.6, and 3.4 % for the AD, AN, and AP groups, respectively [14], Şenel et al. — 73.3, 25.1, and 1.7 % [15], whereas MacDessi et al. reported 67.0, 31.8, and 2.6 % [2]. These findings indicate that, despite the use of a modified approach for assessing JLO, the distribution observed in our study is comparable to that reported in studies based on full-length standing radiographs using the original CPAK methodology.

In our previous studies, we demonstrated that different mJLO types are associated with variations in the coronal [10], sagittal [16], and patellofemoral [17] geometry of the knee. The present study extends these findings by establishing that these differences also involve the local morphology of the proximal tibia. The LTPA, LTPA2, MTPA, and MTPA2 demonstrated statistically significant between-group differences and significant correlations with mJLO. In contrast, LTCA, LTCA2, MTCA, and MTCA2 showed no significant association with it.

JLO is an independent characteristic of the coronal knee phenotype and cannot be fully described by the overall degree of varus or valgus alignment, consistent with previous studies [1, 2, 18]. In particular, Suardi et al. confirmed the morphological heterogeneity of the varus knee, demonstrating that similar coronal deformities may arise from different contributions of the femur, tibia, and intra-articular components [18].

In the present study, knees with AD exhibited lower LTPA and LTPA2 values together with higher MTPA and MTPA2. This combination of morphometric parameters may be associated with medial deviation of the tibial axis and the resulting alteration in the spatial relationship between the tibial axis, the intercondylar eminence, and the articular surfaces. A similar medial shift of the tibial mechanical axis in medial knee osteoarthritis was described by Nejima et al., who attributed this finding to remodeling of the proximal

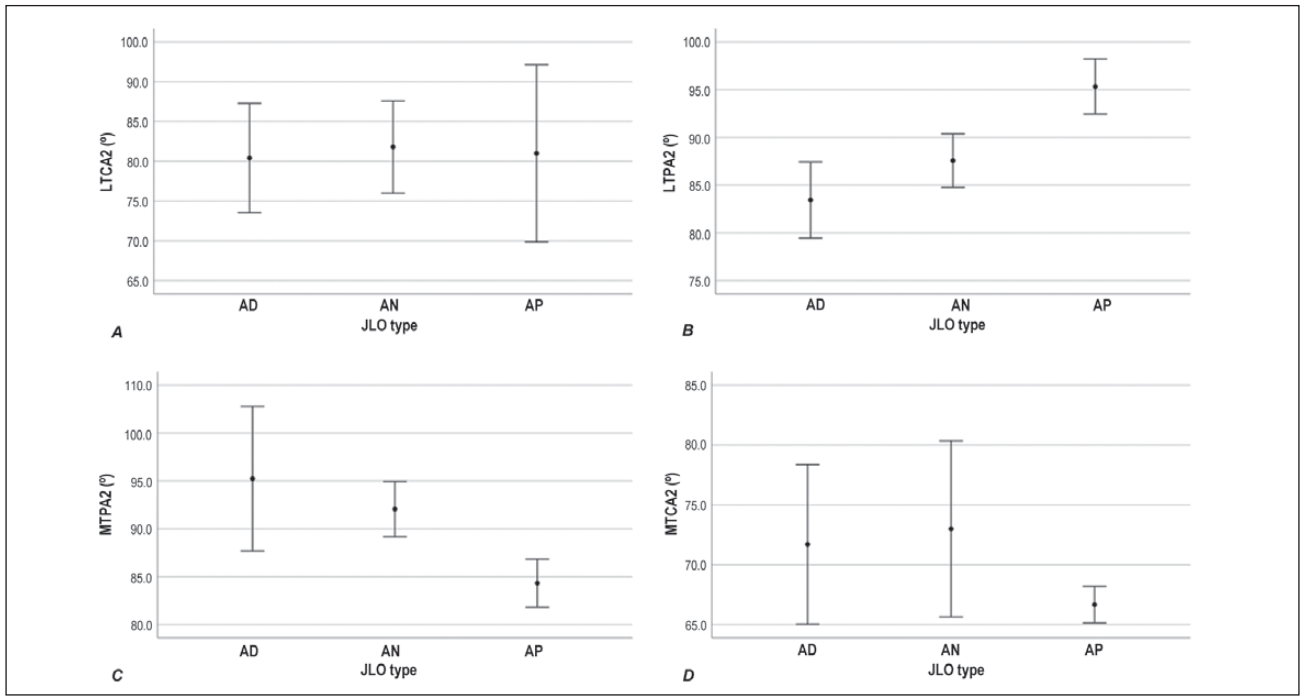


Figure 4. Comparison of proximal tibial morphometric parameters measured relative to the tangent to the proximal tibial articular surface across mJLO types: A — lateral tibial condyle angle 2; B — lateral tibial plateau angle 2; C — medial tibial plateau angle 2; D — medial tibial condyle angle 2

tibia and changes in the spatial relationship among anatomical landmarks [19]. Although MTCA and MTCA2 did not differ significantly among the mJLO groups, these parameters may also reflect remodeling of the medial tibial condyle, including loss of osseous and cartilaginous tissue, with a consequent reduction in the height of its weight-bearing region. Such remodeling may result in inferior and medial displacement of both reference lines used for morphometric assessment. In contrast, changes in LTCA and LTCA2 appear to be less specific and are more likely related to the overall alteration in the spatial position of the tibia, particularly medial deviation of its longitudinal axis.

Conversely, knees with AP demonstrated higher LTPA and LTPA2 together with lower MTPA and MTPA2, indicating the opposite pattern of spatial remodeling of the proximal tibia. The observed values of LTCA, LTCA2, MTCA, and MTCA2 may reflect remodeling of the osseous and cartilaginous tissues within the weight-bearing regions of the tibial condyles. This process may be accompanied by inferior and medial displacement of the tangent to the tibial condyles together with a more proximal orientation of the axis extending from the intercondylar eminence to the tibial condyles. However, because no statistically significant associations were observed for these parameters, this explanation should be regarded as a morphological interpretation that requires further validation using computed tomography, magnetic resonance imaging, or longitudinal follow-up studies.

The value of a detailed assessment of the local geometry of the proximal tibia is further supported by the computed tomography study of 1,158 knees conducted by Siddiqi et al. In that study, knees with neutral, varus, and valgus osteoarthritic alignment differed not only in conventional coronal alignment parameters but also in the medial and lateral tibial plateau inclination, rotational characteristics, and condylar morphology [20]. Furthermore, the association between JLO and the morphology of the proximal tibiofibular joint reported by Erkurt et al. suggests that joint line orientation reflects the overall three-dimensional organization of the proximal leg rather than representing merely a single angular parameter [4].

Whereas previous studies have primarily evaluated the geometry of the proximal tibia using conventional coronal alignment parameters [18, 20–22], the morphometric parameters proposed here offer a more comprehensive characterization of the internal geometry of the proximal tibia. These parameters are not intended to replace the CPAK classification or conventional assessment of coronal alignment but rather to serve as a complementary morphometric tool.

The potential clinical relevance of this morphometric approach warrants further investigation in the context of corrective osteotomy and total knee arthroplasty planning. Kim et al. demonstrated that changes in the MPTA following medial open-wedge high tibial osteotomy are not always accompanied by proportional changes in JLO. However, a postoperative MPTA greater than 95.2° was associated with a marked increase in JLO, valgus overcorrection, and poorer clinical outcomes [21].

Limitations. Several limitations of this study should be acknowledged. Only a small number of AP cases were available, reflecting the low natural prevalence of this JLO

type among patients with medial knee osteoarthritis [2, 14, 15]. Consequently, the findings obtained for this subgroup should be confirmed in larger cohorts. The study was performed using standard weight-bearing anteroposterior knee radiographs without validation against full-length standing radiographs. Although earlier studies have demonstrated a strong correlation between anatomical and mechanical alignment parameters [9], the use of a +6° correction factor for calculating mJLO represents a simplification and may not fully account for individual anatomical variations. Despite the robustness of the classification demonstrated by the sensitivity analysis, this approach requires further prospective validation using full-length standing radiographs. Additional limitations include the retrospective study design and the use of radiographs obtained at different medical centers, which may have introduced variability in radiographic acquisition conditions. Because 30 patients contributed both knees, the statistical analysis did not explicitly account for potential within-patient correlation. In addition, because mJLO includes aMPTA, some of the observed associations with proximal tibial morphometric parameters may partly reflect shared geometric relationships.

Conclusions

Patients with different mJLO types in medial knee osteoarthritis demonstrated distinct morphometric characteristics of the proximal tibia, indicating that its local geometry varies according to joint line orientation.

The LTPA, LTPA2, MTPA, and MTPA2 demonstrated statistically significant differences among joint line orientation types and significant correlations with mJLO. In contrast, LTCA, LTCA2, MTCA, and MTCA2 showed no statistically significant associations with joint line orientation types.

These morphometric parameters may provide a more detailed characterization of proximal tibial geometry according to mJLO in patients with medial knee osteoarthritis.

References

1. MacDessi SJ, Allom RJ, Griffiths-Jones W, Chen DB, Wood JA, Bellemans J. The importance of joint line obliquity: a radiological analysis of restricted boundaries in normal knee phenotypes to inform surgical decision making in kinematically aligned total knee arthroplasty. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2022;30(9):2931-2940. doi: 10.1007/s00167-022-06872-0.

2. MacDessi SJ, Griffiths-Jones W, Harris IA, Bellemans J, Chen DB. Coronal Plane Alignment of the Knee (CPAK) classification. Bone Joint J. 2021;103-B(2):329-37. doi: 10.1302/0301-620X.103B2.BJJ-2020-1050.R1.

3. Farey JE, Leong BJ, Wood JA, et al. Dynamic changes to the tibiofemoral joint line with increasing osteoarthritis severity and its relationship to constitutional alignment : a radiological analysis of 3,320 knees. Bone Jt Open. 2026;7(2):249-258. doi: 10.1302/2633-1462.72.BJO-2025-0370.R1.

4. Erkurt N, Bayraktar TO, Özkan CB, et al. Association of coronal knee phenotype and joint line obliquity with proximal tibiofibular joint morphology in advanced osteoarthritis. J Orthop Surg (Hong Kong). 2026;34(2):1-9. doi: 10.1177/10225536261457653.

5. Xie T, van der Veen HC, van den Akker-Scheek I, Brouwer RW. Assessment of joint line obliquity and its related frontal deformity using long-standing radiographs. J Orthop. 2023;40:57-64. doi: 10.1016/j.jor.2023.04.014.

6. Xie T, Brouwer RW, van den Akker-Scheek I, van der Veen HC. Clinical relevance of joint line obliquity after high tibial osteotomy for medial knee osteoarthritis remains controversial: a systematic review. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2023;31(10):4355-4367. doi: 10.1007/s00167-023-07486-w.

7. Cassar-Pullicino VN, Davies AM (eds.) Measurements in musculoskeletal radiology. Berlin: Springer, 2020. 860 p. doi: 10.1007/978-3-540-68897-6.

8. Kylymniuk L. Peculiarities of degenerative changes in the proximal tibia according to knee joint morphotype. Bull Med Biol Res. 2025;7(3):18-25. doi: 10.63341/bmbr/3.2025.18.

9. Unal M, Ercan S, Budeyri A, Toprak U, Şalkaci A. Anatomical axis validation of lower extremity for different deformities: A radiological study. SAGE Open Med. 2020;8:2050312120923822. doi: 10.1177/2050312120923822.

10. Blonskyi RI, Kylymniuk LO. Influence of joint line obliquity on morphological parameters of the knee joint in osteoarthritis. Zaporozhye Medical Journal. 2026;28(1):37-46. doi: 10.14739/2310-1210.2026.1.339795 (in Ukrainian).

11. The World Medical Association (1964/2013). Declaration of Helsinki: Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects. Ferney-Voltaire: WMA; 2013. Available from: https://www.wma.net/what-we-do/medical-ethics/declaration-of-helsinki/.

12. Council of Europe. 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. Strasbourg: Council of Europe; 1997. Available from: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_334#Text (in Ukrainian).

13. Ministry of Health of Ukraine. Order 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. Kyiv: Ministry of Health of Ukraine; 2009. Available from: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1010-09#Text (in Ukrainian).

14. Mulpur P, Desai KB, Mahajan A, Masilamani ABS, Hippalgaonkar K, Reddy AVG. Radiological Evaluation of the Phenotype of Indian Osteoarthritic Knees based on the Coronal Plane Alignment of the Knee Classification (CPAK). Indian J Orthop. 2022;56(12):2066-2076. doi: 10.1007/s43465-022-00756-8.

15. Şenel A, Eren M, Sert S, Gürpınar T, Çarkçı E, Polat B. Phenotyping of the Turkish population according to Coronal Plane Alignment of the Knee classification: A retrospective cross-sectional study. Jt Dis Relat Surg. 2024;35(1):194-201. doi: 10.52312/jdrs.2023.1464.

16. Kostrub O, Blonskyi R, Kylymniuk L, Khytruk K, Khytruk S. Radiographic Features of Knee Osteoarthritis in the Lateral View Depending on Joint Line Obliquity. Orthopaedics, Traumatology and Prosthetics. 2025;4:53-62. doi: 10.15674/0030-59872025453-62.

17. Kostrub OO, Blonskyi RI, Kylymniuk LO, Movchaniuk VO. Morphological parameters of patellar position depending on the joint line obliquity in knee osteoarthritis. Mo-

dern Medical Technology. 2026;18(1):29-38. doi: 10.14739/mmt.2026.1.343256.

18. Suardi C, Stimolo D, Zanna L, et al. Varus morphology and its surgical implication in osteoarthritic knee and total knee arthroplasty. J Orthop Surg Res. 2022;17(1):299. doi: 10.1186/s13018-022-03184-4.

19. Nejima S, Kumagai K, Kobayashi H, et al. Medialization of the mechanical axis of the tibia is related to lateralization of the tibial tuberosity in knee osteoarthritis. Knee. 2021;30:134-140. doi: 10.1016/j.knee.2021.03.023.

20. Siddiqi A, Anis H, Borukhov I, Piuzzi NS. Osseous Morphological Differences in Knee Osteoarthritis. J Bone Joint Surg Am. 2022;104(9):805-812. doi: 10.2106/JBJS.21.00892.

21. Kim JS, Lim JK, Choi HG, et al. Excessively Increased Joint-Line Obliquity After Medial Opening-Wedge High Tibial Osteotomy Is Associated With Inferior Radiologic and Clinical Outcomes: What Is Permissible Joint-Line Obliquity. Arthroscopy. 2022;38(6):1904-1915. doi: 10.1016/j.arthro.2021.11.004.

22. Park J-G, Han S-B, Jang K-M. Association of Preoperative Tibial Varus Deformity With Joint Line Orientation and Clinical Outcome After Open-Wedge High Tibial Osteotomy for Medial Compartment Osteoarthritis: A Propensity Score — Matched Analysis. Am J Sports Med 2021;49(13):3551-3560. doi: 10.1177/03635465211044146.

Received 13.07.2026
Revised 21.08.2026
Accepted 03.09.2026

Information about authors

Liubov Kylymniuk, PhD, Doctoral Researcher of the Department of Sports and Ballet Injuries, State Institution "Institute of Traumatology and Orthopedics of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine; e-mail: kylymniuk@gmail.com; https://orcid.org/0000-0003-0170-8708

Volodymyr Kovalchuk, PhD, Assistant of the Department of Orthopedics, Orthoplastic Surgery, and Prosthetics, Shupyk National Healthcare University of Ukraine, Kyiv, Ukraine; https://orcid.org/0000-0003-2363-7365

Maksym Matsipura, PhD, Assistant of the Department of Traumatology and Orthopedics of the National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; https://orcid.org/0000-0002-5631-8056

Vadym Movchaniuk, PhD, Orthopedic and Trauma Surgeon, Medical and Diagnostic Center "Medilux", Vinnytsia, Ukraine; https://orcid.org/0000-0002-7496-9530

Yurii Kulyk, PhD, Head of the Scientific, Organizational and Methodological Department, State Institution "Institute of Traumatology and Orthopedics of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine; https://orcid.org/0000-0003-4623-6863

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 authors declare that this study received no financial support.

Authors' contribution. L.O. Kylymniuk — concept and design of the study, collection and processing of materials, analysis and interpretation of the data obtained, literature review, writing the text; V.M. Kovalchuk — analysis and interpretation of the data obtained, literature review, critical review of the manuscript; M.M. Matsipura — collection and processing of materials, analysis of the data obtained, literature review, critical review of the manuscript; V.O. Movchaniuk — collection and processing of materials, analysis and interpretation of the data obtained, literature review; Yu.A. Kulyk — design of the study, analysis and interpretation of the data obtained, literature review, writing and critical review of the manuscript.

Килимнюк Л.О.[1], Ковальчук В.М.[2], Маціпура М.М.[3], Мовчанюк В.О.[4], Кулик Ю.А.[1]
[1]ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», м. Київ, Україна
[2]Національний університет охорони здоров'я України імені П.Л. Шупика, м. Київ, Україна
[3]Вінницький національний медичний університет ім. М.І. Пирогова, м. Вінниця, Україна
[4]Лікувально-діагностичний центр «Мединюкс», м. Вінниця, Україна

Морфометричні параметри проксимального відділу великогомілкової кістки залежно від типу нахилу суглобової лінії при медіальному остеоартриті колінного суглоба

Резюме. ***Актуальність.*** Взаємозв'язок між нахилом суглобової лінії та морфометричними параметрами проксимального відділу великогомілкової кістки при медіальному остеоартриті колінного суглоба залишається недостатньо вивченим. ***Мета:*** оцінити морфометричні параметри проксимального відділу великогомілкової кістки при різних положеннях суглобової верхівки, визначених за модифікованим методом оцінки нахилу суглобової лінії (mJLO). ***Матеріали та методи.*** Проведено ретроспективне поперечне дослідження рентгенограм 100 колінних суглобів 70 пацієнтів із медіальним остеоартритом колінного суглоба II–III стадії за Kellgren — Lawrence, виконаних у передньозадній проєкції з навантаженням. Відповідно до mJLO колінні суглоби класифікували як apex distal (AD), apex neutral (AN) або apex proximal (AP). Визначали морфометричні параметри відносно референтної осі, проведеної від міжвиросткового підвищення до виростків великогомілкової кістки: кут латерального виростка великогомілкової кістки (LTCA), кут латерального плато великогомілкової кістки (LTPA), кут медіального плато великогомілкової кістки (MTPA) і кут медіального виростка великогомілкової кістки (MTCA), а також параметри відносно дотичної до суглобової поверхні проксимального відділу великогомілкової кістки: LTCA2, LTPA2, MTPA2 і MTCA2. Статистичний аналіз включав критерій Краскела — Уолліса й коефіцієнт рангової кореляції Кендалла τ. ***Результати.*** Типи AD, AN та AP визначено в 72,0; 25,0 і 3,0 % колінних суглобів відповідно. Статистично значущі міжгрупові відмінності встановлено для LTPA ($p < 0{,}00001$), MTPA ($p = 0{,}02$), LTPA2 ($p < 0{,}00001$) та MTPA2 ($p < 0{,}00001$). Доведено вірогідні кореляції зазначених параметрів із показниками mJLO (усі $p \le 0{,}00001$). Для LTCA, MTCA, LTCA2 та MTCA2 статистично значущих міжгрупових відмінностей або кореляцій із mJLO не встановлено. ***Висновки.*** Різні типи mJLO при медіальному остеоартриті колінного суглоба пов'язані з відмінними морфологічними патернами проксимального відділу великогомілкової кістки. Найбільш виражені асоціації з mJLO встановлено для LTPA, LTPA2, MTPA та MTPA2, які характеризують особливості геометрії проксимального відділу великогомілкової кістки залежно від положення суглобової верхівки.

Ключові слова: остеоартрит колінного суглоба; нахил суглобової лінії; проксимальний відділ великогомілкової кістки; рентгенографічна морфометрія; корональне вирівнювання

УДК 616.25-002.3-001-089.8 *DOI: https://doi.org/10.22141/1608-1706.5.27.2026.1119*

Усенко О.Ю., Клімас А.С.
Національний науковий центр хірургії та трансплантології імені О.О. Шалімова НАМН України, м. Київ, Україна

Флуоресцентно-навігована відеоасистована торакоскопічна хірургія в лікуванні посттравматичної емпієми плеври при бойових ушкодженнях грудної клітки. Післяопераційна оцінка

Резюме. ***Актуальність.*** *Вибір оптимального підходу до лікування емпієми плеври на сьогодні залишається дискусійним, а тактика лікування варіюється від медикаментозних до хірургічних методів залежно від тяжкості захворювання. Дослідження спрямоване на вдосконалення хірургічного лікування посттравматичної емпієми плеври, що виникла внаслідок бойових ушкоджень грудної клітки, шляхом впровадження відеоторакоскопічних технологій (VATS) з інтраопераційною ICG-флуоресцентною візуалізацією життєздатності та об'єктивного визначення меж резекції легеневої паренхіми.* ***Матеріали та методи.*** *Проаналізовано результати хірургічного лікування 26 поранених із посттравматичною емпіємою плеври, які перебували на стаціонарному лікуванні в Національному науковому центрі хірургії та трансплантології імені О.О. Шалімова у 2022–2025 рр. Усіх поранених методом часової рандомізації було розподілено на дві групи залежно від застосованої хірургічної тактики, оперативного доступу та способу інтраопераційного визначення життєздатності легеневої паренхіми. До групи дослідження увійшли 16 пацієнтів, яким виконували VATS із плевректомією, декортикацією та, за показаннями, атиповою резекцією ушкодженої легеневої паренхіми з використанням ICG-флуоресцентної оцінки її перфузії та життєздатності. До групи порівняння увійшли 10 пацієнтів, яким аналогічні за обсягом втручання виконували з використанням торакотомного доступу, а життєздатність тканин і межі резекції визначали на підставі стандартної візуально-тактильної оцінки. Аналізували частоту післяопераційних ускладнень та повторних оперативних втручань. Для оцінки динаміки виникнення післяопераційної пневмонії та порівняння ймовірності збереження стану без цього ускладнення між досліджуваними групами застосовували аналіз Каплана — Мейєра.* ***Результати.*** *Частота післяопераційної пневмонії становила 18,8 % у групі дослідження та 90,0 % у групі порівняння ($p = 0,001$). Аналіз Каплана — Мейєра підтвердив статистично значущі міжгрупові відмінності за часом до розвитку післяопераційної пневмонії (log-rank $\chi^2 = 16,983$; $p < 0,001$). У групі дослідження не зареєстровано випадків післяопераційного витоку повітря та повторних оперативних втручань, тоді як у групі порівняння їх частота становила по 20,0 %. Ексудативний плеврит із необхідністю плевральної пункції спостерігали у 6,2 та 30,0 % пацієнтів відповідно, однак відмінності за цими показниками не досягли статистичної значущості.* ***Висновки.*** *Ліпші післяопераційні показники в досліджуваній групі свідчать про перспективність застосування VATS у поєднанні з інтраопераційною ICG-флуоресцентною візуалізацією як тактики хірургічного лікування посттравматичної емпієми плеври, спричиненої бойовими ушкодженнями грудної клітки.*

Ключові слова: *бойова травма грудної клітки; посттравматична емпієма плеври; відеоасистована торакоскопічна хірургія (VATS); індоціанін зелений; ICG-флуоресценція; флуоресцентна навігація; декортикація легені; післяопераційна пневмонія*

© «Травма» / «Trauma» («Travma»), 2026
© Видавець Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2026

Для кореспонденції: Андрій Клімас, кандидат медичних наук, старший науковий співробітник, відділ торако-абдомінальної хірургії, Національний науковий центр хірургії та трансплантології імені О.О. Шалімова НАМН України, вул. Академіка Шалімова, 30, м. Київ, 03126, Україна; e-mail: klimas.andrew@gmail.com
For correspondence: Andrii Klimas, PhD in Medicine, Senior Researcher, Department of Thoraco-Abdominal Surgery, Shalimov National Scientific Center of Surgery and Transplantation of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Akademika Shalimova st., 30, Kyiv, 03126, Ukraine; e-mail: klimas.andrew@gmail.com
Full list of authors information is available at the end of the article.

Вступ

Будь-які порушення герметичності грудної клітки або пошкодження легеневої тканини, незалежно від того, чи спричинені вони торакальною операцією або травмою, створюють «ворота» для проникнення мікроорганізмів у плевральну порожнину та можуть призвести до розвитку емпієми плеври, яка може ускладнювати перебіг пневмонії, виникати внаслідок травми або мати ятрогенний характер [1–4].

Частка посттравматичної емпієми у пацієнтів з травмою грудної клітки становить від 1,6 до 25 % [5]. Рівень смертності коливається від 7 до 11 % протягом 30 днів і перевищує 19 % протягом 1 року, а у пацієнтів з активним злоякісним новоутворенням та емпіємою він становить 32,7 % [6, 7].

На сьогодні питання щодо оптимального підходу до лікування емпієми плеври залишаються дискусійними. Лікування емпієми плеври залежить від її тяжкості та варіює від медикаментозних до хірургічних методів. Запущені або складні випадки емпієми потребують хірургічного втручання, такого як відеоасистована торакоскопічна хірургія (VATS) або відкрита декортикація для видалення гною та потовщеної тканини. Близько 20 % пацієнтів з емпіємою плеври потребують хірургічного втручання [7]. На думку S. Deniz et al., при емпіємі плеври медикаментозне лікування та хірургічне втручання, таке як торакоцентез, дренажна торакостомія, відеоторакоскопія, фібринолітична терапія, може бути обрано як перший метод лікування замість відкритого хірургічного втручання [8].

Перевагами VATS є візуалізація всієї грудної порожнини, видалення ураженої плеври, поліпшений післяопераційний контроль болю, менше порушень дихання, скорочення тривалості перебування в лікарні та зменшення кількості ускладнень, включаючи 30-денну смертність. Продемонстровано вищий початковий рівень успішності лікування та нижчий рівень смертності при застосуванні VATS. Однак існують лише невеликі дослідження негайного хірургічного лікування порівняно з дренуванням грудної клітки фібринолітиками на початку лікування емпієми, але для остаточного висновку необхідні рандомізовані контрольовані дослідження зі збільшенням кількості випадків [9]. На сьогодні стратегія лікування емпієми плеври на предмет найефективнішого методу — первинного хірургічного втручання або нехірургічного лікування — не узгоджена [9]. Пильна увага до післяопераційних і віддалених наслідків, а також новітніх методів діагностики життєво важлива для розробки ефективних стратегій лікування в цій складній галузі медицини [10].

Сьогодні Україна живе в умовах воєнного стану, а вся її територія піддається постійним ударам з російського боку, у зв'язку з чим спостерігається широка залученість цивільних хірургів до надання допомоги з приводу бойових поранень, які повинні бути обізнаними зі специфікою механізмів інфікування тканин при бойових травмах і пораненнях та враховувати високий ступінь їх забруднення та високий ризик розвитку ранової інфекції [11, 12]. У зв'язку з цим механічне перенесення лікувальної тактики, ефективної в умовах цивільної хірургії мирного часу, у практику лікування бойових поранень не завжди є обґрунтованим і за певних обставин може супроводжуватися незадовільними результатами. Зокрема, застосування лише антибактеріальної терапії для контролю інфекційних ускладнень проникних поранень або недостатній обсяг первинної хірургічної обробки можуть бути неадекватними за умов значної контамінації та масивного ушкодження тканин.

На тлі зазначених особливостей бойової травми грудної клітки та органів грудної порожнини особливого значення набувають її гнійно-септичні ускладнення, розвиток яких значною мірою визначає подальший перебіг захворювання, тривалість лікування та його результати. Частота розвитку інфекції при бойовій травмі за ділянкою хірургічного втручання у грудній клітці (після живота — 60,7 %, кінцівок та кісток таза — 36,8 %, голови та шиї — 30,2 %) становить 27,7 % [13]. Одним із найбільш тяжких таких ускладнень є посттравматична емпієма плеври, що формується внаслідок інфікування плевральної порожнини після травматичного ушкодження грудної клітки. В умовах бойової травми ризик її виникнення може додатково зростати внаслідок значної первинної контамінації рани, масивного ушкодження тканин, наявності гемотораксу, етапності надання медичної допомоги та необхідності медичної евакуації.

У контексті бойової травми грудної клітки особливого значення набуває своєчасне виявлення та активне лікування посттравматичної емпієми плеври. Прогресування інфекційно-запального процесу супроводжується накопиченням інфікованого ексудату, відкладенням фібрину, формуванням плевральних зрощень та подальшою організацією фіброзних нашарувань, що призводить до обмеження розправлення легені [14]. На цьому етапі консервативне лікування та ізольоване дренування плевральної порожнини можуть бути недостатньо ефективними, що зумовлює необхідність хірургічної санації плевральної порожнини та декортикації легені [15].

Традиційно хірургічне лікування організованої емпієми передбачало виконання торакотомії з санацією плевральної порожнини та декортикацією легені. Водночас розвиток мініінвазивної торакальної хірургії створив передумови для ширшого застосування VATS, спрямованої на адекватну санацію плевральної порожнини, видалення фібринозних нашарувань і відновлення повноцінного розправлення легені при меншій операційній травмі. Так, у дослідженні, проведеному H.L. Lin et al., раннє застосування процедури VATS знизило ризик емпієми та скоротило тривалість залежності від апарату штучної вентиляції легень [16].

A.J. Patel et al. (2025) наголошують на суттєвих перевагах застосування VATS над традиційною відкритою торакотомією. Проведення VATS, особливо у перші 72 години після травми, дозволяє знизити інтенсивність післяопераційного болю, скоротити тривалість стаціонарного лікування та знизити ризик інфекційних

ускладнень, а також сприяє швидкій евакуації згустків крові, зменшує тривалість респіраторної підтримки та запобігає розвитку фібротораксу й емпієми плеври [17]. При цьому автори зазначають, що брак масштабних рандомізованих контрольованих досліджень не дозволяє остаточно визначити критерії відбору пацієнтів та оптимальні терміни для виконання VATS при торакальній травмі.

Очікується, що поєднання відеоторакоскопії з флуоресцентною навігацією індоціаніном зеленим (ICG) дозволить реалізувати концепцію органозберігаючого лікування, забезпечити прецизійну (високоточну) оцінку життєздатності легеневої тканини, а також оптимізувати пошук і видалення джерел прихованого аеро- та гемостазу.

Мета роботи: вдосконалити хірургічне лікування посттравматичної емпієми плеври, що виникла внаслідок бойових ушкоджень грудної клітки, шляхом впровадження відеоторакоскопічних технологій з інтраопераційною ICG-флуоресцентною візуалізацією життєздатності та об'єктивного визначення меж резекції легеневої паренхіми.

Матеріали та методи

На поточному етапі роботи проведено аналіз клініко-інструментальних даних та результатів хірургічного лікування 26 поранених із посттравматичною емпіємою плеври, які перебували на лікуванні в умовах відділу торако-абдомінальної хірургії Державної установи «Національний науковий центр хірургії та трансплантології імені О.О. Шалімова» НАМН України впродовж 2022–2025 років.

Критерії включення у дослідження:

— характер травми — наявність проникних вогнепальних осколкових поранень або закритої бойової травми грудної клітки;

— клінічний діагноз та лікування — розвиток емпієми плеври, що потребував хірургічного втручання шляхом відеоасистованої торакоскопії з використанням ICG-флуоресценції або відкритої торакотомії (включаючи випадки конверсії — переходу з VATS на відкритий доступ під час операції);

— відстрочене хірургічне втручання (3-тя — 7-ма доба): як правило, пацієнти були госпіталізовані саме у цей період з різних причин — або невчасної евакуації, або тому, що витрачався час на стабілізацію їх стану;

— віковий ценз — вік пацієнтів становив від 20 до 59 років включно.

Критерії виключення з дослідження:

— наявність супутніх активних інфекційних процесів іншої локалізації, системних захворювань крові або імунодефіцитних станів;

— випадки, коли відеоторакоскопія виконувалася виключно з діагностичною метою або для ексцизійної біопсії без подальшого радикального хірургічного етапу.

Отримана письмова інформована згода хворих на участь у дослідженні та використання персональних медичних даних у наукових цілях. Комісія з питань біомедичної етики ДУ «ННЦХТ імені О.О. Шалімова» НАМН України встановила відповідність дослідження основним положенням Належної клінічної практики (Good Clinical Practice, GCP, 1996), Конвенції Ради Європи про права людини та біомедицину від 04.04.1997 р., Гельсінської декларації Всесвітньої медичної асоціації щодо етичних принципів проведення медичних досліджень за участю людини, а також вимогам Наказу Міністерства охорони здоров'я України від 01.11.2000 р. № 281.

Критеріями розподілу хворих на групи слугували варіант застосованої хірургічної тактики та спосіб контролю життєздатності легеневої паренхіми безпосередньо під час операції. Методом часової рандомізації сформовано дві групи пацієнтів: до групи дослідження увійшло 16 поранених, яким виконували VATS із ICG-навігацією, а до групи порівняння — 10 поранених, у яких застосовували торакотомію. В обох групах об'єм виконаних операцій охоплював плевректомію, декортикацію легені та, за показаннями, атипову резекцію травмованої легеневої тканини. Отже, базові відмінності у лікувальній тактиці між групами полягали у характері хірургічного доступу (малоінвазивний (VATS) проти традиційного відкритого (торакотомія)) та способі верифікації стану тканин (ICG-навігація проти стандартного суб'єктивного хірургічного огляду та пальпації).

Групи хворих були порівнянні за середнім віком та статтю. Демографічна однорідність сформованих груп гарантує валідність та створює надійне підґрунтя для порівняння результатів лікування пацієнтів. Крім того, групи були однорідними за видом бойового ушкодження (проникні вогнепальні осколкові пошкодження/закрита бойова травма) та за показниками ІМТ, загального білка та альбуміну. Зазначені показники вивчалися як потенційні тригери післяопераційних ускладнень, що дозволило нівелювати їх вплив на загальні результати лікування.

Ендоскопічні операції (VATS) здійснювали за допомогою відеосистеми Olympus VISERA II. Завдяки інтегрованому джерелу інфрачервоного світла Olympus CLV-S200-IR та телескопу із оптикою Olympus IR ED Glass Lens хірургам було забезпечено можливість якісного інтраопераційного флуоресцентного контролю із застосуванням ICG.

Перед застосуванням препарат індоціаніну зеленого «Вердай» (25 мг сухої речовини) розводили водою для ін'єкцій до отримання кінцевої концентрації 1 мг/мл. Препарат вводили внутрішньовенно через центральний венозний катетер із розрахунку 0,1 мг/кг. Через 25–30 секунд після введення препарату було досягнуто максимальної інтенсивності контрастування, достатнє для оцінки перфузії тканин та визначення меж життєздатної легеневої паренхіми, зниження якого тривало протягом до 3 хвилин після введення ICG.

Візуалізована флуоресцентна картина слугувала основою для інтраопераційної оцінки кровопостачання легеневої паренхіми та визначення демаркаційної

лінії між життєздатними й ушкодженими ділянками. Зони з дефіцитом або відсутністю накопичення ICG відносили до ділянок порушеного кровопостачання, що безпосередньо впливало на планування масштабу операції.

Після верифікації меж життєздатності тканин здійснювали атипову резекцію ушкоджених ділянок легені, орієнтуючись на візуалізований збережений кровотік, а також виконували плевректомію та декортикацію з урахуванням виявлених інтраопераційних змін.

У післяопераційному періоді проводили аналіз частоти та структури післяопераційних ускладнень і повторних оперативних утручань, що дозволяло комплексно оцінити безпосередні результати застосованих методів хірургічного лікування.

Статистичний аналіз отриманих даних проводили з використанням програмного забезпечення Statistica (TIBCO Software Inc., Palo Alto, CA, USA). Кількісні показники з нормальним розподілом наведено як середнє арифметичне та стандартне відхилення (M ± SD); міжгрупове порівняння проводили за допомогою t-критерію Стьюдента для незалежних вибірок. Показники, розподіл яких відрізнявся від нормального, подавали у вигляді медіани та міжквартильного інтервалу (Me [Q1; Q3]); для порівняння між групами застосовували U-критерій Манна — Уїтні. Відмінності вважали статистично значущими при $p < 0,05$. Час до розвитку післяопераційної пневмонії оцінювали методом Каплана — Мейєра.

Наведені матеріали є частиною науково-дослідної роботи на тему: «Вдосконалити методи діагностики та покращити результати хірургічного лікування поранень, травм, захворювань грудної порожнини» (номер державної реєстрації 0123U103132).

Результати

При аналізі передопераційних показників встановлено, що об'єм емпіеми плеври у пацієнтів, яким виконували оперативне втручання з використанням торакотомного доступу, був статистично значуще більшим порівняно з пацієнтами групи дослідження та становив 139,6 ± 10,6 мл проти 99,1 ± 11,4 мл відповідно ($p < 0,001$).

Водночас за показником периферичної сатурації кисню (SpO_2) статистично значущих відмінностей між групами не виявлено ($p = 0,088$). Середнє значення SpO_2 у групі дослідження становило 91,6 ± 2,5 %, тоді як у групі порівняння — 89,8 ± 2,7 %. Таким чином, незважаючи на дещо вищий середній рівень SpO_2 у пацієнтів групи дослідження, виявлена міжгрупова різниця не досягла рівня статистичної значущості.

Основні передопераційні клінічні показники пацієнтів обох груп наведено в табл. 1.

Аналіз перебігу післяопераційного періоду продемонстрував нижчу частоту післяопераційних ускладнень у пацієнтів групи дослідження проти групи порівняння. Найбільш виражені міжгрупові відмінності встановлено щодо частоти розвитку післяопераційної пневмонії. У групі дослідження пневмонію діагностовано у 3 із 16 (18,8 %) поранених, тоді як у групі порівняння — у 9 із 10 (90,0 %) пацієнтів ($p = 0,001$). При цьому перші ознаки пневмонії у групі дослідження виявляли в середньому на 3-тю післяопераційну добу, тоді як у групі порівняння — на 2-гу післяопераційну добу.

З метою додаткової оцінки не лише частоти, а й часу до виникнення післяопераційної пневмонії проведено аналіз за методом Каплана — Мейєра, кінцевою подією вважали розвиток пневмонії, а функція виживання відображала частку пацієнтів, які залишалися без цього ускладнення протягом періоду спостереження. Отримані криві продемонстрували суттєві відмінності між досліджуваними групами щодо динаміки виникнення пневмонії.

У групі порівняння вже наприкінці 1-ї післяопераційної доби частка пацієнтів без пневмонії зменшилася до 70,0 %, а до кінця 2-ї доби — до 10,0 %. Натомість у групі дослідження протягом 1-ї післяопераційної доби випадків пневмонії не зареєстровано; до кінця 2-ї доби без пневмонії залишалися 93,8 % пацієнтів, а до кінця 3-ї доби — 81,3 % (рис. 1). У подальшому нових випадків післяопераційної пневмонії в обох групах не спостерігали. Порівняння кривих Каплана — Мейєра за допомогою логрангового критерію підтвердило статистично значущу різницю між групами ($\chi^2 = 16,983$; $p < 0,001$).

Таким чином, у пацієнтів групи дослідження спостерігали статистично значуще довший період без розвитку післяопераційної пневмонії та нижчу ймовірність її виникнення порівняно з пацієнтами, яким виконували оперативне втручання з використанням торакотомного доступу.

Щодо інших післяопераційних ускладнень статистично значущих відмінностей між групами при прямому порівнянні не встановлено. Водночас простежу-

Таблиця 1. Передопераційна характеристика поранених досліджуваних груп

Показник	Група дослідження, n = 16	Група порівняння, n = 10	p
Об'єм емпіеми плеври, мл	99,1 ± 11,4	139,6 ± 10,6	< 0,001
SpO_2 при госпіталізації, %	91,6 ± 2,5	89,8 ± 2,7	0,088

Примітки: кількісні показники з нормальним розподілом наведено як середнє арифметичне та стандартне відхилення (M ± SD); міжгрупове порівняння проводили за допомогою t-критерію Стьюдента для незалежних вибірок; показники, розподіл яких відрізнявся від нормального, подавали у вигляді медіани та міжквартильного інтервалу (Me [Q1; Q3]); для порівняння між групами застосовували U-критерій Манна — Уїтні; відмінності вважали статистично значущими при p < 0,05.

валася тенденція до меншої частоти їх виникнення у групі дослідження. Так, післяопераційний витік повітря у пацієнтів групи дослідження не спостерігався, тоді як у групі порівняння його зареєстровано у 20,0 % поранених. Ексудативний плеврит у післяопераційному періоді діагностовано у 6,2 % пацієнтів групи дослідження та у 30,0 % пацієнтів групи порівняння. Плевральний випіт оцінювали у випадку, якщо він локалізувався контралатерально відносно сторони первинного поранення та потребував виконання плевральної пункції. Відповідно, частота плевральних пункцій становила 6,2 та 30,0 % у групі дослідження та групі порівняння.

На особливу увагу заслуговує потреба у повторних хірургічних втручаннях. У групі дослідження повторних оперативних втручань не виконували, тоді як у групі порівняння вони були необхідними у 20,0 % пацієнтів. Обсяг повторного хірургічного лікування включав реторакотомію, повторну плевректомію, декортикацію та атипову резекцію легеневої паренхіми.

Структуру та частоту післяопераційних ускладнень у досліджуваних групах наведено в табл. 2.

Таким чином, післяопераційний перебіг у пацієнтів, яким застосовували VATS із ICG-флуоресцентною оцінкою життєздатності легеневої паренхіми, характеризувався статистично значуще нижчою частотою післяопераційної пневмонії та більш тривалим періодом без її розвитку. Водночас щодо витоку повітря, ексудативного плевриту, необхідності плевральних пункцій та повторних оперативних втручань спостерігалася тенденція до меншої частоти зазначених подій у групі дослідження, хоча встановлені відмінності не досягали рівня статистичної значущості. Отже, застосування VATS з ICG-технологією як інструменту для підвищення ефективності хірургічної допомоги пацієнтам із посттравматичною емпіємою плеври забезпечує ранню візуальну оцінку стану вісцеральної плеври та дозволяє уникнути травматичних відкритих операцій.

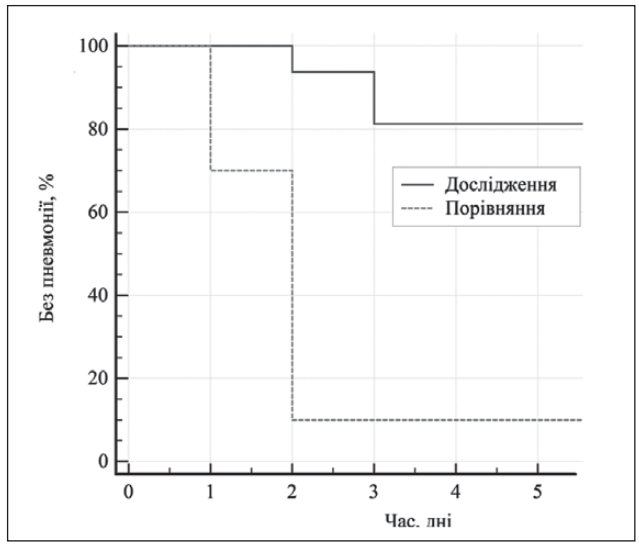


Рисунок 1. Криві Каплана — Мейєра часу до розвитку післяопераційної пневмонії у поранених групи дослідження та групи порівняння

Обговорення

Висока частота інфекційних ускладнень (як-от посттравматична емпієма плеври, абсцес легені, тяжка госпітальна пневмонія та сепсис) при бойових пораненнях грудної клітки зумовлена первинним мікробним забрудненням унаслідок потрапляння до плевральної порожнини залишків забрудненої військової форми, ґрунту, сторонніх тіл та бактерій [18]; наявністю крові в плевральній порожнині, яка є сприятливим поживним середовищем для патогенної мікрофлори [19]; масивними внутрішньоальвеолярними крововиливами, що створюють умови для розвитку тяжких деструктивних пневмоній [20, 21]; а також тривалою евакуацією, яка сприяє швидкій бактеріальній колонізації ушкодженої ділянки [22]. Важливе значення має також ефективність первинного дренування плевральної порожнини, оскільки технічні труднощі та недостатня евакуація її вмісту розглядаються як фактори ризику розвитку посттравматичної емпієми [23].

Прогресування інфекційно-запального процесу в плевральній порожнині супроводжується накопиченням фібрину, формуванням плевральних зрощень та організацією фіброзних нашарувань, що обмежують рухливість і повноцінне розправлення легені [24]. За таких умов ізольоване дренування плевральної порожнини може бути недостатньо ефективним, а хірургічне

Таблиця 2. Структура та частота післяопераційних ускладнень у досліджуваних групах

Післяопераційне ускладнення	Група дослідження, n = 16, абс. (%)	Група порівняння, n = 10, абс. (%)	Всього, n = 26, абс. (%)	p
Післяопераційна пневмонія	3 (18,8)	9 (90,0)	12 (46,2)	0,001
Пневмоторакс/тривалий витік повітря	0 (0,0)	2 (20,0)	2 (7,7)	0,138
Ексудативний плеврит	1 (6,2)	3 (30,0)	4 (15,4)	0,264
Плевральна пункція у післяопераційному періоді	1 (6,2)	3 (30,0)	4 (15,4)	0,264
Повторне оперативне втручання (реторакотомія, плевректомія, декортикація, резекція легені)	0 (0,0)	2 (20,0)	2 (7,7)	0,138

лікування має бути спрямоване на повноцінну санацію плевральної порожнини, плевректомію, декортикацію легені та, за необхідності, резекцію необоротно ушкоджених ділянок легеневої паренхіми. Окрім того, запальні зміни, фіброз і посттравматична перебудова анатомічних структур значно ускладнюють визначення меж життєздатності тканин для їх видалення при бойових пораненнях.

У проведеному дослідженні проаналізовано результати хірургічного лікування поранених із посттравматичною емпіємою плеври. Групи відрізнялися за хірургічним доступом: малоінвазивний (VATS) проти традиційного відкритого (торакотомія) та за способом верифікації стану тканин (ICG-навігація проти стандартної суб'єктивної візуально-тактильної оцінки).

Сформовані групи були порівнянними за віком, статтю та без виражених порушень нутритивного статусу, про що свідчили показники загального білка та альбуміну, що знаходились у межах референтних значень, а середні показники індексу маси тіла відповідали нормальній масі тіла. Отже, ці показники не впливали на післяопераційні результати.

Водночас між групами існувала суттєва відмінність за вихідним об'ємом емпієми плеври. У групі порівняння цей показник становив 139,6 ± 10,6 мл проти 99,1 ± 11,4 мл у групі дослідження ($p < 0,001$). Водночас статистично значущих відмінностей за показником SpO_2 при госпіталізації не встановлено: 91,6 ± 2,5 % у групі дослідження та 89,8 ± 2,7 % у групі порівняння ($p = 0,088$). Наявність статистично значущої різниці у вихідному об'ємі емпієми необхідно враховувати при інтерпретації післяопераційних результатів, оскільки вона може свідчити про неоднакову вихідну тяжкість локального патологічного процесу та виступати потенційним фактором змішування.

Найбільш виражені відмінності між групами виявлено при аналізі післяопераційного перебігу. Частота післяопераційної пневмонії у групі дослідження становила 18,8 %, тоді як у групі порівняння — 90,0 % ($p = 0,001$).

Як повідомляли A.F. García et al. (2022), частка посттравматичної емпієми у пацієнтів з травмою грудної клітки становить від 1,6 до 25 % [5]. Частота виникнення пневмонії у тяжкопоранених пацієнтів сягає від 6 до понад 50 % [25, 26]. Така розбіжність може бути зумовлена низкою факторів, зокрема розміром досліджуваних вибірок, демографічними та клінічними відмінностями в межах популяцій травмованих, умовами отримання травми (цивільні/бойові), джерелом інфекції та іншими.

Таким чином, частота цього ускладнення була статистично значуще нижчою у пацієнтів, яким застосовували VATS із ICG-флуоресцентною візуалізацією.

Результати аналізу часу до розвитку пневмонії за методом Каплана — Мейєра підтвердили виявлені відмінності. У групі порівняння частка пацієнтів, які залишалися без пневмонії, вже наприкінці першої післяопераційної доби зменшилася до 70,0 %, а до кінця другої доби — до 10,0 %. У групі дослідження протягом першої післяопераційної доби випадків пневмонії не зареєстровано; до кінця другої доби без пневмонії залишалися 93,8 % пацієнтів, а до кінця третьої — 81,3 %. Порівняння кривих Каплана — Мейєра за логранговим критерієм підтвердило статистично значущі відмінності між групами ($\chi^2 = 16,983$; $p < 0,001$). Отже, застосована у групі дослідження хірургічна тактика асоціювалася не лише з меншою загальною частотою післяопераційної пневмонії, а й із більш тривалим періодом без розвитку цього ускладнення.

Щодо інших післяопераційних ускладнень статистично значущих відмінностей не встановлено, що значною мірою може бути зумовлено невеликою чисельністю досліджуваних груп. Водночас за всіма проаналізованими показниками простежувалася односпрямована тенденція до меншої частоти несприятливих подій у групі дослідження. Післяопераційний витік повітря в цій групі не спостерігався, тоді як у групі порівняння його зареєстровано у 20,0 % пацієнтів ($p = 0,138$). Ексудативний плеврит виник відповідно у 6,2 та 30,0 % поранених ($p = 0,264$). Аналогічною була частота необхідності виконання плевральних пункцій — 6,2 проти 30,0 % ($p = 0,264$).

На особливу увагу заслуговує потреба у повторному хірургічному лікуванні. У групі дослідження повторних оперативних втручань не виконували, тоді як у групі порівняння у 20,0 % пацієнтів виникла необхідність у реторакотомії з повторною плевректомією, декортикацією та резекцією легені ($p = 0,138$). Хоча ця різниця не досягла статистичної значущості, відсутність повторних втручань у групі VATS+ICG може мати клінічне значення та потребує подальшого вивчення на більшій вибірці пацієнтів.

Водночас результати дослідження необхідно інтерпретувати з урахуванням його обмежень. Насамперед дослідження включало відносно невелику кількість пацієнтів — 26 поранених, що знижує статистичну потужність аналізу рідкісних післяопераційних ускладнень. Додатковим обмеженням є статистично значуща різниця у вихідному об'ємі емпієми плеври: у групі порівняння він був більшим, ніж у групі дослідження. Це потенційно могло впливати на складність оперативного втручання та післяопераційний перебіг. Тому встановлені відмінності не дозволяють стверджувати про прямий причинно-наслідковий зв'язок між застосуванням ICG та зниженням частоти ускладнень. Коректніше розглядати отримані результати як свідчення того, що хірургічна тактика, яка поєднує VATS із ICG-флуоресцентною оцінкою перфузії легеневої паренхіми, асоціюється зі сприятливішими безпосередніми результатами лікування порівняно з традиційним торакотомічним підходом у дослідженій когорті поранених.

Таким чином, встановлені нижчі показники частоти післяопераційної пневмонії та пізніший час до її розвитку, а також тенденція до зменшення частоти інших післяопераційних ускладнень і повторних оперативних втручань свідчать про перспективність застосування VATS-доступу в комбінації з ICG-технологією та про потребу у подальших дослідженнях на більшій вибірці

із максимально порівнянними вихідними характеристиками груп, які необхідні для окремої оцінки внеску ICG-флуоресцентної навігації та VATS-доступу з метою поліпшення результатів хірургічного лікування цієї складної категорії поранених.

Висновки та перспективи подальших розробок

1. Хірургічна тактика із застосуванням VATS та ICG-флуоресцентної візуалізації асоціювалася зі статистично значуще нижчою частотою післяопераційної пневмонії — 18,8 проти 90,0 % у групі торакотомії ($p = 0,001$). Аналіз Каплана — Мейєра також продемонстрував статистично значущу різницю між групами за часом до розвитку післяопераційної пневмонії (log-rank $\chi^2 = 16,983$; $p < 0,001$).

2. У групі VATS+ICG спостерігалася тенденція до зниження частоти інших післяопераційних ускладнень: витік повітря не зареєстровано (проти 20,0 % у групі порівняння), ексудативний плеврит та необхідність плевральних пункцій виникали у 6,2 % (проти 30,0 % у групі порівняння). Повторних оперативних втручань у групі дослідження не було, тоді як після торакотомії вони були необхідними у 20,0 % поранених. Водночас зазначені відмінності не досягли статистичної значущості.

Отримані результати свідчать про перспективність поєднання мініінвазивного VATS-доступу з ICG-флуоресцентною оцінкою перфузії легеневої паренхіми при хірургічному лікуванні посттравматичної емпієми плеври у поранених із бойовою травмою грудної клітки. Водночас з огляду на невелику вибірку, відмінності у вихідному об'ємі емпієми та одночасну відмінність груп за оперативним доступом отримані результати потребують підтвердження у подальших дослідженнях із більшою кількістю спостережень.

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

Список літератури

1. Foley SPF, Parrish JS. Pleural Space Infections. Life (Basel). 2023 Feb;13(2):376. doi: 10.3390/life13020376.

2. Garvia V, Paul M. Empyema. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2026 Jan. 2023 Aug 7. PMID: 29083780. Bookshelf ID: NBK459237.

3. Kanellakis NI, Wrightson JM, Gerry S, Ilott N, Corcoran JP, Bedawi EO, et al. The bacteriology of pleural infection (TORPIDS): an exploratory metagenomics analysis through next generation sequencing. Lancet Microbe. 2022;3(4):e294-e302. doi: 10.1016/S2666-5247(21)00327-X.

4. Liou AA, Anderson B, Whitehurst C, Roman S, Beltran C, Acton T, et al. The role of the RAPID score in surgical planning for empyema. J Thorac Dis. 2023 Mar 31;15(3):985-993. doi: 10.21037/jtd-22-747.

5. García AF, Rodríguez F, Sánchez Á, Caicedo-Holguín I, Gallego-Navarro C, Naranjo M-P, et al. Risk factors for posttraumatic empyema in diaphragmatic injuries. World J Emerg Surg. 2022;17:47. https://doi.org/10.1186/s13017-022-00453-9.

6. Salahuddin M, Ost D, Hwang H, Jimenez C, Saltijeral S, Eapen G, et al. Clinical Risk Factors for Death in Patients With Empyema and Active Malignancy. Cureus. 2023 Apr 13;15(4):e37545. doi: 10.7759/cureus.37545.

7. Iguina MM, Sharma S, Danckers M. Thoracic Empyema. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing. 2024. PMID: 31334999. Bookshelf ID: NBK544279.

8. Deniz S, Aksel N, Özdemir Ö, Sahin GVG, Çelik EÇ, Güçsav MO, et al. Surgical and Non-surgical Treatments in Pleural Empyema. Bezmialem Science. 2025 Jan;1:51-57. doi: 10.14235/bas.galenos.2024.04706.

9. Endoh M, Shiono S. Strategy for surgical treatment of acute thoracic empyema in adults. Curr Chall Thorac Surg. 2021;3:4. doi: 10.21037/ccts.2020.04.02.

10. Mastromarino MG, Lenzini A, Rabazzi G, Castaldi A, Aprile V, Korasidis S, et al. Surgical interventions for pleural infection. Breathe (Sheff). 2025 Oct 14;21(4):250105. doi: 10.1183/20734735.0105-2025.

11. Shcheholkov YeE, Salmanov AG. Features of postoperative infections in combat injuries and wounds. Ukr Med Chasopys [Internet]. 2025;8(174):67-74. doi: 10.32471/umj.1680-3051.271640.

12. Strachinaru DIC, Ragot C, Stoefs A, Donat N, François P-M, Vanbrabant P, et al. Management and Prevention of Multidrug-Resistant Bacteria in War Casualties. Trop Med Infect Dis. 2025;10(5):128. https://doi.org/10.3390/tropicalmed10050128.

13. Shcheholkov YeE, Salmanov AG, Humeniuk KV. Surgical site infection in patients with combat injuries and wounds. Ukr Med Chasopys [Internet]. 2026;2(176):104-108. doi: 10.32471/umj.1680-3051.273227.

14. Yang W, Zhang B, Zhan Z-M. Infectious pleural effusion status and treatment progress. Journal of Thoracic Disease. 2017 Nov;9(11):4690-4699. doi: 10.21037/jtd.2017.10.96.

15. Zhou L, Yao M, Li J, Li W, Luo F, Wang K. Local management of pleural infection: a narrative review. European Journal of Medical Research. 2026 Jan 3;31(1):Aticle 181. doi: 10.1186/s40001-025-03786-8.

16. Lin HL, Huang WY, Yang C. How early should VATS be performed for retained haemothorax in blunt chest trauma? Injury. 2014;45:1359-1364. doi: 10.1016/j.injury.2014.05.036.

17. Patel AJ, Domjan M, Yamamoto H. The role of video-assisted thoracoscopic surgery in blunt and penetrating chest trauma: timing of intervention and clinical outcomes — a review of the current evidence. VATS. 2025 Dec;10:1-10. doi: 10.21037/vats-25-32.

18. Hrytsai M, Poliachenko Y, Tsokalo V, Kolov H, Yevlantieva T. Features of the Occurrence and Development of Infectious Complications in Patients with Combat Injuries of the Musculoskeletal System (according to the Own Experience). Terra orthopaedica. 2023 Apr;4(115):53-68. https://doi.org/10.37647/0132-2486-2022-115-4-53-68.

19. Yakovenko OK, Khodosh EM. Combat chest trauma and its consequences. Health of Ukraine. Surgery. Orthopedics. Traumatology. Intensive care. 2023;3(55):18-21. URL: https://health-ua.com/multimedia/7/4/0/0/3/1694452664.pdf.

20. Ganie FA, Lone H, Lone GN, Wani ML, Singh S, Dar AM, et al. Lung Contusion: A Clinico-Pathological Entity with Unpredictable Clinical Course. Bull Emerg Trauma. 2013;1:7-16. PMID: 27162815.

21. Boyko VV, Khashchyna VA, Minukhin DV, Serenko AA, Tkachenko VV, Krytsak VV, et al. Intrapulmonary hemorrhages in closed combat trauma of the chest. Kharkiv Surgical School. 2024;1:68-72. https://doi.org/10.37699/2308-7005.1.2024.13.

22. Darvishi M, Hejripoor SZ, Hosseini-Shokouh S, Soltani R, Shariatirad A, Majid Nouri. Prevention of Combat-Related Infections: A Review of the Literature. Ann Mil Health Sci Res. 2023;21(3):e141348. doi: https://doi.org/10.5812/amh-141348.

23. Burton PR, Lee M, Bailey M, Pick AW. What causes post-traumatic empyema? Emerg Med Australas. 2009;21(2):153-159. doi: 10.1111/j.1742-6723.2009.01165.x.

24. Abdulelah M, Hishmeh MA. Infective Pleural Effusions — A Comprehensive Narrative Review Article. Clin Pract. 2024 May 16;14(3):870-881. doi: 10.3390/clinpract14030068.

25. Salmanov AH, Lurin IA, Shcheholkov YeE, Humeniuk KV. Comparative characteristics of healthcare-associated infections in patients with combat-related injuries and wounds. Ukr Med Chasopys [Internet]. 2026 Aug 12;5(179 Vol 1). doi: 10.32471/umj.1680-3051.279583.

26. Wutzler S, Bläsius FM, Störmann P, Lustenberger T, Frink M, Maegele M, et al. Pneumonia in severely injured patients with thoracic trauma: results of a retrospective observational multi-centre study. Scand J Trauma Resusc Emerg Med. 2019 Mar 14;27:31. doi: 10.1186/s13049-019-0608-4.

Отримано/Received 18.07.2026
Рецензовано/Revised 02.09.2026
Прийнято до друку/Accepted 08.09.2026

Information about authors

Oleksandr Usenko, MD, DSc, PhD, Professor, Academician of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Vice-President of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine, General Director. Head of the Department of Thoraco-Abdominal Surgery, Shalimov National Scientific Center of Surgery and Transplantation of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: ausenko1962@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-8074-1666

Andrii Klimas, PhD in Medicine, Senior Researcher, Department of Thoraco-Abdominal Surgery, Shalimov National Scientific Center of Surgery and Transplantation of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine; e-mail: klimas.andrew@gmail.com; https://orcid.org/0000-0001-5677-0424

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.Yu. Usenko, A.S. Klimas
Shalimov National Scientific Center of Surgery and Transplantation of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Fluorescence-navigated video-assisted thoracoscopic surgery in the treatment of post-traumatic pleural empyema in combat injuries of the chest. Postoperative assessment

Abstract. ***Background.*** The choice of optimal approach to treating pleural empyema currently remains debatable, and treatment tactics vary from medical to surgical methods, depending on the severity of the disease. The study is aimed at improving the surgical treatment of post-traumatic pleural empyema resulting from combat injuries of the chest by implementing video-assisted thoracoscopic surgery (VATS) techniques with intraoperative ICG-fluorescent visualization of viability and objective determination of extent of lung parenchyma resection. ***Materials and methods.*** The outcomes of surgical treatment were analyzed in 26 wounded with post-traumatic pleural empyema who were inpatients at the Shalimov National Scientific Center of Surgery and Transplantation of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine in 2022–2025. All wounded were divided into two groups by time randomization method depending on the applied surgical tactics, surgical approach and method of intraoperative determination of lung parenchyma viability. The study group included 16 patients who underwent VATS with pleurectomy, decortication and, according to indications, atypical resection of damaged lung parenchyma using ICG-fluorescent assessment of its perfusion and viability. The comparison group included 10 patients who underwent similar interventions using thoracotomy, and tissue viability and the extent of resection were determined based on standard visual-tactile examination. The frequency of postoperative complications and repeated surgical interventions was analyzed. Kaplan-Meier analysis was used to assess the dynamics of postoperative pneumonia occurrence and to compare the probability of remaining free of this complication between the study groups. ***Results.*** The incidence of postoperative pneumonia was 18.8 % in the study group and 90.0 % in the comparison group ($p = 0.001$). Kaplan-Meier analysis confirmed statistically significant intergroup differences in time to development of postoperative pneumonia (log-rank $\chi^2 = 16.983$; $p < 0.001$). There were no cases of postoperative air leak and repeated surgical interventions in the study group, while in the comparison group, their frequency was 20.0 % each. Exudative pleurisy requiring pleural puncture was observed in 6.2 and 30.0 % of patients, respectively, but the differences in these indicators did not reach statistical significance. ***Conclusions.*** The better postoperative indicators in the study group indicate the benefit and prospects of using VATS in combination with intraoperative ICG-fluorescence imaging as surgical treatment for post-traumatic pleural empyema due to combat injuries of the chest.

Keywords: combat chest trauma; post-traumatic pleural empyema; video-assisted thoracoscopic surgery; indocyanine green; ICG fluorescence; fluorescence navigation; lung decortication; postoperative pneumonia

УДК 617.58-089.843-06:616.833-009.7 *DOI: https://doi.org/10.22141/1608-1706.5.27.2026.1120*

Климовицький Ф.В.[1], Верба А.В.[2], Безсмертний Ю.О.[2], Шевчук В.І.[2], Браніцький О.Ю.[2], Безсмертна Г.В.[2]
[1]Донецький національний медичний університет МОЗ України, м. Лиман, Україна
[2]Університетська клініка Вінницького національного медичного університету ім. М.І. Пирогова, м. Вінниця, Україна

Тунельні нейропатії ампутаційних кукс нижніх кінцівок: зв'язок з використанням протеза, швидкістю ходьби та якістю життя

Резюме. ***Актуальність.*** *Тунельні нейропатії ампутаційної кукси можуть спричиняти біль і функціональні обмеження та негативно впливати на протезну реабілітацію.* ***Мета:*** *оцінити клініко-функціональні та психосоціальні характеристики пацієнтів з тунельними нейропатіями ампутаційних кукс нижніх кінцівок порівняно з пацієнтами з постампутаційним болем без тунельної нейропатії та з безбольовим перебігом.* ***Матеріали та методи.*** *Проведено проспективне порівняльне дослідження 102 чоловіків віком 20–50 років з однобічною травматичною ампутацією нижньої кінцівки понад 12 місяців тому. Основну групу становили 52 пацієнти з тунельними нейропатіями ампутаційної кукси, контрольну групу А — 23 пацієнти з постампутаційним невромним та/або фантомним болем без тунельної нейропатії, контрольну групу Б — 27 пацієнтів із безбольовим перебігом. Оцінювали біль за 10-бальною візуально-аналоговою шкалою, тривалість щоденного використання протеза, швидкість ходьби за 10-метровим тестом, симптоми тривоги та депресії — за Hospital Anxiety and Depression Scale (HADS), якість життя — за опитувальником SF-36. Статистичний аналіз виконували в IBM SPSS Statistics 26.0; p < 0,05 вважали статистично значущим.* ***Результати.*** *Тривалість щоденного використання протеза становила 3,3 ± 0,6 год/добу в основній групі, 5,9 ± 0,8 год/добу у групі А та 11,4 ± 0,8 год/добу у групі Б (p < 0,001). Швидкість ходьби становила відповідно 0,49 ± 0,14; 0,73 ± 0,15 та 1,21 ± 0,13 м/с (p < 0,001). Біль у спокої становив 5,2 ± 2,1; 3,9 ± 1,8 та 0,6 ± 0,5 бала, а при протезному навантаженні — 7,3 ± 1,5; 5,7 ± 1,6 та 1,4 ± 0,8 бала відповідно. Показники HADS-A становили 14,2 ± 0,8; 9,8 ± 0,6 та 4,1 ± 0,4 бала, HADS-D — 13,5 ± 0,7; 8,4 ± 0,9 та 3,8 ± 0,5 бала відповідно. Показники фізичного компонента здоров'я SF-36 (PCS) становили 24,8 ± 1,9; 41,3 ± 2,4 та 74,2 ± 3,1 бала, психічного компонента (MCS) — 28,3 ± 2,1; 46,8 ± 2,0 та 71,2 ± 2,9 бала відповідно; для міжгрупових відмінностей за наведеними показниками p < 0,001.* ***Висновки.*** *У пацієнтів з тунельними нейропатіями ампутаційних кукс виявлено більшу інтенсивність болю, меншу тривалість щоденного використання протеза та нижчу швидкість ходьби, ніж у групах порівняння. Вони також мали більш виражені симптоми тривоги та депресії й нижчі показники фізичного та психічного компонентів якості життя.*
Ключові слова: *ампутація нижньої кінцівки; ампутаційна кукса; тунельна нейропатія; протезування; біль; швидкість ходьби; якість життя; HADS; SF-36*

Вступ

Ампутація нижньої кінцівки супроводжується комплексом функціональних і психосоціальних змін, які можуть істотно впливати на мобільність, використання протеза, задоволеність протезуванням та адаптацію до змін образу тіла [1–3, 5, 6]. Організація фізичної активності та ефективна реабілітація мають важливе значення для відновлення функціонування і якості життя осіб із втратою кінцівки [3]. Водночас результати реабілітації значною мірою залежать від фізичних і соціальних чинників, а також від можливості повноцінного використання протеза [4, 5].

© «Травма» / «Trauma» («Travma»), 2026
© Видавець Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2026

Для кореспонденції: Безсмертний Юрій Олексійович, доктор медичних наук, професор, завідувач відділення реконструктивної ортопедії та травматології, Університетська клініка Вінницького національного медичного університету ім. М.І. Пирогова, Хмельницьке шосе, 104, м. Вінниця, 21100, Україна; e-mail: bezsmertnyiyurii@gmail.com; тел.: +380 (97) 281-51-60
For correspondence: Yurii Bezsmertnyi, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Reconstructive Orthopedics and Traumatology, University Clinic of Vinnytsia National Medical University, Khmelnytskyi Highway, 104, Vinnytsia, 21100, Ukraine; e-mail: bezsmertnyiyurii@gmail.com; tel.: +380 (97) 281-51-60
Full list of authors information is available at the end of the article.

Постампутаційний біль охоплює декілька клінічно відмінних фенотипів, серед яких — залишковий біль у куксі, невромний та фантомний біль [7–9]. Диференціація цих станів має практичне значення, оскільки їхні механізми, клінічні прояви та вплив на використання протеза можуть відрізнятися [8, 9]. Біль, пов'язаний з патологією периферичних нервів кукси, може посилюватися під час контакту та навантаження на протез, що потенційно обмежує тривалість його щоденного використання [9, 10].

Окремою клінічною проблемою є тунельні нейропатії ампутаційної кукси, за яких компресія нервового стовбура може супроводжуватися локальною болючістю, парестезіями та посиленням симптомів при механічному подразненні. Виявлення патології периферичних нервів потребує комплексної клінічної та нейрофізіологічної оцінки; додаткову інформацію щодо структурних змін нерва може надавати ультразвукове дослідження [16].

Функціональна мобільність після ампутації є важливою складовою успішної протезної реабілітації. Рівень ампутації та стан кукси можуть впливати на функціональні результати, а об'єктивна оцінка швидкості ходьби дозволяє кількісно характеризувати мобільність пацієнта [11, 17]. Больовий синдром та труднощі використання протеза можуть бути пов'язані зі зниженням повсякденної активності та якості життя [1, 6, 14, 18].

Поряд з фізичними обмеженнями важливе значення мають психоемоційні наслідки втрати кінцівки та хронічного болю. У пацієнтів після ампутації можуть спостерігатися симптоми тривоги й депресії, які оцінюються за допомогою стандартизованих скринінгових інструментів [12, 13, 19]. Якість життя після ампутації визначається взаємодією фізичного стану, больового синдрому, психологічної адаптації та інших чинників [5, 14, 15].

Незважаючи на значну кількість досліджень постампутаційного болю та якості життя, клініко-функціональний профіль пацієнтів з саме тунельними нейропатіями ампутаційних кукс залишається недостатньо охарактеризованим. Особливого значення набуває порівняння таких пацієнтів не лише з безбольовими особами після ампутації, а й з пацієнтами, які мають інші форми постампутаційного болю.

Мета: оцінити клініко-функціональні та психосоціальні характеристики пацієнтів з тунельними нейропатіями ампутаційних кукс нижніх кінцівок та їхній взаємозв'язок з тривалістю щоденного використання протеза, швидкістю ходьби та якістю життя.

Матеріали та методи

Проведено проспективне спостережне порівняльне дослідження на базі Університетської клініки Вінницького національного медичного університету ім. М.І. Пирогова у 2024–2026 рр. До дослідження включено 102 чоловіки віком 20–50 років з однобічними травматичними ампутаціями нижніх кінцівок на рівні стегна або гомілки, від моменту яких минуло понад 12 місяців, зі сформованими ампутаційними куксами, придатними для протезування. Основну групу становили 52 пацієнти з верифікованими тунельними нейропатіями ампутаційної кукси. До контрольної групи А увійшли 23 пацієнти з постампутаційним невромним та/або фантомним болем без ознак тунельної нейропатії. Контрольну групу Б становили 27 пацієнтів із безбольовим перебігом після ампутації.

Діагноз тунельної нейропатії встановлювали на підставі сукупності клінічних, електронейроміографічних та ультразвукових даних (УЗД). Оцінювали локальну болючість у проєкції ураженого нерва, парестезії, дизестезії, симптоми механічного подразнення та посилення болю під час навантаження ампутаційної кукси протезом. УЗД використовували для оцінки структурних змін периферичного нерва та ознак його компресії. У структурі тунельних нейропатій у 19 пацієнтів виявлено ураження стегнового нерва, у 16 — загального малогомілкового нерва, у 12 — великогомілкового нерва та у 5 — латерального шкірного нерва стегна.

Інтенсивність болю оцінювали за візуально-аналоговою шкалою (ВАШ) від 0 до 10 балів окремо у спокої та під час навантаження ампутаційної кукси протезом.

Тривалість щоденного використання протеза оцінювали за 14-денним щоденником пацієнта з додатковим контролем під час реабілітаційних занять. Результат визначали як середню кількість годин використання протеза на добу.

Функціональну мобільність та швидкість ходьби оцінювали за допомогою 10-метрового тесту ходьби (10-Meter Walk Test, 10MWT). Тест виконували у звичайному для пацієнта темпі з використанням власного протеза. Час проходження центральної 10-метрової ділянки реєстрували за допомогою лазерного електронного хронометра відеоматричної системи локомоторного аналізу Gait-Track 4X (Німеччина) з фотоелектричними датчиками фіксації моментів початку та завершення тестової ділянки [11]. Швидкість ходьби розраховували у метрах за секунду.

Для скринінгової оцінки симптомів тривоги та депресії використовували госпітальну шкалу тривоги та депресії (Hospital Anxiety and Depression Scale, HADS) [12]. Оцінювали два показники: HADS-A — тривога, HADS-D — депресивні симптоми. Відповідно до прийнятої інтерпретації, 0–7 балів розцінювали як відсутність клінічно значущих симптомів, 8–10 балів — як субклінічні прояви, ≥ 11 балів — як клінічно значущі симптоми. Отримані результати використовували для скринінгу симптомів.

Якість життя оцінювали за стандартизованим опитувальником SF-36. Аналізували вісім його основних шкал та сумарні фізичний (Physical Component Summary, PCS) і психічний (Mental Component Summary, MCS) компоненти здоров'я [13, 14]. Вищі значення показників відповідали кращому стану здоров'я та якості життя.

Статистичний аналіз проводили за допомогою IBM SPSS Statistics 26.0. Розподіл кількісних показників оцінювали за критерієм Шапіро — Вілка. Для порівняння трьох груп за показниками з нормальним розподілом

використовували однофакторний дисперсійний аналіз (ANOVA) з post hoc-аналізом Tukey; за ненормального розподілу — критерій Краскела — Уолліса. Для попарного порівняння незалежних вибірок застосовували t-критерій Стьюдента або U-критерій Манна — Уїтні залежно від характеру розподілу. Кількісні показники наведено як M ± SD. Рівень статистичної значущості приймали при $p < 0,05$.

Дослідження проведено відповідно до етичних принципів біомедичних досліджень. Протокол дослідження схвалено Комісією з питань біоетики Університетської клініки Вінницького національного медичного університету ім. М.І. Пирогова, протокол № 4 від 12.02.2024 р. Усі пацієнти надали письмову інформовану згоду на участь у дослідженні та обробку персональних даних.

Результати

Порівняльний аналіз показав статистично значущі відмінності за всіма досліджуваними клініко-функціональними та психосоціальними показниками (табл. 1, 2). У пацієнтів з тунельними нейропатіями ампутаційної кукси вони характеризувалися поєднанням більш вираженого больового синдрому, меншої тривалості використання протеза, зниження швидкості ходьби, більшої вираженості тривожних і депресивних симптомів та нижчих показників якості життя.

Тривалість щоденного використання протеза в основній групі становила 3,3 ± 0,6 год/добу. У пацієнтів контрольної групи А цей показник був вірогідно вищим — 5,9 ± 0,8 год/добу ($p < 0,001$), що відповідало різниці 2,6 год/добу, або 44,1 %. Найбільша тривалість використання протеза відзначалася у безбольовій контрольній групі Б — 11,4 ± 0,8 год/добу ($p < 0,001$ порівняно з основною групою), тобто на 8,1 год/добу більше. Отже, у пацієнтів з тунельними нейропатіями час щоденного використання протеза був суттєво обмежений не лише порівняно з безбольовими пацієнтами, а й з особами, які мали постампутаційний біль іншого генезу.

Функціональні можливості пацієнтів також істотно різнилися між групами. Середня швидкість ходьби за результатами 10MWT в основній групі становила 0,49 ± 0,14 м/с проти 0,73 ± 0,15 м/с у контрольній групі А ($p < 0,001$) та 1,21 ± 0,13 м/с у контрольній групі Б ($p < 0,001$). Таким чином, порівняно з групою А швидкість ходьби в основній групі була нижчою на 0,24 м/с (32,9 %), а порівняно з безбольовою групою Б — на 0,72 м/с (59,5 %). Отримані дані свідчать про суттєве обмеження функціональної мобільності пацієнтів із тунельними нейропатіями.

Найбільш виражені відмінності за больовим синдромом виявлено при оцінці болю під час навантаження кукси протезом (табл. 2). У спокої інтенсивність болю за ВАШ в основній групі становила 5,2 ± 2,1 бала, що було на 1,3 бала (33,3 %) більше, ніж у контрольній групі А — 3,9 ± 1,8 бала ($p < 0,05$). У безбольовій групі Б оцінка за ВАШ становила 0,6 ± 0,5 бала; різниця з основною групою становила 4,6 бала ($p < 0,001$).

Під час навантаження кукси в протезі інтенсивність болю в основній групі зростала до 7,3 ± 1,5 бала. У контрольній групі А вона становила 5,7 ± 1,6 бала, що на 1,6 бала (28,1 %) менше, ніж в основній групі ($p < 0,01$). У групі Б больовий синдром при навантаженні був мінімальним — 1,4 ± 0,8 бала ($p < 0,001$ по-

Таблиця 1. Клініко-функціональні та психосоціальні показники пацієнтів досліджуваних груп

Показник	Основна група, n = 52	Контрольна група А, n = 23	Контрольна група Б, n = 27	p
Тривалість щоденного використання протеза, год/добу	3,3 ± 0,6	5,9 ± 0,8	11,4 ± 0,8	< 0,001
Швидкість ходьби за 10MWT, м/с	0,49 ± 0,14	0,73 ± 0,15	1,21 ± 0,13	< 0,001
HADS-A, бали	14,2 ± 0,8	9,8 ± 0,6	4,1 ± 0,4	< 0,001
HADS-D, бали	13,5 ± 0,7	8,4 ± 0,9	3,8 ± 0,5	< 0,001
SF-36 PCS, бали	24,8 ± 1,9	41,3 ± 2,4	74,2 ± 3,1	< 0,001
SF-36 MCS, бали	28,3 ± 2,1	46,8 ± 2,0	71,2 ± 2,9	< 0,001

Примітки: HADS-A — підшкала тривоги; HADS-D — підшкала депресивних симптомів; PCS — фізичний компонент здоров'я; MCS — психічний компонент здоров'я; 10MWT — 10-метровий тест ходьби.

Таблиця 2. Інтенсивність больового синдрому за ВАШ у пацієнтів досліджуваних груп

Показник	Основна група, n = 52	Контрольна група А, n = 23	Контрольна група Б, n = 27	p (основна — А)	p (основна — Б)
ВАШ у спокої, бали	5,2 ± 2,1	3,9 ± 1,8	0,6 ± 0,5*	< 0,05	< 0,001
ВАШ при навантаженні кукси протезом, бали	7,3 ± 1,5	5,7 ± 1,6	1,4 ± 0,8	< 0,01	< 0,001

Примітка: ВАШ — візуально-аналогова шкала болю; p — рівень статистичної значущості при парному порівнянні основної групи з контрольною групою А та контрольною групою Б відповідно.

рівняно з основною групою). У межах кожної групи навантаження кукси супроводжувалося збільшенням інтенсивності болю: на 2,1 бала в основній групі, на 1,8 бала — у групі А та на 0,8 бала — у групі Б. Найвищі абсолютні значення за ВАШ як у спокої, так і під час навантаження зафіксовано у пацієнтів з тунельними нейропатіями.

Поряд з больовим синдромом у пацієнтів основної групи виявлено суттєві відмінності психоемоційного профілю. Середній показник HADS-A становив 14,2 ± ± 0,8 бала, тоді як у контрольній групі А — 9,8 ± 0,6 бала, а в групі Б — 4,1 ± 0,4 бала ($p < 0,001$ в обох порівняннях). Отже, порівняно з групою А рівень тривожних симптомів був вищим на 4,4 бала (44,9 %), а порівняно з групою Б — на 10,1 бала. Аналогічна закономірність встановлена для депресивних симптомів: показник за HADS-D становив 13,5 ± 0,7 бала в основній групі, 8,4 ± 0,9 бала у групі А та 3,8 ± 0,5 бала у групі Б ($p < 0,001$). Таким чином, різниця з групою А становила 5,1 бала (60,7 %), а з групою Б — 9,7 бала.

Оцінка якості життя за SF-36 підтвердила суттєве функціональне та психосоціальне обмеження пацієнтів основної групи. Показник фізичного компонента здоров'я (PCS) становив 24,8 ± 1,9 бала проти 41,3 ± 2,4 бала у групі А та 74,2 ± 3,1 бала у групі Б ($p < 0,001$). Відповідно, значення PCS в основній групі були нижчими на 16,5 бала (40,0 %) порівняно з групою А та на 49,4 бала порівняно з групою Б.

Подібну, але дещо менше виражену закономірність спостерігали щодо психічного компонента здоров'я (MCS). Його значення в основній групі становило 28,3 ± 2,1 бала, у групі А — 46,8 ± 2,0 бала, а у групі Б — 71,2 ± 2,9 бала ($p < 0,001$). Отже, порівняно з групою А показник MCS був нижчим на 18,5 бала (39,5 %), а порівняно з безбольовою групою Б — на 42,9 бала.

Таким чином, у пацієнтів з тунельними нейропатіями ампутаційної кукси виявлено комплекс взаємопов'язаних клініко-функціональних та психосоціальних порушень. Порівняно з пацієнтами з постампутаційним болем без тунельної нейропатії вони мали вищу інтенсивність болю, меншу тривалість використання протеза та нижчу швидкість ходьби, а також вищі показники тривожних і депресивних симптомів та нижчі показники фізичного і психічного компонентів якості життя. Порівняно з безбольовими пацієнтами відмінності за цими параметрами були ще більше вираженими.

Обговорення

Отримані результати свідчать, що наявність тунельної нейропатії ампутаційної кукси супроводжується комплексом клініко-функціональних та психосоціальних порушень. Пацієнти основної групи мали вищу інтенсивність болю як у спокої, так і під час навантаження протезом, меншу тривалість його щоденного використання та нижчу швидкість ходьби порівняно з пацієнтами обох контрольних груп. Це узгоджується з даними літератури про значний вплив постампутаційного болю на функціонування, протезування та якість життя [5, 7, 19].

Особливо показовим є порівняння основної групи з контрольною групою А, до якої включали пацієнтів з постампутаційним болем, але без тунельної нейропатії. За наявності нейропатії середня інтенсивність болю у спокої становила 5,2 ± 2,1 бала проти 3,9 ± 1,8 бала у контрольній групі А, а під час навантаження — 7,3 ± 1,5 проти 5,7 ± 1,6 бала. Таким чином, відмінності між цими групами не можуть бути пояснені лише самим фактом наявності постампутаційного болю та вказують на додатковий клінічний тягар, пов'язаний з патологією периферичного нерва.

Найбільш виражені відмінності спостерігалися під час навантаження ампутаційної кукси. Це має клінічне значення, оскільки механічна взаємодія кукси з гільзою протеза є регулярною та повторюваною. За наявності компресійної або механічно подразненої нейропатії таке навантаження може посилювати больові та парестетичні прояви, що, у свою чергу, може обмежувати тривалість використання протеза. Диференціація залишкового, невромного та фантомного болю має важливе значення для правильної клінічної оцінки пацієнта [6, 20].

Обмеження використання протеза в основній групі супроводжувалося зниженням швидкості ходьби. Середня тривалість щоденного використання протеза становила 3,3 ± 0,6 год, тоді як у контрольній групі А — 5,9 ± 0,8 год, а в контрольній групі Б — 11,4 ± ± 0,8 год. Середня швидкість ходьби за 10MWT становила відповідно 0,49 ± 0,14; 0,73 ± 0,15 та 1,21 ± ± 0,13 м/с. Отримані результати узгоджуються з дослідженнями, у яких функціональна мобільність та просторово-часові характеристики ходьби розглядаються як важливі показники адаптації до протеза [9, 10, 21].

Зниження швидкості ходьби в нашому дослідженні не слід трактувати як безпосередньо доведену біомеханічну зміну ходи, оскільки спеціального тривимірного або інструментального біомеханічного аналізу не проводили. Водночас біль, дискомфорт під час навантаження та обмеження часу використання протеза можуть впливати на характер пересування і функціональну мобільність. Дослідження біомеханіки ходьби після ампутації також демонструють, що зміни навантаження та параметрів локомоції можуть бути пов'язані з функціональними обмеженнями [21, 22].

Важливим результатом є відмінності психоемоційних показників між групами. У пацієнтів з тунельними нейропатіями середні значення за HADS-A та HADS-D були вищими, ніж у пацієнтів з постампутаційним болем без тунельної нейропатії та особливо порівняно з пацієнтами без болю. Водночас ці результати слід трактувати саме як підвищення рівня тривожних і депресивних симптомів, а не як встановлення клінічного діагнозу тривожного або депресивного розладу. Психологічні наслідки ампутації та їхній зв'язок з болем, функціональними обмеженнями і якістю життя описані в попередніх дослідженнях [12, 13, 23].

Зниження показників PCS та MCS у пацієнтів основної групи додатково свідчить про більший функ-

ціональний і психоемоційний тягар, пов'язаний з тунельною нейропатією. Середнє значення PCS становило 24,8 ± 1,9 бала в основній групі, 41,3 ± 2,4 бала у контрольній групі А та 74,2 ± 3,1 бала у контрольній групі Б; відповідні значення MCS становили 28,3 ± 2,1; 46,8 ± 2,0 та 71,2 ± 2,9 бала. Фізичне функціонування, психоемоційний стан та якість життя пацієнтів після ампутації є взаємопов'язаними компонентами їхнього функціонального та психосоціального статусу [1, 2, 14].

Таким чином, тунельна нейропатія ампутаційної кукси може розглядатися не лише як локальна патологія периферичного нерва, а як стан, що асоціюється з обмеженням використання протеза, зниженням функціональної мобільності та погіршенням суб'єктивних показників здоров'я. Водночас характер цього взаємозв'язку не дозволяє робити висновок про причинно-наслідковий характер виявлених відмінностей, оскільки дослідження має спостережний дизайн.

Практичне значення отриманих результатів полягає в необхідності своєчасного виявлення патології периферичних нервів у пацієнтів з болем ампутаційної кукси, особливо за наявності чіткої залежності симптомів від користування протезом. Поєднання клінічного обстеження з ЕНМГ та ультразвуковою оцінкою нерва може сприяти точнішій диференціації причин больового синдрому та визначенню подальшої тактики лікування [15].

До обмежень дослідження належать одноцентровий характер, включення лише чоловіків, відсутність рандомізації та можливий вплив рівня ампутації, типу протеза й обсягу реабілітації на функціональні результати. Тривалість використання протеза переважно оцінювали за щоденником пацієнта, що може зумовлювати похибку самооцінки. Контрольна група А була клінічно неоднорідною через включення пацієнтів з невромним та/або фантомним болем. Подальші дослідження мають передбачати об'єктивний моніторинг використання протеза, стандартизований біомеханічний аналіз ходьби та оцінку віддалених результатів лікування.

Висновки

1. Тунельні нейропатії ампутаційної кукси супроводжуються вираженим больовим синдромом, що посилюється під час протезного навантаження. У пацієнтів основної групи інтенсивність болю становила 5,2 ± 2,1 бала у спокої та 7,3 ± 1,5 бала при навантаженні в протезі, що перевищувало відповідні показники пацієнтів з постампутаційним болем без тунельної нейропатії — 3,9 ± 1,8 та 5,7 ± 1,6 бала.

2. Тунельна нейропатія супроводжується суттєвим зниженням функціональної активності та мобільності пацієнтів. Тривалість щоденного використання протеза в основній групі була майже вдвічі меншою, ніж у групі А, і більш ніж утричі меншою, ніж у безбольовій групі (3,3 ± 0,6; 5,9 ± 0,8 та 11,4 ± 0,8 год/добу відповідно; $p < 0,001$). Швидкість ходьби також була найнижчою в основній групі (0,49 ± 0,14 проти 0,73 ± 0,15 та 1,21 ± 0,13 м/с; $p < 0,001$). Збереження таких відмінностей порівняно з пацієнтами, які також мали постампутаційний біль, вказує на додатковий функціональний тягар, пов'язаний з тунельним ураженням нервів кукси.

3. Пацієнти з тунельними нейропатіями мають несприятливий психоемоційний профіль та нижчі показники якості життя. Показники HADS-A та HADS-D в основній групі становили 14,2 ± 0,8 та 13,5 ± 0,7 бала відповідно, а показники фізичного та психічного компонентів SF-36 — 24,8 ± 1,9 та 28,3 ± 2,1 бала, що було нижче порівняно з обома групами порівняння ($p < 0,001$). Отримані результати свідчать, що тунельна нейропатія ампутаційної кукси супроводжується не лише локальним больовим синдромом, а й комплексним обмеженням фізичного функціонування та психосоціального благополуччя.

4. Комплексна оцінка пацієнтів з підозрою на тунельну нейропатію ампутаційної кукси має включати клінічне неврологічне обстеження, електронейроміографію та ультразвукове дослідження нервів у поєднанні з оцінкою інтенсивності болю, функціональної мобільності, використання протеза, психоемоційного стану та якості життя. Такий підхід дає змогу комплексно оцінити клінічні прояви нейропатії та її вплив на функціональний стан і якість життя пацієнтів.

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

Внесок авторів. Безсмертний Ю.О. — концепція та дизайн роботи, написання статті; Верба А.В. — концепція та дизайн роботи, критичний огляд, остаточне затвердження статті; Климовицький Ф.В., Браніцький О.Ю., Безсмертна Г.В. — збір та аналіз даних; Шевчук В.І. — критичний огляд, остаточне затвердження статті.

Список літератури

1. Priyadharshan KP, Kumar N, Shanmugam D, et al. Quality of life in lower limb amputees: a cross-sectional study from a tertiary care center of South India. Prosthet Orthot Int. 2022 Jun 1;46(3):246-251. doi: 10.1097/PXR.0000000000000108. Epub 2022 Mar 22. PMID: 35315820.

2. Maciver M, Dixon D, Powell D. Quality of life in young people with limb loss: a systematic review. Disabil Rehabil. 2024 Sep;46(19):4323-4334. doi: 10.1080/09638288.2023.2270908. Epub 2023 Oct 22. PMID: 37865851.

3. Nahorna A, Baur H, Kyrychenko V, et al. Effects of organized physical activity on quality of life and Phantom pain among adults with lower limb amputation: a systematic review and meta-analysis. Qual Life Res. 2026 Jan 3;35(1):19. doi: 10.1007/s11136-025-04149-w. PMID: 41483283; PMCID: PMC12764670.

4. Khadour FA, Khadour YA, Alharbi NSK. War, amputation, and resilience: assessing health-related quality of life in Syrian prosthetic users. Int J Equity Health. 2025 Dec 15;25(1):17. doi: 10.1186/s12939-025-02742-6. PMID: 41398957; PMCID: PMC12821852.

5. Pournajaf S, Damiani C, Agostini F, et al. Identifying discriminant factors between phantom limb pain, residual limb pain, and both in people with lower limb amputations: a cross-sectional study. Int J Rehabil Res. 2024 Sep 1;47(3):214-220. doi: 10.1097/MRR.0000000000000634. Epub 2024 Jul 15. PMID: 38995163; PMCID: PMC11424063.

6. Aydın T, Şen Eİ, Kesiktas N, et al. The Effect of Postamputation Pain and Phantom Sensations on Prosthesis Use, Body Image, and Quality of Life in Patients with Lower-extremity Amputation. Agri. 2021 Jul;33(3):183-189. English. doi: 10.14744/agri.2020.83798. PMID: 34318921.

7. Bhagat N, Drake C, Dawson S, et al. Comparison of Patient-Reported Outcomes after Local Flap Coverage versus Amputation for Complex Lower Extremity Trauma. Indian J Plast Surg. 2024 Oct 24;57(Suppl 1):S36-S42. doi: 10.1055/s-0044-1791741. PMID: 39741716; PMCID: PMC11684903.

8. Tanaka Y, Ueno T. Results of Neuropathy Screening Test for Lower Limb Amputees With Diabetes Mellitus and Their Prosthetic Rehabilitation: A Cross-Sectional Study. Cureus. 2023 Jun 13;15(6):e40352. doi: 10.7759/cureus.40352. PMID: 37456474; PMCID: PMC10339356.

9. Polfer EM, Hoyt BW, Bevevino AJ, et al. Knee Disarticulations Versus Transfemoral Amputations: Functional Outcomes. J Orthop Trauma. 2019 Jun;33(6):308-311. doi: 10.1097/BOT.0000000000001440. PMID: 31124910.

10. Kristal A, Gaunaurd I, Kirk-Sanchez N, et al. Spatiotemporal gait parameters influencing functional mobility of people with lower limb amputation. Prosthet Orthot Int. 2025 Dec 1;49(6):670-676. doi: 10.1097/PXR.0000000000000417. Epub 2025 Jan 14. PMID: 39808516.

11. Luza LP, Ferreira EG, Minsky RC et al. Psychosocial and physical adjustments and prosthesis satisfaction in amputees: a systematic review of observational studies. Disabil Rehabil Assist Technol. 2020 Jul;15(5):582-589. doi: 10.1080/17483107.2019.1602853. Epub 2019 Apr 23. PMID: 31012753.

12. Bhayana H, Bu S, Saini UC, Mehra A. Prevalence and factors associated with psychological morbidity, phantom limb Pain in lower limb amputees. Injury. 2024 Nov;55(11):111828. doi: 10.1016/j.injury.2024.111828. Epub 2024 Aug 20. PMID: 39226730.

13. Demirdel S, Ülger Ö. Body image disturbance, psychosocial adjustment and quality of life in adolescents with amputation. Disabil Health J. 2021 Jul;14(3):101068. doi: 10.1016/j.dhjo.2021.101068. Epub 2021 Feb 5. PMID: 33589407.

14. Sinha R, van den Heuvel WJ, Arokiasamy P. Factors affecting quality of life in lower limb amputees. Prosthet Orthot Int. 2011 Mar;35(1):90-6. doi: 10.1177/0309364610397087. PMID: 21515894.

15. Nakajima H, Yamamoto S, Katsuhira J. Effects of diabetic peripheral neuropathy on gait in vascular trans-tibial amputees. Clin Biomech (Bristol). 2018 Jul;56:84-89. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2018.05.005. Epub 2018 May 9. PMID: 29864596.

16. Tejada-Illa C, Pegueroles J, Claramunt-Molet M, et al. Digital biomechanical assessment of gait in patients with peripheral neuropathies. J Neuroeng Rehabil. 2025 Jul 13;22(1):159. doi: 10.1186/s12984-025-01694-w. PMID: 40653470; PMCID: PMC12257721.

17. Lloyd M, Sugden N, Thomas M, et al. The structure of the Hospital Anxiety and Depression Scale: Theoretical and methodological considerations. Br J Psychol. 2023 May;114(2):457-475. doi: 10.1111/bjop.12637. Epub 2023 Feb 6. PMID: 36745685.

18. Cimino SR, Hitzig SL, Fung V, et al. Quality of life following non-dysvascular lower limb amputation is contextualized through occupations: a qualitative study. Disabil Rehabil. 2024 Aug;46(17):3887-3894. doi: 10.1080/09638288.2023.2258340. Epub 2023 Sep 21. PMID: 37731381.

19. Gane E, Petersen P, Killalea T, et al. The effect of rehabilitation therapies on quality of life and function in individuals with phantom limb pain after lower-limb amputation: A systematic review. Prosthet Orthot Int. 2024 Aug 1;48(4):431-440. doi: 10.1097/PXR.0000000000000288. Epub 2023 Sep 14. PMID: 37708332.

20. Kumar A, Soliman N, Gan Z, et al. A systematic review of the prevalence of postamputation and chronic neuropathic pain associated with combat injury in military personnel. Pain. 2024 Apr 1;165(4):727-740. doi: 10.1097/j.pain.0000000000003094. Epub 2023 Dec 15. PMID: 38112578; PMCID: PMC10949216.

21. Kline PW, Murray AM, Miller MJ, et al. Error-augmentation gait training to improve gait symmetry in patients with non-traumatic lower limb amputation: A proof-of-concept study. Prosthet Orthot Int. 2019 Aug;43(4):426-433. doi: 10.1177/0309364619843777. Epub 2019 Apr 24. PMID: 31018771; PMCID: PMC6880787.

22. Butowicz CM, Golyski PR, Acasio JC, Hendershot BD. Comparing spinal loads in individuals with unilateral transtibial amputation with and without chronic low back pain: An EMG-informed approach. J Biomech. 2024 Mar;166:111966. doi: 10.1016/j.jbiomech.2024.111966. Epub 2024 Feb 2. PMID: 38373872.

23. McDonald JR, Wagoner M, Shaikh F, et al. Mental and Physical Health-Related Quality of Life Following Military Polytrauma. Mil Med. 2024 Nov 5;189(11-12):2550-2561. doi: 10.1093/milmed/usae055. PMID: 38421743; PMCID: PMC11536322.

Отримано/Received 07.07.2026
Рецензовано/Revised 12.09.2026
Прийнято до друку/Accepted 01.10.2026

Information about authors

F.V. Klymovytskyi, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Traumatology, Orthopedics and Military Field Surgery, Donetsk National Medical University, Lyman — Kropyvnytskyi, Ukraine; e-mail: klimovitskiyfedor@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-0566-5808

A.V. Verba, University Clinic, Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine

Yu.O. Bezsmertnyi, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Reconstructive Orthopedics and Traumatology, University Clinic, Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: bezsmertnyiyurii@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-1388-7910

V.I. Shevchuk, MD, DSc, PhD, Professor, Deputy Director for Science, University Clinic, Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: shevchukndiri@gmail.com; https://orcid.org/0000-0003-1105-4795

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

H.V. Bezsmertna, PhD in Medicine, Leading Research Fellow, University Clinic, Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: bezsmertnahalyna@gmail.com; https://orcid.org/0000-0003-1505-4872

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. Yu.O. Bezsmertnyi — concept and design of the study, writing the article; A.V. Verba — concept and design of the study, critical review, final approval of the article; F.V. Klymovytskyi, O.Yu. Branitskyi, H.V. Bezsmertna — data collection and analysis; V.I. Shevchuk — critical review, final approval of the article.

F.V. Klymovytskyi[1], A.V. Verba[2], Yu.O. Bezsmertnyi[2], V.I. Shevchuk[2], O.Yu. Branitskyi[2], H.V. Bezsmertna[2]
[1]Donetsk National Medical University of the Ministry of Health of Ukraine, Lyman, Ukraine
[2]University Clinic of Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine

Tunnel neuropathies of lower-limb amputation stumps: association with prosthesis use, walking speed, and quality of life

Abstract. ***Background.*** Tunnel neuropathies of an amputation stump may cause pain and functional limitations and adversely affect prosthetic rehabilitation. Aim: to evaluate the clinical, functional, and psychosocial characteristics of patients with tunnel neuropathies of lower-limb amputation stumps compared to individuals with post-amputation pain without tunnel neuropathy and those with a pain-free course. ***Materials and methods.*** A prospective comparative study was conducted involving 102 men aged 20–50 years with unilateral traumatic lower-limb amputation more than 12 months ago. The main group comprised 52 patients with tunnel neuropathies of the nerves of an amputation stump, control group A included 23 participants with post-amputation neuroma-related and/or phantom pain without tunnel neuropathy, and control group B included 27 men with a pain-free course. Pain was assessed using a 10-point visual analogue scale, along with daily prosthesis use duration, walking speed measured by the 10-Meter Walk Test, anxiety and depression symptoms evaluated using the Hospital Anxiety and Depression Scale (HADS), and quality of life assessed with the 36-Item Short Form Survey (SF-36). Statistical analysis was performed using IBM SPSS Statistics 26.0; $p < 0.05$ was considered statistically significant. ***Results.*** Daily prosthesis use duration was 3.3 ± 0.6 h/day in the main group, 5.9 ± 0.8 h/day in control group A, and 11.4 ± 0.8 h/day in control group B ($p < 0.001$). Walking speed was 0.49 ± 0.14, 0.73 ± 0.15, and 1.21 ± 0.13 m/s, respectively ($p < 0.001$). Resting pain scores were 5.2 ± 2.1, 3.9 ± 1.8, and 0.6 ± 0.5 points, while pain during prosthetic loading was 7.3 ± 1.5, 5.7 ± 1.6, and 1.4 ± 0.8 points, respectively. HADS-A scores were 14.2 ± 0.8, 9.8 ± 0.6, and 4.1 ± 0.4 points, and HADS-D scores were 13.5 ± 0.7, 8.4 ± 0.9, and 3.8 ± 0.5 points, respectively. The SF-36 physical component summary was 24.8 ± 1.9, 41.3 ± 2.4, and 74.2 ± 3.1 points, while the mental component summary was 28.3 ± 2.1, 46.8 ± 2.0, and 71.2 ± 2.9 points, respectively; $p < 0.001$ for between-group differences across the reported measures. ***Conclusions.*** Patients with tunnel neuropathies of amputation stumps demonstrated greater pain intensity, shorter daily prosthesis use duration, and lower walking speed that in comparison groups. They also had more pronounced symptoms of anxiety and depression and lower physical and mental quality-of-life component scores.

Keywords: lower-limb amputation; amputation stump; tunnel neuropathy; prosthetic repair; pain; walking speed; quality of life; Hospital Anxiety and Depression Scale; 36-Item Short Form Survey

УДК 616.833-001-073.7:617.57/.58057.36 *DOI: https://doi.org/10.22141/1608-1706.5.27.2026.1121*

Сингаївський А.М., Насонова Т.І.
Національний університет охорони здоров'я України імені П.Л. Шупика, м. Київ, Україна

Клінічний аналіз та нейрофізіологічний моніторинг посттравматичних уражень периферичних нервів верхніх та нижніх кінцівок у військовослужбовців

Резюме. ***Актуальність.*** *В умовах сучасних бойових конфліктів осколкові та мінно-вибухові ураження верхніх та нижніх кінцівок характеризуються високою частотою тракційних та ішемічних травм периферичних нервів. Традиційний клінічний огляд і шкали часто не дозволяють на ранніх етапах диференціювати ступені аксонального ураження. Фізіологічний ліміт швидкості регенерації аксонів (близько 1 мм/добу) створює критичне часове вікно, в якому тривала денервація може загрожувати необоротною дегенерацією м'язів-мішеней. Це створює гостру потребу в об'єктивних нейрофізіологічних маркерах для прийняття рішень щодо подальшого лікування хворих.* ***Мета:*** *провести клінічний та нейрофізіологічний аналіз травм периферичних нервів верхніх та нижніх кінцівок у військовослужбовців через 1 та 3 місяці після отриманого поранення шляхом оцінки динаміки відновлення за даними електронейроміографічного моніторингу.* ***Матеріали та методи.*** *У когортне ретроспективне дослідження було включено 89 військовослужбовців чоловічої статі (середній вік (M ± SD) становив 36,81 ± 8,77 року) із верифікованими травматичними ураженнями периферичних нервів. Пошкоджений нерв виступав як одиниця спостереження (n = 139). Вибірку стратифіковано на дві групи: з частковим ураженням (n = 70) та аксонотмезисом (n = 69). Електронейроміографія проводилась через 1 та 3 місяці з моменту отримання травми, з оцінкою моторної (CMAP) та сенсорної (SNAP) провідності з порівнянням показників з нормою та інтактною контралатеральною кінцівкою. Статистична обробка проводилась за допомогою пакета програмного забезпечення JASP з використанням U-критерію Манна — Уїтні та оцінки розміру ефекту за коефіцієнтом рангово-бісеріальної кореляції (Rank-Biserial correlation, r).* ***Результати.*** *У 1-й місяць спостереження в обох групах було зафіксовано статистично значуще зниження амплітуд, у групі аксонотмезису відхилення CMAP від норми було вірогідно більшим, ніж при частковому ураженні (U = 611,0, p < 0,001, r = 0,742). Через 3 місяці спостереження у групі з частковим ураженням відмічалось ефективне включення колатерального спраутингу, що підтверджувалось наближенням медіани до нормальних значень (Me = 0,000). На противагу цьому група аксонотмезису демонструвала формування стійкого функціонального плато без позитивної динаміки: був наявний виражений дефіцит моторних (відхилення від норми Me = –0,725) та сенсорних (відхилення від здорової сторони Me = –0,782) відповідей (p < 0,001).* ***Висновки.*** *Відсутність позитивної динаміки CMAP та SNAP протягом перших 3 місяців з моменту травми вказує на обмеженість резервів колатерального спраутингу. У подібних ситуаціях для уникнення необоротної денерваційної атрофії у таких пацієнтів обов'язковим є проведення додаткових методів обстеження (голкова електроміографія, ультразвукова діагностика нервів). Відсутність позитивної динаміки сенсорних та моторних показників за наявності активних денерваційних змін є абсолютним предиктором декомпенсації та об'єктивним маркером для невідкладного реконструктивного хірургічного втручання.*

Ключові слова: *бойова травма; електронейроміографія; нейрофізіологічний моніторинг; аксонотмезис; денервація; травма нервів; нейропатія; мононейропатія; колатеральний спраутинг*

© «Травма» / «Trauma» («Travma»), 2026
© Видавець Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2026

Для кореспонденції: Сингаївський Андрій Михайлович, аспірант кафедри неврології, Національний університет охорони здоров'я України імені П.Л. Шупика, вул. Дорогожицька, 9, м. Київ, 04112, Україна; e-mail: s000572@vnmu.edu.ua; тел.: +380 (93) 135-12-34
For correspondence: Andrii Synhaivskyi, PhD student, Shupyk National Medical Academy of Postgraduate Education, Dorohozhytska st., 9, Kyiv, 04112, Ukraine; e-mail: s000572@vnmu.edu.ua; phone: +380 (93) 135-12-34
Full list of authors information is available at the end of the article.

Вступ

Сучасні збройні конфлікти характеризуються застосуванням великої кількості високоенергетичної та точної зброї, що часто призводить до складних, мультирівневих та поєднаних ушкоджень опорно-рухового апарату та периферичної нервової системи (ПНС). У структурі санітарних втрат подібна кількість травм може бути прирівняна до характеру епідемії. Масове використання високоточної дистанційної зброї (FPV-дрони, дрони з системою скиду снарядів тощо) призводить до домінування мінно-вибухових та осколкових уражень. За даними літератури, до 95 % травм периферичних нервів верхніх кінцівок у бойових умовах отримані внаслідок дії зброї з дистанційним керуванням [1, 2].

Цивільні та військові травми принципово відрізняються між собою за низкою складних патофізіологічних каскадів. Внаслідок дії масивного гідродинамічного удару, спричиненого вибуховим снарядом, у нервовому стовбурі виникає тимчасова пульсуюча порожнина навіть без його прямого анатомічного розриву. Це механізм молекулярного струсу або тракційної травми, що призводить до порушення мікроциркулярного русла епіневрію та периневрію з подальшою ішемією та формуванням інтраневрального фіброзу [3, 4].

Травматичне пошкодження аксона (незалежно від того, чи це аксонотмезис зі збереженим епіневрієм, чи повний невромезис) буде характеризуватись наявністю дистальної валлерівської дегенерації з подальшим розпадом мієлінової оболонки та аксонального цитоскелета і його фагоцитуванням. Крім того, мінно-вибухові травми кінцівок поєднуються з кістковими переломами, частота яких коливається від 27 до 70 % залежно від локалізації та типу снаряду [3, 5].

Подібні процеси створюють потребу в ранній діагностиці та вчасному лікуванні травматичних уражень периферичних нервів верхніх та нижніх кінцівок. Верифікація ступеня пошкодження аксона, рівня ураження та збереженості нервових волокон критично важлива для визначення оптимальної тактики лікування вже на ранніх етапах захворювання.

Згідно з сучасними уявленнями загальноприйнятою патофізіологічною класифікацією уражень периферичних нервів є шкала Sunderland, яка дозволяє верифікувати прогноз регенерації та визначити обсяг необхідного хірургічного втручання (табл. 1) [6, 7]:

— нульовий ступінь/динамічна ішемія. Стан, при якому наявний функціональний блок провідності, зумовлений локальною ішемією, без структурних пошкоджень;

— неврапраксія/I ступінь. Наявна фокальна деміелінізація за відсутності аксонального ураження. Електрофізіологічно проявляється сповільненням швидкості проведення імпульсу (ШПІ) в зоні ураження;

— аксонотмезис/II ступінь. Аксональна дегенерація при збереженні цілісності ендоневрію. Характеризується легким або помірним зниженням CMAP/SNAP та сприятливим прогнозом щодо відновлення;

— аксонотмезис/III ступінь. Пошкодження аксонів з супутнім порушенням цілісності ендоневрію. Наявне зменшення кількості збережених аксонів, що обмежує можливості колатерального спраутингу та реіннервації;

— невротмезис/IV ступінь. Повне переривання аксонів при збереженій анатомічній цілісності нервового стовбура. Формування інтраневральної сполучної тканини перешкоджає проростанню аксонів, що знижує спонтанну регенерацію;

— невротмезис/V ступінь. Повне розривання (трансекція) нервового стовбура. Спонтанна регенерація неможлива;

— змішане ураження/VI ступінь. Характеризується варіативністю показників, через те що окремі ділянки нерва зазнають різних ступенів пошкодження.

Згідно з даними сучасної літератури, оцінка потенціалу регенерації периферичного нерва обмежена біологічною швидкістю росту аксона. Після валлерівської дегенерації швидкість проростання аксонів у напрямку до цільового м'яза у середньому становить близько 1 мм на добу [8]. Ця фізіологічна обмеженість створює фундаментальну проблему для нейрофізіологів, неврологів та нейрохірургів: при проксимальних ураженнях тривала денервація призводить до необоротних фіброзних змін у м'язах-мішенях та повної деградації кінцевих моторних пластинок [7, 9]. Якщо покладатись виключно на поточні фізіологічні та регенеративні процеси, то можна втратити цільовий орган до початку відновлення. Саме це змушує клініцистів шукати маркери для прийняття рішень, не чекаючи спонтанного відновлення.

Класифікації Seddon (1943) та Sunderland (1951) з поділом на 5–6 патофізіологічних ступенів є золотим стандартом для гістологічної оцінки, проте вони мають недоліки щодо гострого та підгострого періодів. Визначити точну градацію між ступенями пошкодження (особливо між II, III та IV) часто неможливо неінвазивно без прямої візуалізації інтранервальної сполучної тканини [10].

З огляду на сучасні дослідження та поставлені завдання в роботі, поділ вибірки на 6 груп є статистично та клінічно надлишковим. Під час клінічного вибору перед нами стоїть не спектр із шести можливих варіантів, а 2 запитання: чи здатна пошкоджена рухова одиниця до спонтанного відновлення і чи знаходиться пацієнт у стані декомпенсації та потребує раннього реконструктивного хірургічного лікування?

Мета: провести клінічний та нейрофізіологічний аналіз травм периферичних нервів верхніх та нижніх кінцівок у військовослужбовців через 1 та 3 місяці після отриманого поранення шляхом аналізу відсотка їх відновлення за даними електронейроміографічного (ЕНМГ) моніторингу.

Матеріали та методи

У дослідження, проведене з травня 2024 р. до вересня 2025 р., були включені 89 військовослужбовців чоловічої статі віком 18–60 років (середній вік (M ± SD) становив 36,81 ± 8,77 року) із травматичними ураженнями периферичних нервів верхніх та/або нижніх кінцівок.

Усім хворим була проведена ЕНМГ-діагностика через 1 та 3 місяці з моменту поранення на базі кафедри неврології Національного університету охорони здоров'я України імені П.Л. Шупика. Усі пацієнти перебували на стаціонарному лікуванні та отримували консервативне лікування: вітаміни групи В та альфа-ліпоєву кислоту, прегабалін, фізичну терапію, електростимуляцію. Сумарно було проведено 178 ЕНМГ-обстежень.

Усі пацієнти оцінювались за єдиним протоколом, до складу якого входили:

— оцінка типу ураження кінцівки/кінцівок за даними первинної та вторинної медичної документації;

— міжнародні шкали: MRC Scale від M0 до M5 для оцінювання втрати рухової функції кінцівок, шкала Seddon від S0 до S5 для оцінювання втраченої функції чутливості;

— нейрофізіологічне оцінювання за допомогою методу стимуляційної ЕНМГ, під час якої визначалась: моторна відповідь (М-відповідь) з моторних волокон периферичних нервів верхніх та нижніх кінцівок згідно з нормами Preston et Shapiro, 2020 (табл. 2) та в порівнянні зі здоровою стороною безпосередньо з м'яза, який іннервується окремим нервом; сенсорна відповідь (S-відповідь) з сенсорних волокон периферичних нервів верхніх та нижніх кінцівок згідно з нормами Preston et Shapiro, 2020 (табл. 2) та в порівнянні зі здоровою стороною.

Апаратом для проведення обстеження був «Нейрон-Спектр-5» (4/ВПМ). Тривалість від 0,1; 0,2; 0,5 мс та інтенсивність від 10 до 100 мВ з катода підбирались індивідуально під конкретного хворого з урахуванням анатомо-фізіологічних особливостей до отримання супрамаксимальної відповіді з 2 сторін.

Критерії включення в дослідження. Військовослужбовці чоловічої статті, віком від 18 до 60 років, з пораненнями верхніх та/або нижніх кінцівок, які підтверджувались супровідною медичною документацією.

Статистичний аналіз. Статистичну обробку результатів дослідження проводили з використанням програмного забезпечення JASP (версія 0.98.0; JASP Team, 2026). Перевірку кількісних показників на правильність розподілу здійснювали за допомогою критерію Shapiro-Wilk. Оскільки розподіл більшості метрик відрізнявся від нормального, описова статистика для кількісних даних (електрофізіологічні параметри) подана у вигляді медіани (Me) та інтерквартильного розмаху [IQR]. Якісні та рангові ознаки (стадії ураження, бальні оцінки за шкалами) описували абсолютними (n) та відносними (%) частотами. При порівнянні двох незалежних груп за кількісними та ранговими ознака-

Таблиця 1. Загальноприйнята патофізіологічна класифікація уражень периферичних нервів за шкалою Sunderland. Адаптовано за [7]

Ступінь за Sunderland/ Seddon	Клінічна класифікація (групи дослідження)	Прогноз відновлення	Темп реіннервації	Очікуваний ступінь відновлення	ЕНМГ-маркери (1–3-й місяці: CMAP, SNAP)	Хірургічне втручання
0	Динамічна ішемія	Сприятливий	Негайний (після декомпресії)	Повне	Збережені нормальні показники CMAP та SNAP	+/–
I	Неврапраксія	Сприятливий	Швидкий (до 12 тижнів)	Повне	Транзиторне зниження CMAP/SNAP із швидким відновленням на 3-му місяці	+/–
II	Аксонотмезис	Сприятливий	Повільний (близько 1 мм/добу)	Повне	Виражене зниження амплітуди CMAP, початок позитивної динаміки до 3 місяців	+/–
III	Аксонотмезис	Варіабельний	Повільний (близько 1 мм/добу)	Часткове	Виражене зниження амплітуди CMAP, відсутність значущої динаміки на 3-му місяці	+/–
IV	Невротмезис (зі збереженням безперервності)	Несприятливий	Відсутній	Відсутнє	Відсутність моторної (CMAP = 0) та сенсорної відповідей	+
V	Невротмезис (повний анатомічний розрив)	Несприятливий	Відсутній	Відсутнє	Відсутність моторної (CMAP = 0) та сенсорної відповідей	+
VI	Змішане ураження	Змішаний	Залежить від переважаючого типу	Варіабельне	Змішана ЕНМГ-картина, асиметричне або мозаїчне відновлення CMAP	Залежить від травми

ми застосовували U-критерій Манна — Уїтні. Оцінку розміру ефекту проводили шляхом розрахунку коефіцієнта рангово-бісеріальної кореляції (Rank-Biserial Correlation, r). При проведенні аналізу застосовували критерії з двосторонньою критичною ділянкою; відмінності вважалися статистично значущими при рівні $p < 0,05$.

Дизайн дослідження. Дизайн дослідження є ретроспективним, когортним. Було виділено 2 контрольні точки нейрофізіологічного моніторингу: первинне обстеження проводилось через 1 місяць після отримання травми, повторне — через 3 місяці. Для кожного пацієнта як контроль використовували показники інтактної контралатеральної кінцівки. Кінцева вибірка включала 89 військовослужбовців. Після проведення аналізу було виявлено 166 випадків ураження нервів, з яких для подальшого порівняльного аналізу відібрано 139, що відповідали критеріям включення. Поранених розподілили на дві основні групи за ступенем ураження та вираженістю зниження рухової функції. До першої групи увійшло 70 випадків (50,36 %) із вираженим порушенням рухової функції порівняно з відносно здоровою кінцівкою. Другу групу становили 69 випадків ураження нервів (49,64 %) із помірним або легким порушенням рухової функції порівняно з відносно здоровою кінцівкою. Основними кінцевими точками дослідження були визначені кількісні зміни амплітуди моторної (CMAP — Compound Muscle Action Potential) та сенсорної (SNAP — Sensory Nerve Action Potential) відповідей, виражені у відсотках від відповідних міжнародних нормативних значень контралатеральної здорової кінцівки, на 1-й та 3-й місяці після поранення.

Етичне схвалення. Це дослідження схвалено комісією з питань етики та академічної доброчесності Національного університету охорони здоров'я України імені П.Л. Шупика (протокол від 31.01.2025 р. № 3/12).

Результати та обговорення

Вибірку пацієнтів було стратифіковано на 2 групи.

Група 1 — часткове ураження. Пацієнти з цієї вибірки мають достатній збережений пул інтактних моторних одиниць (понад 20 %). Цього вистачає для ініціації колатерального спраутингу, даний феномен допомагає вцілілим аксонам генерувати нові терміналі, реіннервуючи сусідні денервовані м'язові волокна [11]. Збережені моторні одиниці здатні до гіперрекрутування та морфологічного розширення, що дозволяє підтримувати функціональне плато навіть при значній втраті вихідного пулу аксонів [8, 11].

Група 2 — аксонотмезис. У цій групі аксональне ураження перевищує поріг у 80 %. Механізм колатерального спраутингу є недостатнім, оскільки кількість інтактних рухових одиниць є критично низькою. Клінічно та електрофізіологічно наявне різке зниження функції. Такі пацієнти мають загалом менш сприятливий прогноз до самостійного відновлення. Відсутність позитивної динаміки на ЕНМГ у цій групі є прямим предиктором необоротної денерваційної атрофії та потребує зміни тактики лікування [12, 13].

Аналіз електронейроміографічних показників через 1 місяць після травми

Оцінка CMAP. Через 1 місяць після зафіксованої травми відмічалось статистично значуще зниження амплітуди сумарного м'язового потенціалу дії у пацієнтів з аксонотмезисом порівняно з групою часткового ураження. Відхилення амплітуди CMAP від нормальних значень у групі аксонотмезису становило $Me = –0,852$ ($IQR = 0,275$), тоді як у групі часткового ураження $Me = –0,225$ ($IQR = 0,355$). Різниця між групами є значущою ($U = 611,0$, $p < 0,01$), з великим розміром ефекту ($r = 0,742$).

Таблиця 2. Адаптовані референтні норми згідно з D.C. Preston, B.E. Shapiro (2020). Electromyography and neuromuscular disorders: Clinical-electrophysiologic correlations (4th ed.). Elsevier

Тип волокон	Нерв	Відведення	Латентність (мс)	Амплітуда	Швидкість (м/с)
Моторні	Серединний (Medianus)	m. APB	≤ 4,4	≥ 4,0 мВ	≥ 49
Моторні	Ліктьовий (Ulnaris)	m. ADM	≤ 3,3	≥ 6,0 мВ	≥ 49
Моторні	Променевий (Radialis)	m. EIP	≤ 2,9	≥ 2,0 мВ	≥ 49
Моторні	Малогомілковий (Peroneus)	m. EDB	≤ 6,5	≥ 2,0 мВ	≥ 41
Моторні	Великогомілковий (Tibialis)	m. AH	≤ 6,0	≥ 4,0 мВ	≥ 41
Сенсорні	Серединний (Medianus)	2–3-й палець	≤ 3,5 (пікова)	≥ 20 мкВ	≥ 50
Сенсорні	Ліктьовий (Ulnaris)	5-й палець	≤ 3,1 (пікова)	≥ 10 мкВ	≥ 50
Сенсорні	Променевий (Radialis)	Анатомічна табакерка	≤ 2,9 (пікова)	≥ 15 мкВ	≥ 50
Сенсорні	Литковий (Suralis)	Лат. кісточка	≤ 4,4 (пікова)	≥ 6 мкВ	≥ 40

Примітки: m. APB — musculus abductor pollicis brevis; ADM — Abductor digiti minimi; EIP — Extensor indicis proprius; EDB — Extensor digitorum brevis; AH ADM — Abductor digiti minimi Abductor hallucis.

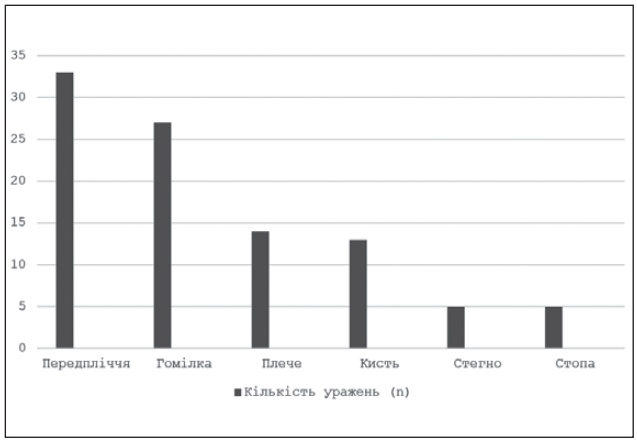


Рисунок 1. Поширеність травм на анатомічних зонах верхніх та нижніх кінцівок

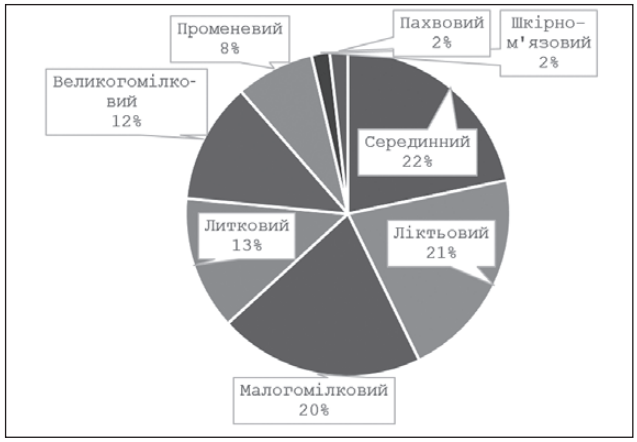


Рисунок 2. Поширеність ураження периферичних нервів

При порівнянні CMAP з інтактною (здоровою) контралатеральною кінцівкою також були виявлені вірогідні відмінності між когортами. У пацієнтів з аксонотмезисом відносне зниження амплітуди становило Me = –0,952 (IQR = 0,109). У групі з частковим ураженням нерва ступінь зниження був вірогідно менш вираженим: Me = –0,710 (IQR = 0,222). Статистичний аналіз підтвердив розбіжність (U = 671,5 p < 0,01) та великий розмір ефекту (r = 0,717).

Оцінка SNAP. Під час аналізу сенсорного потенціалу дії нерва на першому місяці були підтверджені аналогічні закономірності. Зниження амплітуди відносно нормативних значень у групі аксонотмезису становило Me = –0,855 (IQR = 0,263), тоді як у групі часткового ураження даний показник становив Me = –0,517 (IQR = 0,403). Між групами зафіксовано статистично значущу різницю (U = 874,0, p < 0,01) із середнім розміром ефекту (r = 0,598).

При порівнянні амплітуди SNAP зі здоровою стороною медіанні показники групи аксонотмезису становили Me = –0,914 (IQR = 0,174), а групи часткового ураження — Me = –0,706 (IQR = 0,194). Відмінності між групами визнані статистично вірогідними (U = 938,5, p < 0,01), розмір ефекту середній (r = 0,569).

Серед 89 хворих, які брали участь у дослідженні, ізольоване ураження нервів зустрічалось у 38 випадках (42,7 %), множинне (≥ 2 нервів) — у 51 випадку (57,3 %). Найбільш ураженими анатомічними зонами були передпліччя та гомілка (рис. 1); частіше за все були пошкоджені серединний, ліктьовий та малогомілкові нерви (рис. 2).

Аналіз електронейроміографічних показників через 3 місяці

Оцінка CMAP. Через 3 місяці після поранення відхилення амплітуди моторної відповіді зберігало високу статистичну значущість. У групі аксонотмезису відхилення CMAP від нормативних значень становило Me = –0,725 (IQR = 0,570). Натомість у групі з частковим ураженням показник наблизився до нормативних значень: Me = 0,000 (IQR = 0,150). Різниця між групами була статистично значущою (U = 780,5, p < 0,01) і характеризувалася великим розміром ефекту (r = 0,671).

При порівнянні амплітуд CMAP з відносно здоровою кінцівкою на третьому місяці була також виявлена різниця між когортами. У групі аксонотмезису відносне зниження амплітуди становило Me = –0,900 (IQR = 0,164), пацієнти з групи часткового ураження мали ступінь зниження Me = –0,528 (IQR = 0,302). Проведений статистичний аналіз підтвердив значущість розбіжностей (U = 678,5, p < 0,01) та великий розмір ефекту (r = 0,714).

Оцінка SNAP. Після проведеного аналізу показників сенсорного потенціалу дії нерва через 3 місяці після травми відхилення амплітуди порівняно з інтактною кінцівкою залишались статистично значущими: у групі з аксонотмезисом Me = –0,782 (IQR = 0,340), тоді як у групі часткового ураження Me = –0,267 (IQR = 0,449). Відмінність між групами є вірогідною (U = 828,5, p < 0,01), розмір ефекту визначається між середнім та великим (r = 0,619).

Отже, відсутність позитивної динаміки у групі аксонотмезису протягом 3-місячного моніторингу після травми може бути пояснена вичерпанням або відсутністю резервів до колатерального спраутингу. При наявності менше ніж 20 % інтактних рухових одиниць наявне функціональне плато. Такі умови не є сприятливими для відновлення CMAP та SNAP, які залежать від аксональної регенерації, швидкість якої є обмеженою в приблизно 1 мм/добу. При таких умовах активні рухові одиниці не можуть досягти дистальних м'язів-мішеней, що може проявлятись стійким сенсорним та моторним дефіцитом. При цьому відсутність відновлення чутливості у групі аксонотмезису додатково підтверджує тотальну деструкцію аксонів, що може сприяти проведенню хірургічного втручання [5, 14].

Ефективні ранні компенсаторні механізми у групі з частковим ураженням у вигляді збільшення показників CMAP є сприятливим фактором для відновлення. Збережені 20 % аксонів можуть забезпечувати достат-

Таблиця 3. Порівняльний аналіз відхилень електронейроміографічних показників у досліджуваних групах за U-критерієм Манна — Уїтні

Досліджені показники	U	p	Rank-Biserial Correlation	SE Rank-Biserial Correlation
Від норми, 1 міс. (%)				
Амплітуда CMAP (мВ)	611,0	< 0,001	0,7422	0,09890
Зі здоровою, 1 міс. (%)				
Амплітуда CMAP (мВ)	671,5	< 0,001	0,7167	0,09890
Від норми, 3 міс. (%)				
Амплітуда CMAP (мВ)	780,5	< 0,001	0,6707	0,09890
Зі здоровою, 3 міс. (%)				
Амплітуда CMAP (мВ)	678,5	< 0,001	0,7137	0,09890
Від норми, 1 міс. (%)				
Амплітуда SNAP (мкВ)	874,0	< 0,001	0,5982	0,1010
Зі здоровою, 1 міс. (%)				
Амплітуда SNAP (мкВ)	938,5	< 0,001	0,5685	0,1010
Зі здоровою, 3 міс. (%)				
Амплітуда SNAP (мкВ)	828,5	< 0,001	0,6191	0,1010

Примітки: U — емпіричне значення критерію Манна — Уїтні; p — досягнутий рівень статистичної значущості; Rank-Biserial Correlation — коефіцієнт рангово-бісеріальної кореляції (показник розміру ефекту); SE — стандартна похибка розміру ефекту; CMAP — сумарний м'язовий потенціал дії (Compound muscle action potential); SNAP — сенсорний потенціал дії нерва (Sensory nerve action potential); відмінності вважаються статистично значущими при p < 0,05.

ній пул для термінального спраутингу, що може перекрити виражений функціональний дефіцит без очікування проксимально-дистальної регенерації [8, 15].

Висновки

Після отримання травматичного ураження периферичних нервів верхніх та нижніх кінцівок ЕНМГ-моніторинг на 1-му та 3-му місяці дозволяє об'єктивно стратифікувати рівень та ступінь ураження і прогнозувати їхній регенеративний потенціал.

При частковому ураженні збережений пул інтактних моторних одиниць (понад 20 %) може ініціювати ефективний механізм колатерального спраутингу, що буде забезпечувати функціональне відновлення.

У пацієнтів з вираженим аксонотмезисом механізми колатерального спраутингу не є ефективними через критично малу кількість збережених рухових одиниць та обмеженість організму до самостійного відновлення. Патофізіологічно це зумовлено формуванням функціонального плато з відсутністю позитивної електрофізіологічної динаміки, зокрема збереженням вираженого дефіциту моторної та сенсорної відповіді на 3-й місяць моніторингу.

Формування стійкої відсутності відновлення амплітудних характеристик протягом 3 місяців моніторингу, зумовлене фізіологічним лімітом швидкості проксимально-дистальної регенерації аксонів (близько 1 мм на добу), є предиктором формування необоротної денервaційної атрофії м'язів-мішеней. Наявність такого патерну декомпенсації слугує об'єктивним показанням до додаткового дообстеження (голкова електроміографія, ультразвукова діагностика нервів) та зміни консервативної тактики на раннє реконструктивне хірургічне лікування.

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

Фінансування. Дослідження виконано у рамках науково-дослідної роботи «Прогнозування та моніторинг відновлення функції після травматичного ураження периферичних нервів верхніх та нижніх кінцівок» Національного університету охорони здоров'я України імені П.Л. Шупика (номер державної реєстрації 0125U000775).

Внесок авторів. Сингаївський А.М. — концепція та дизайн дослідження, збір даних, аналіз та інтерпретація даних, написання статті, редагування статті; Насонова Т.І. — концепція та дизайн дослідження, аналіз та інтерпретація даних, редагування статті, остаточне затвердження статті.

Список літератури

1. Eckhoff MD, Craft MR, Nicholson TC, Nesti LJ, Dunn JC. Lower Extremity Combat Sustained Peripheral Nerve Injury in US Military Personnel. Plast Reconstr Surg Glob Open. 2021 Mar 15;9(3):e3447. doi: 10.1097/GOX.0000000000003447. PMID: 33747687; PMCID: PMC7963502.

2. Strafun SS, Kurinnyi IM, Bohdan SV, Lysak AS. Analysis of the Structure of Combat-Related Injuries to the Nerves of the Upper Limb in Modern Combat Operations. Terra Orthopaedica. 2025;126(3):44-51. doi: 10.37647/2786-7595-2025-126-3-44-51.

3. Bulutluöz EG, Balandız H, Özsoy S. Evaluation of traumatic peripheral nerve injuries in terms of Forensic Medicine. Ulus Travma Acil Cerrahi Derg. 2025 Mar;31(3):269-275. doi: 10.14744/tjtes.2024.73076. PMID: 40052316; PMCID: PMC11894235.

4. Avery E, Lau H, Stefaniuk S, Novak CB, Dengler J. Nerve Injury Related to Firearm Extremity Trauma. Plast Surg (Oakv). 2025 Nov 20:22925503251392593. doi: 10.1177/22925503251392593. Epub ahead of print. PMID: 41278521; PMCID: PMC12634383.

5. Blum E, Mologne MS, Perugini JM, Brogan DM, Dy CJ. Ballistic Nerve Injuries of the Extremities: A Systematic Review of Diagnosis, Timing, Treatment, and Outcomes. Hand (N Y). 2026 Feb 10:15589447251415387. doi: 10.1177/15589447251415387. Epub ahead of print. PMID: 41665026; PMCID: PMC12890603.

6. Solonovych OS, Tretyakova AI, Tretyak IB, Chebotaryova LL, Gatskyi OO, Mytsak OI. The choice of method of electroneuromyography in remote consequences of gunshot and mine-blast injuries of limb nerves. Ukr Neurosurg J. 2024;30(2):3-13. doi: 10.25305/unj.299251.

7. Pripotnev S, Bucelli RC, Patterson JMM, Yee A, Pet MA, Mackinnon S. Interpreting Electrodiagnostic Studies for the Management of Nerve Injury. J Hand Surg Am. 2022 Sep;47(9):881-889. doi: 10.1016/j.jhsa.2022.04.008. Epub 2022 Jun 20. PMID: 35738957.

8. Gordon T. Peripheral Nerve Regeneration and Muscle Reinnervation. Int J Mol Sci. 2020 Nov 17;21(22):8652. doi: 10.3390/ijms21228652. PMID: 33212795; PMCID: PMC7697710.

9. Gupta R, Johnston TR, Chen VY, Gonzales LP, Steward O. Human Motor Endplate Survival after Chronic Peripheral Nerve Injury. medRxiv [Preprint]. 2023 Oct 14:2023.10.12.23296760. doi: 10.1101/2023.10.12.23296760. PMID: 37873401; PMCID: PMC10592993.

10. Schroen CA, Duey AH, Nasser P, Laudier D, Cagle PJ, Hausman MR. What Is the Sequence of Mechanical and Structural Failure During Stretch Injury in the Rat Median Nerve? The Neuroclasis Classification. Clin Orthop Relat Res. 2025 Jun 1;483(6):1142-1158. doi: 10.1097/CORR.0000000000003405. Epub 2025 Feb 18. PMID: 40192591; PMCID: PMC12106235.

11. Burnett MG, Zager EL. Pathophysiology of peripheral nerve injury: a brief review. Neurosurg Focus. 2004 May 15;16(5):E1. doi: 10.3171/foc.2004.16.5.2. PMID: 15174821.

12. Menorca RM, Fussell TS, Elfar JC. Nerve physiology: mechanisms of injury and recovery. Hand Clin. 2013 Aug;29(3):317-30. doi: 10.1016/j.hcl.2013.04.002. PMID: 23895713; PMCID: PMC4408553.

13. Bateman EA, Pripotnev S, Larocerie-Salgado J, Ross DC, Miller TA. Assessment, management, and rehabilitation of traumatic peripheral nerve injuries for non-surgeons. Muscle Nerve. 2025 May;71(5):696-714. doi: 10.1002/mus.28185. Epub 2024 Jun 21. PMID: 39030747; PMCID: PMC11998971.

14. Robinson LR, Binhammer P. Role of electrodiagnosis in nerve transfers for focal neuropathies and brachial plexopathies. Muscle Nerve. 2022 Feb;65(2):137-146. doi: 10.1002/mus.27376. Epub 2021 Jul 31. PMID: 34331718.

15. Sulaiman W, Gordon T. Neurobiology of peripheral nerve injury, regeneration, and functional recovery: from bench top research to bedside application. Ochsner J. 2013 Spring;13(1):100-8. PMID: 23531634; PMCID: PMC3603172.

Отримано/Received 19.06.2026
Рецензовано/Revised 11.08.2026
Прийнято до друку/Accepted 20.08.2026

Information about authors

A.M. Synhaivskyi, PhD student, Shupyk National Medical Academy of Postgraduate Education, Dorohozhytska st., 9, Kyiv, 04112, Ukraine; e-mail:s000572@vnmu.edu.ua; https://orcid.org/0009-0001-1461-6899
T.I. Nasonova, Shupyk National Healthcare University of Ukraine, Dorohozhytska st., 9, Kyiv, 04112, Ukraine; e-mail: tnasonova@ukr.net; https://orcid.org/0000-0002-5632-2127

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 as part of the research project "Predicting and monitoring functional recovery following traumatic injury to the peripheral nerves of the upper and lower extremities" at the Shupyk National Healthcare University of Ukraine (state registration number 0125U000775).

Authors' contribution. A.M. Synhaivskyi — study concept and design, data collection, analysis and interpretation, manuscript writing and editing; T.I. Nasonova — study concept and design, data analysis and interpretation, manuscript editing and final approval.

A.M. Synhaivskyi, T.I. Nasonova
Shupyk National Healthcare University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Clinical analysis and neurophysiological monitoring of post-traumatic peripheral nerve injuries of the upper and lower extremities in military personnel

Abstract. ***Background.*** In modern wars, shrapnel and mine-explosive injuries of the upper and lower extremities are characterized by a high frequency of traction and ischemic peripheral nerve injuries. Standard clinical examination and scales often fail to differentiate the degree of axonal loss at early stages. The physiological limit of the axonal regeneration rate (approximately 1 mm/day) creates a critical time window in which prolonged denervation may threaten irreversible denervation of target muscles. These challenges create an urgent need for objective neurophysiological markers to guide subsequent treatment decisions for patients. The purpose was to conduct a clinical and neurophysiological analysis of peripheral nerve injuries of the upper and lower extremities in military personnel at 1 and 3 months post-injury by evaluating recovery dynamics using electroneuromyography (ENMG). ***Materials and methods.*** In this cohort retrospective study, 89 male military personnel were included (average age (M ± SD) was 36.81 ± 8.77 years) with verified traumatic peripheral nerve injuries. The injured nerve served as the unit of observation (n = 139). The sample was

stratified into two groups: those with partial injury (n = 70) and those with axonotmesis (n = 69). ENMG was performed at 1 and 3 months post-injury with an assessment of the compound muscle action potential (CMAP) and sensory nerve action potential (SNAP) by comparing the parameters with normative values and the intact contralateral limb. The statistical analysis was conducted using the JASP software package, employing the Mann-Whitney U test and estimating the effect size via the rank-biserial correlation (r) coefficient. ***Results.*** At 1 month of observation, a statistically significant decrease in amplitudes was recorded in both groups; however, the deviation of CMAP from the normal parameters in the axonotmesis group was significantly greater than in the partial injury group ($U = 611.0$, $p < 0.001$, $r = 0.742$). At 3 months of observation, the partial injury group demonstrated effective activation of collateral sprouting, which was confirmed by the median approaching normative values (Me = 0.000). In contrast, the axonotmesis group exhibited the formation of a stable functional plateau with no positive dynamics: a pronounced deficit in motor (deviation from the normal parameters: Me = –0.725) and sensory responses (deviation from the opposite healthy side: Me = –0.782) was present ($p < 0.001$). ***Conclusions.*** The lack of positive dynamics in CMAP and SNAP during the first 3 months post-injury indicates limited reserves of collateral sprouting. In such clinical scenarios, to prevent irreversible denervation atrophy, it is mandatory to perform additional diagnostic procedures (needle electromyography, nerve ultrasound). The absence of positive dynamics in sensory and motor parameters, coupled with active denervation changes, serves as an absolute predictor of decompensation and an objective marker for urgent reconstructive surgical intervention.

Keywords: combat trauma; electroneuromyography; neurophysiological monitoring; axonotmesis; denervation; nerve injury; neuropathy; mononeuropathy; collateral sprouting

УДК 616.718.5/.6-089.873-089.844 *DOI: https://doi.org/10.22141/1608-1706.5.27.2026.1122*

Кіх А.Ю.[1], Ярмолюк Ю.О.[2, 3], Смик О.О.[1], Бур'янов О.А.[3]
[1]Військово-медичний клінічний лікувально-реабілітаційний центр, м. Ірпінь, Україна
[2]Національний військово-медичний клінічний центр «Головний військовий клінічний госпіталь», м. Київ, Україна
[3]Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, м. Київ, Україна

Транстибіальна реампутація після бойової травми: порівняння косих клаптів і довгого заднього клаптя при формуванні кукси

Резюме. ***Актуальність.*** *Формування функціонально придатної кукси гомілки після бойової травми є важливою передумовою ефективного протезування та подальшої реабілітації. Локалізація післяопераційного рубця та якість м'якотканинного покриття можуть визначати ризик пізніх місцевих ускладнень, потребу в ревізійних оперативних втручаннях, ефективність і комфорт протезування, а отже, впливати на функціональну активність і якість життя пацієнта.* ***Матеріали та методи.*** *Проведено одноцентрове ретроспективне порівняльне когортне дослідження з історичною контрольною групою, до якого включено 98 пацієнтів. Контрольну групу становили 49 послідовно включених пацієнтів, прооперованих до впровадження у березні 2024 року методики косих клаптів і формування довгого заднього клаптя; основну групу — 49 послідовно включених пацієнтів, прооперованих після її впровадження. Дані медичної документації та рутинного 12-місячного післяопераційного спостереження аналізували ретроспективно. Основною кінцевою точкою була частота клінічно значущих пізніх локальних ускладнень, додатковою — частота ревізійних втручань. Багатофакторний аналіз виконували за допомогою логістичної регресії з додатковою перевіркою стійкості оцінок методом Firth.* ***Результати.*** *Частота пізніх локальних ускладнень становила 8,2 % у групі косих клаптів і 30,6 % — у групі довгого заднього клаптя (p = 0,005); абсолютна різниця частот становила 22,45 відсоткового пункту, RR = 0,27 (95% ДІ 0,10–0,75). Пізні ревізійні втручання виконували відповідно у 4,1 та 18,4 % пацієнтів (p = 0,025). У багатофакторній моделі довгий задній клапоть був асоційований із вищими шансами пізніх локальних ускладнень (скоригований OR = 4,86; 95% ДІ 1,45–16,29; p = 0,010); багатофакторний аналіз Firth підтвердив напрямок асоціації (OR = 4,54; 95% ДІ 1,55–15,89; p = 0,005).* ***Висновки.*** *У межах нерандомізованого ретроспективного дослідження формування косих шкірно-фасціальних клаптів було асоційоване з більш сприятливою локалізацією післяопераційного рубця, нижчою частотою пізніх локальних ускладнень і меншою частотою ревізійних оперативних втручань порівняно з довгим заднім клаптем.*

Ключові слова: *реампутація; косі клапті; ампутаційна кукса; післяопераційний рубець; реконструктивна хірургія; бойова травма*

Вступ

Сучасна бойова травма нижніх кінцівок є високоенергетичною, супроводжується значним руйнуванням тканин і характеризується високим ризиком ранніх та пізніх ускладнень. У сучасних збройних конфліктах, зокрема в російсько-українській війні, спостерігається значна частка бойових ушкоджень кінцівок, що нерідко призводять до первинної ампутації, а у випадках невдалого реконструктивного лікування можуть зумовлювати необхідність пізньої ампутації або реампутації. У таких випадках формування функціонально придатної кукси є ключовою передумовою раннього, стабільного та якісного протезування [1, 2].

Форма кукси залежить від характеру та рівня первинного ушкодження, обсягу хірургічного лікування та застосованих хірургічних технік. Відтерміноване фор-

© «Травма» / «Trauma» («Travma»), 2026
© Видавець Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2026

Для кореспонденції: Бур'янов Олександр Анатолійович, доктор медичних наук, професор, кафедра травматології та ортопедії, Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, бульв. Тараса Шевченка, 13, м. Київ, 01601, Україна; e-mail: kaftraum@ukr.net; тел.: +380 (67) 796-68-76
For correspondence: Olexandr A. Burianov, MD, DSc, PhD, Professor, Department of Traumatology and Orthopedics, Bogomolets National Medical University, Taras Shevchenko boulevard, 13, Kyiv, 01601, Ukraine; e-mail: kaftraum@ukr.net; phone: +380 (67) 796-68-76
Full list of authors information is available at the end of the article.

мування кукси після стабілізації ранового процесу дає можливість виконати резекцію кісток на оптимальному рівні, провести обробку нервів і сформувати адекватне м'якотканинне покриття. Якість сформованої кукси безпосередньо впливає на подальшу реабілітацію, протезування, ризик розвитку ускладнень та потребу в ревізійних оперативних втручаннях [3, 4].

Особливе значення при транстибіальній ампутації має м'якотканинний комплекс дистальних відділів кукси, оскільки м'які тканини повинні забезпечувати адекватне покриття кісткових структур та витримувати циклічне навантаження в протезі. У свою чергу, дефіцит або нерівномірність м'яких тканин у ділянці кукси підвищують ризик травматизації, хронічних ран, болю та повторних оперативних втручань [3, 5].

Використання протеза передбачає постійну взаємодію кукси з куксоприймачем; на межі «кукса — куксоприймач» виникають циклічні сили тиску та зсуву, величина й локалізація яких змінюються залежно від форми кукси, конструкції протеза та рухової активності. Навіть незначні конструктивні зміни протеза здатні суттєво змінювати розподіл локального тиску, особливо на навантажуваних поверхнях кукси та в ділянках кісткових опилів [6, 7]. Розташування післяопераційного рубця над опилами кісток або в зоні циклічного навантаження в протезі є потенційно вразливою локалізацією. Проблеми шкіри залишаються одними з найпоширеніших вторинних станів у користувачів протезів нижньої кінцівки. Тривалий тиск, тертя, мацерація, підвищена вологість та мікротравматизація можуть призводити до подразнення, ерозій і виразкування, що обмежує щоденне користування протезом [8, 9]. Додатковим фактором ризику є порушення чутливості кукси: у сучасному дослідженні пацієнтів із транстибіальною ампутацією втрата чутливості вздовж лінії післяопераційного рубця була виявлена у половини обстежених, що підкреслює потенційну небезпеку повторного навантаження рубцевої ділянки без своєчасного больового сигналу [10].

Клінічна значущість локальних проблем кукси виходить за межі стану шкіри. У військовослужбовців із бойовими ампутаціями задоволеність протезом позитивно асоційована з показниками якості життя, водночас подразнення та ушкодження шкіри залишаються одними з частих причин незадоволеності протезуванням [11]. У великих вибірках користувачів протезів нижньої кінцівки комфорт, функціональна мобільність і задоволеність протезом також тісно пов'язані з показниками якості життя та повсякденної активності [12–15]. Таким чином, хірургічне формування кукси та подальше протезування слід розглядати як єдиний функціональний континуум.

Після травматичних ампутацій потреба в пізніх ревізійних операціях залишається суттєвою. У дослідженні посттравматичних ампутацій нижньої кінцівки Milaire et al. [16] ревізійні втручання на куксі після 6 місяців спостерігали у 27 із 94 кінцівок, а через 5 років лише 64 % пацієнтів залишалися вільними від повторної операції. Досвід лікування постраждалих від війни в Сирії також демонструє, що кісткові розростання, симптоматичні невроми, хронічні виразки, рубцеві контрактури та надлишок або дефіцит м'яких тканин можуть унеможливлювати протезування і потребувати додаткового хірургічного лікування [17].

Безпосередні порівняльні дані щодо косих клаптів і довгого заднього клаптя існують, однак вони отримані переважно у пацієнтів із критичною ішемією кінцівки або діабетичною інфекцією. У мультицентровому рандомізованому дослідженні Ruckley et al. за участю 191 пацієнта істотних відмінностей між skew flap і long posterior flap щодо первинного загоєння, ревізій та подальшого протезування не виявлено [21]. У ретроспективній когорті Jesani et al., що включала 242 транстибіальні ампутації, тип клаптя також не був асоційований із частотою хірургічних ревізій [22]. Систематичний огляд Cochrane не продемонстрував переконливої переваги одного типу розрізу над іншим у дисваскулярній популяції [23]. Водночас ці дані не можуть бути безпосередньо екстрапольовані на молодих пацієнтів із високоенергетичною бойовою травмою та відстроченою транстибіальною реампутацією. Саме для цієї популяції залишається недостатньо вивченим зв'язок між конфігурацією шкірно-фасціальних клаптів, кінцевою локалізацією рубця, його взаємодією з куксоприймачем та ризиком пізніх локальних ускладнень.

Мета: провести порівняльну оцінку локалізації післяопераційного рубця, частоти й характеру пізніх рубцево-шкірних та кістково-шкірних ускладнень, а також потреби в пізніх ревізійних оперативних втручаннях у пацієнтів із бойовими пораненнями нижньої кінцівки після транстибіальної реампутації на рівні середньої третини гомілки при застосуванні косих клаптів або довгого заднього клаптя протягом 12 місяців спостереження.

Матеріали та методи

Проведено одноцентрове ретроспективне порівняльне когортне дослідження з історичною контрольною групою, до якого включали військовослужбовців із бойовими пораненнями нижньої кінцівки, яким у Військово-медичному клінічному лікувально-реабілітаційному центрі (ВМКЛРЦ) у 2022–2025 рр. виконували транстибіальну реампутацію на рівні середньої третини гомілки. Звіт про дослідження підготовлено відповідно до рекомендацій STROBE [19].

Формування груп було нерандомізованим і визначалося календарним періодом та зміною прийнятої хірургічної тактики. До обох груп послідовно включали пацієнтів, які відповідали встановленим критеріям у певний календарний період. До історичної контрольної групи увійшли 49 пацієнтів, прооперованих до впровадження у березні 2024 року методики косих шкірно-фасціальних клаптів і застосування довгого заднього клаптя. Основну групу становили 49 послідовних пацієнтів, яким після впровадження нової методики до серпня 2025 року виконували реампутацію із формуванням косих клаптів. Календарні періоди застосування методик не перекривалися, а вибір тех-

ніки не визначався індивідуальними анатомічними характеристиками кукси, тяжкістю ушкодження або суб'єктивним рішенням хірурга.

Критерії включення: ізольоване бойове поранення нижньої кінцівки з травматичним відчленуванням або руйнацією на рівні стопи, гомілковостопного суглоба чи нижньої третини гомілки; виконання транстибіальної реампутації на рівні середньої третини гомілки у стадії ранового спокою (≥ 4 тижні після травми); формування кукси одним із двох досліджуваних методів — довгим заднім клаптем або косими шкірно-фасціальними клаптями; наявність достатнього обсягу клінічних даних для оцінки визначених кінцевих точок.

Критерії виключення: рівень травматичного відчленування проксимальніше від нижньої третини гомілки; виконання реампутації проксимальніше від середньої третини гомілки; наявність додаткових ран у зоні реампутації; поєднана травма, що суттєво впливала на загальний перебіг лікування та функціональне відновлення; недостатній обсяг клінічних даних для оцінки основної кінцевої точки.

Ретроспективно аналізували медичну документацію та записи планових клінічних оглядів протягом 12 місяців після реампутації. Реєстрували демографічні та клінічні характеристики, рівень первинного травматичного відчленування, сторону ураження, термін від травми до реампутації, особливості оперативного втручання, перебіг післяопераційного періоду, анатомічний стан кукси, локалізацію та клінічно значущі характеристики післяопераційного рубця, пізні рубцево-шкірні й кістково-шкірні ускладнення та ревізійні оперативні втручання.

До підсумкової аналітичної вибірки включено 98 пацієнтів (усі чоловіки) віком 20–52 роки, по 49 у кожній групі. Для всіх пацієнтів були доступні дані для оцінки основної 12-місячної кінцевої точки; відсутніх значень не було, імпутацію не проводили. Апріорний розрахунок розміру вибірки не виконували; аналізували сформовану ретроспективну когорту пацієнтів, які відповідали встановленим критеріям.

Етичні аспекти. Дослідження схвалено комісією з питань біоетичної експертизи та етики наукових досліджень Національного медичного університету імені О.О. Богомольця (протокол № 195 від 26.05.2025). Дослідження погоджено локальною комісією з питань біоетики ВМКЛРЦ (протокол № 3/2026 від 06.07.2026). У зв'язку з ретроспективним використанням знеособлених клінічних даних окрема інформована згода па-

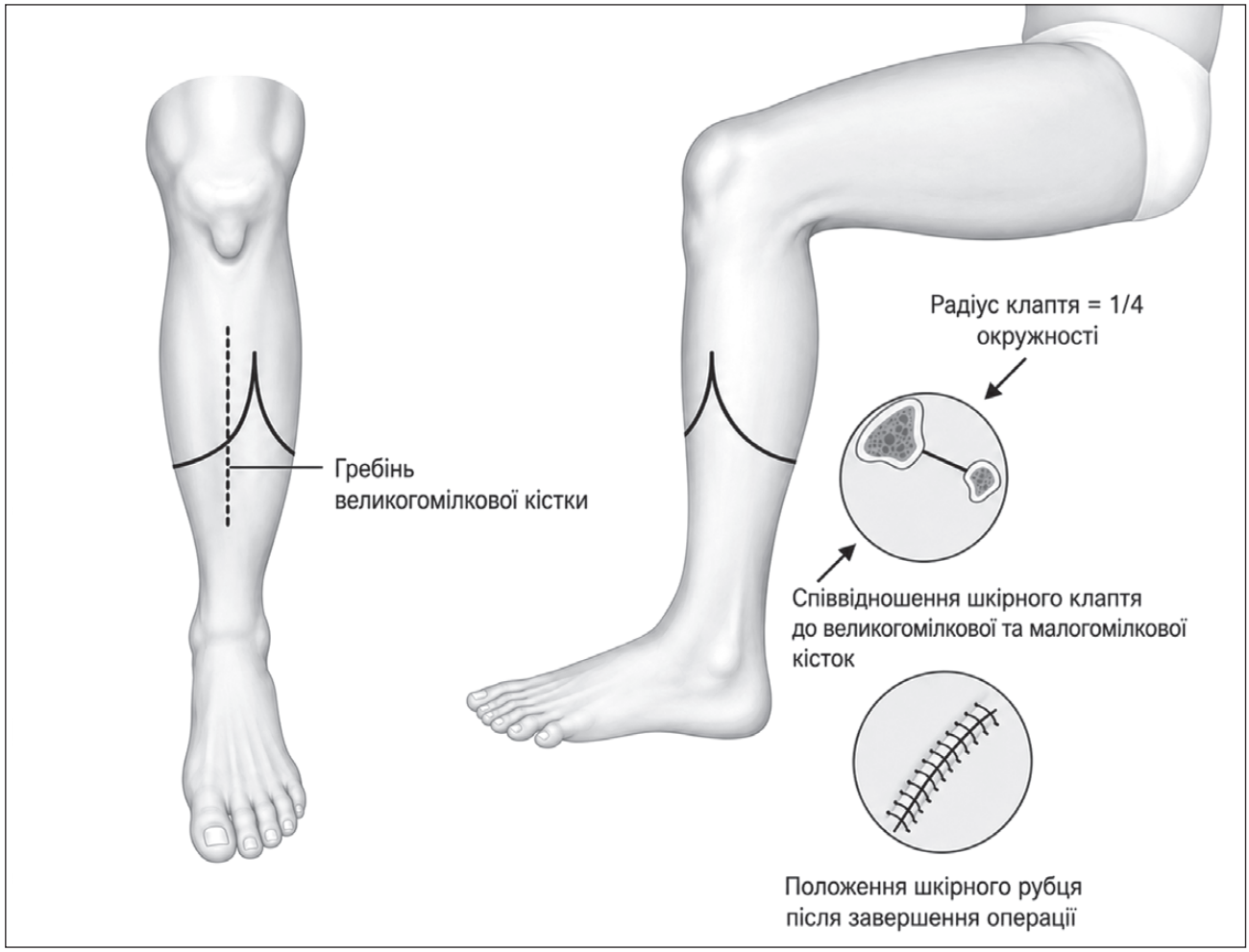


Рисунок 1. Схема формування косих шкірно-фасціальних клаптів при транстибіальній реампутації

цієнтів не вимагалася. Конфіденційність даних була забезпечена.

В обох групах пацієнтам виконували транстибіальну реампутацію кінцівки на рівні середньої третини гомілки за уніфікованою хірургічною технікою. Кістковий етап включав резекцію великогомілкової кістки з формуванням кісткового опилу та обробкою її переднього гребеня. Малогомілкову кістку резектували на 1,5–2,0 см проксимальніше від рівня резекції великогомілкової кістки. Судинно-нервовий етап передбачав стандартну обробку судинних пучків. Виконували тракційну невротомію великогомілкового, сурального, підшкірного та глибокого малогомілкового нервів проксимальніше від рівня резекції кісток — у зоні, яка, за хірургічним прогнозом, не мала залучатися до рубцевого процесу в ділянці кукси. Поверхневий малогомілковий нерв обробляли за методикою VDMT (Vascularized Denervated Muscle Target). На наступному етапі формували «м'язову куксу» шляхом адаптації та міодезу м'язів до великогомілкової кістки для забезпечення стабільного м'якотканинного покриття кісткового опилу. Основною відмінністю між групами був м'якотканинний етап: в основній групі шкірно-фасціальний комплекс ушивали з формуванням косих клаптів, тоді як у контрольній групі застосовували класичний довгий задній клапоть. Отже, в обох групах були уніфіковані рівень реампутації, обробка кісток, судинно-нервових структур, периферичних нервів і формування м'язової кукси; досліджуваною відмінністю залишалася методика формування шкірно-фасціального покриття кукси.

Оцінку результатів лікування проводили комплексно з урахуванням анатомічних і клінічних показників. Характеристики сформованої транстибіальної кукси оцінювали з урахуванням принципів ISO 8548-2:2020. Для ретроспективної оцінки локалізації післяопераційного рубця використовували дані медичної документації та записів планових клінічних оглядів, виконаних після стабілізації стану кукси та початку протезування. Медіанний термін від реампутації до задокументованої клінічної оцінки становив 5,1 місяця (min–max: 4,3–5,8 місяця). В аналіз включали лише ті характеристики рубця та його взаємодії з куксоприймачем, які були безпосередньо зафіксовані у відповідній медичній документації; незафіксовані ознаки ретроспективно не реконструювали, а стандартизовані шкали оцінки рубця заднім числом не застосовували. Формального засліплення щодо виду виконаної клаптевої пластики не застосовували, оскільки конфігурація післяопераційного рубця візуально відрізнялася між методиками. Окремого інструментального картування тиску в куксоприймачі не проводили. Тому для аналізу використовували клінічно задокументовані зони контакту та навантаження. «Поза основною зоною протезного навантаження» означало, що рубець не перетинав ділянки основного контакту/передачі навантаження, визначені під час клінічної оцінки посадки куксоприймача; «у зоні потенційного контакту» — що хоча б частина рубця контактувала з внутрішньою поверхнею куксоприймача під час примірки або користування; «у зоні клінічно найбільшого локального навантаження» — що рубець збігався з ділянкою найбільш вираженого локального контакту за даними клінічної оцінки посадки куксоприймача та стану шкіри після навантаження. Цей термін не означав інструментально виміряного максимального тиску. «На дистальній поверхні кукси» було анатомічною характеристикою положення рубця і не означало автоматично його розташування в зоні протезного навантаження; «безпосередньо над кістковим опилом» означало проєкцію рубця над дистальним кістковим опилом за клінічними анатомічними орієнтирами. Категорії локалізації не були взаємовиключними й реєструвалися як окремі бінарні ознаки. Основною кінцевою точкою була частота клінічно значущих пізніх локальних рубцево-шкірних та/або кістково-шкірних ускладнень протягом 12 місяців; додатковою — частота ревізійних оперативних втручань на куксі протягом того самого періоду.

Статистичний аналіз включав методи описової та аналітичної статистики. Кількісні дані подавали як M ± SD або Me [IQR] залежно від розподілу, нормальність якого оцінювали критерієм Шапіро — Вілка. Для порівняння незалежних груп застосовували двобічний t-критерій Велча або U-критерій Манна — Вітні. Категоріальні дані подавали як n (%) і порівнювали за допомогою χ^2-критерію Пірсона або двобічного точного критерію Фішера за малих очікуваних частот. Для оцінки величини міжгрупових відмінностей використовували стандартизовану різницю середніх (SMD) для кількісних та V Крамера для категоріальних змінних. Для основних бінарних кінцевих точок розраховували різницю ризиків (RD), відносний ризик (RR), відношення шансів (OR) та відповідні 95% довірчі інтервали (ДІ); показники NNT не використовували для причинної інтерпретації через спостережний дизайн. 95% ДІ для окремих частот визначали методом Вілсона, для різниці ризиків — методом Ньюкомба, а для RR та OR — логарифмічним методом. Багатофакторну бінарну логістичну регресію будували для основної кінцевої точки. Чотири коваріати визначили a priori на підставі клінічної релевантності та потенційної здатності змішувати зв'язок між методикою формування клаптя й ускладненнями: методика клаптя, вік, термін до реампутації та рівень первинного травматичного відчленування. Відбір змінних не ґрунтувався на результатах однофакторних тестів. Методика кодувалася як 0 — косі клапті, 1 — довгий задній клапоть; вік аналізували на кожні +10 років; термін до реампутації — на кожні +10 днів; рівень первинного відчленування кодували порядковою змінною: 1 — стопа, 2 — гомілковостопний суглоб, 3 — нижня третина гомілки. Таке кодування передбачало монотонний лінійний тренд логарифма шансів між послідовними категоріями та було обране для обмеження кількості параметрів моделі за невеликої кількості подій. З огляду на 19 подій основної кінцевої точки та обмежене співвідношення кількості подій та числа предикторів стандартну багатофакторну модель розглядали як експлораторну, а стійкість оцін-

ки для основної експозиції додатково перевіряли багатофакторною пеналізованою логістичною регресією Firth з тим самим набором коваріат [20]. Усі тести були двобічними; $p < 0,05$ вважали статистично значущим. Статистичні розрахунки виконували з використанням Microsoft Excel 2019 та R Statistics. Пеналізовану багатофакторну логістичну регресію Firth виконували за допомогою пакета logistf версії 1.26.1.

Результати

Усі 98 пацієнтів, включених до підсумкового аналізу, мали доступні дані для оцінки основної 12-місячної кінцевої точки; її аналіз виконано для 49 пацієнтів у кожній групі.

Статистично значущих міжгрупових відмінностей за віком, стороною ураження, рівнем первинного травматичного відчленування та терміном до реампутації не виявлено (усі $p > 0,05$). Середній вік становив 36,8 ± ± 8,2 та 37,1 ± 8,0 року ($p = 0,855$), а термін до реампутації — 35,6 ± 5,0 та 35,9 ± 5,1 дня ($p = 0,769$) в основній і контрольній групах відповідно. Розподіл за стороною ураження був подібним ($p = 0,840$), як і розподіл за рівнем первинного відчленування ($p = 0,940$). Стандартизовані відмінності були мінімальними для віку ($|SMD| = 0,04$), сторони ураження ($|SMD| = 0,04$) та терміну до реампутації ($|SMD| = 0,06$); для багатокатегоріального рівня первинного відчленування коефіцієнт V Крамера становив 0,04. Це свідчить про добру порівнюваність груп за наведеними вихідними характеристиками, хоча відсутність статистичної значущості сама по собі не є доказом еквівалентності.

У ранньому післяопераційному періоді частота первинного загоєння становила 98,0 % (48/49) в основній групі та 95,9 % (47/49) у контрольній; ранні ускладнення виникли відповідно у 4,1 % (2/49) та 6,1 % (3/49) пацієнтів. За точним критерієм Фішера статистично значущих відмінностей не виявлено (для обох порівнянь $p = 1,000$).

Після завершення раннього післяопераційного періоду та стабілізації стану сформованої кукси оцінювали її анатомічні й антропометричні характеристики. Визначали довжину кукси від колінної суглобової щілини до опилу великогомілкової кістки, загальну довжину кукси, її передньозадній і медіолатеральний розміри, а також рівень резекції малогомілкової кістки. Зазначені показники використовували для характеристики анатомічної порівнюваності досліджуваних груп та оцінки потенційного впливу анатомічних відмінностей на

Таблиця 1. Загальна характеристика пацієнтів

Показник		Основна група, n = 49	Контрольна група, n = 49	p
Вік, роки, M ± SD		36,8 ± 8,2	37,1 ± 8,0	0,855
Чоловіки, n (%)		49 (100,0)	49 (100,0)	–
Сторона ураження, n (%)	Права нижня кінцівка	26 (53,1)	25 (51,0)	0,840
	Ліва нижня кінцівка	23 (46,9)	24 (49,0)	
Рівень первинного травматичного відчленування кінцівки, n (%)	Стопа	32 (65,3)	32 (65,3)	0,940
	Гомілковостопний суглоб	10 (20,4)	11 (22,4)	
	Нижня третина гомілки	7 (14,3)	6 (12,2)	
Терміни до реампутації, дні, M ± SD		35,6 ± 5,0	35,9 ± 5,1	0,769

Примітки: M — середнє арифметичне; SD — стандартне відхилення; n — кількість пацієнтів. Для віку та терміну до реампутації застосовано двобічний t-критерій Велча; для сторони ураження та рівня первинного травматичного відчленування — χ^2-критерій Пірсона. Для статі статистичне порівняння не проводили.

Таблиця 2. Антропометричні характеристики кукси

Показник	Основна група, n = 49	Контрольна група, n = 49	p
Рівень реампутації — середня третина гомілки, n (%)	49 (100,0)	49 (100,0)	–
Довжина кукси від колінної щілини до опилу великогомілкової кістки, см, M ± SD	19,4 ± 1,8	18,9 ± 1,9	0,184
Загальна довжина кукси, см, M ± SD	22,1 ± 2,2	21,7 ± 2,1	0,360
Передньозадній розмір кукси, см, M ± SD	8,7 ± 1,1	8,6 ± 1,1	0,654
Медіолатеральний розмір, см, M ± SD	9,1 ± 1,3	9,0 ± 1,3	0,704
Рівень резекції малогомілкової кістки, см, M ± SD	1,8 ± 0,4	1,9 ± 0,4	0,219

Примітки: M — середнє арифметичне; SD — стандартне відхилення; n — кількість пацієнтів. Для кількісних показників застосовано двобічний t-критерій Велча.



Рисунок 2. Клінічні приклади транстибіальних кукс у різні терміни після реампутації з формуванням косих шкірно-фасціальних клаптів: A–B — на операційному столі; C — ранній післяопераційний період; D–G — віддалені результати

локалізацію післяопераційного рубця і розвиток пізніх локальних ускладнень; їх не розглядали як окрему часову кінцеву точку дослідження.

Статистично значущих відмінностей за антропометричними параметрами кукси між групами не виявлено (усі $p > 0,05$). Величина ефекту також свідчила лише про незначні міжгрупові відмінності. Отримані результати підтверджують загальну анатомічну порівнюваність груп і дозволяють надалі оцінювати вплив методики формування м'якотканинного покриття на результати лікування.

У всіх пацієнтів основної групи після формування косих клаптів післяопераційний рубець розташовувався поза основною зоною протезного навантаження; водночас у всіх 49 випадках він проходив по дистальній поверхні кукси. Ці ознаки не є суперечливими, оскільки перша категорія характеризувала взаємодію рубця з куксоприймачем, а друга — лише його анатомічне положення. У жодного пацієнта основної групи рубець не збігався із зоною клінічно найбільшого локального навантаження або з проєкцією кісткового опилу. У контрольній групі рубець поза основною зоною протезного навантаження визначали у 17 (34,7 %) пацієнтів, у зоні потенційного контакту — у 32 (65,3 %), у зоні клінічно найбільшого локального навантаження — у 18 (36,7 %), а безпосередньо над кістковим опилом — у 13 (26,5 %) пацієнтів (усі $p < 0,001$).

У віддаленому післяопераційному періоді аналізували клінічно значущі рубцево-шкірні та кістково-шкірні ускладнення кукси. До рубцево-шкірних ускладнень відносили болісні або патологічні рубці, фіксацію рубця до підлеглих тканин, хронічне подразнення чи рецидивну травматизацію шкіри, а також виразкування в ділянці рубця. Кістково-шкірні ускладнення включали симптоматичний контакт кісткового опилу з покривними тканинами, локальний тиск на шкіру, загрозу її перфорації та формування виразкового дефекту.

Пізні рубцево-шкірні та/або кістково-шкірні ускладнення загалом виявлено у 4 (8,2 %) пацієнтів основної групи та 15 (30,6 %) пацієнтів контрольної групи. Різниця була статистично значущою ($\chi^2 = 7,90$; $p = 0,005$; V Крамера = 0,28). 95% ДІ частоти ускладнень за методом Вілсона становив 3,2–19,2 % для основної та 19,5–44,5 % — для контрольної групи.

Ізольовані рубцево-шкірні ускладнення спостерігали у 2 (4,1 %) пацієнтів після формування косих клаптів та у 12 (24,5 %) після формування довгого заднього клаптя ($\chi^2 = 8,33$; $p = 0,004$). Ізольовані кістково-шкірні ускладнення виявлено відповідно у 2 (4,1 %) та 1 (2,0 %) пацієнта (точний критерій Фішера, $p = 1,000$). Поєднані рубцево-шкірні та кістково-шкірні ускладнення відзначали лише в контрольній групі — у 2 (4,1 %) пацієнтів; за малого числа подій різниця не була статистично значущою (точний критерій Фішера, $p = 0,495$).

Отже, основний внесок у міжгрупову різницю формували саме рубцево-шкірні ускладнення, тоді як ізольовані кістково-шкірні події були рідкісними. Загальна частота пізніх локальних ускладнень була у 3,75 раза нижчою в групі косих клаптів (8,2 проти 30,6 %). Оскільки окремі категорії ускладнень містили малу

Таблиця 3. Локалізація післяопераційного рубця кукси, n (%)

Локалізація рубця	Основна група, n = 49	Контрольна група, n = 49	p
Поза основною зоною протезного навантаження	49 (100,0)	17 (34,7)	< 0,001
У зоні потенційного контакту з куксоприймачем	0 (0,0)	32 (65,3)	< 0,001
У зоні клінічно найбільшого локального навантаження	0 (0,0)	18 (36,7)	< 0,001
На дистальній поверхні кукси	49 (100,0)	15 (30,6)	< 0,001
Безпосередньо над кістковим опилом	0 (0,0)	13 (26,5)	< 0,001

Примітки: категорії локалізації не є взаємовиключними: в одного пацієнта могли одночасно реєструватися кілька ознак, тому відсотки за рядками не підсумовуються до 100 %. «На дистальній поверхні» — анатомічна характеристика, що не є синонімом зони протезного навантаження. «Зона клінічно найбільшого локального навантаження» визначалася клінічно без інструментального картування тиску. Для кожного бінарного порівняння застосовано двобічний точний критерій Фішера.

Таблиця 4. Пізні рубцево-шкірні та кістково-шкірні ускладнення, n (%)

Характер ускладнення	Основна група, n = 49	Контрольна група, n = 49	p
Ізольовані рубцево-шкірні ускладнення	2 (4,1)	12 (24,5)	0,004
Ізольовані кістково-шкірні ускладнення	2 (4,1)	1 (2,0)	1,000
Поєднані рубцево-шкірні та кістково-шкірні ускладнення	0 (0,0)	2 (4,1)	0,495
Всього	4 (8,2)	15 (30,6)	0,005

Примітки: n — кількість пацієнтів. Для рубцево-шкірних ускладнень і загальної частоти подій застосовано χ^2-критерій Пірсона; для кістково-шкірних і поєднаних ускладнень — двобічний точний критерій Фішера.

Таблиця 5. Пізні ревізійні оперативні втручання (до 1 року спостереження), n (%)

Характер ускладнення	Основна група, n = 49	Контрольна група, n = 49	p
Висічення патологічного рубця	1 (2,0)	1 (2,0)	1,000
М'якотканинна пластика	1 (2,0)	2 (4,1)	1,000
Корекція кісткового опилу або реампутація	0 (0,0)	6 (12,2)	0,027
Всього	2 (4,1)	9 (18,4)	0,025

Примітки: n — кількість пацієнтів. Для загальної частоти ревізій застосовано χ^2-критерій Пірсона; для окремих типів втручань — двобічний точний критерій Фішера.

Таблиця 6. Фактори, включені до багатофакторної логістичної моделі пізніх локальних ускладнень

Фактор	OR	95% ДІ	p
Формування довгого заднього клаптя	4,86	1,45–16,29	0,010
Вік, кожні +10 років	1,12	0,69–1,83	0,643
Термін до реампутації, кожні +10 днів	1,20	0,78–1,84	0,399
Рівень травматичного відчленування кінцівки	1,27	0,43–3,74	0,668

Примітки: OR — відношення шансів; ДІ — довірчий інтервал. Наведено скориговані оцінки стандартної багатофакторної бінарної логістичної регресії. Кодування: методика: 0 — косі клапті, 1 — довгий задній клапоть; вік: на кожні +10 років; термін до реампутації: на кожні +10 днів; рівень первинного відчленування — порядкова змінна: 1 — стопа, 2 — гомілковостопний суглоб, 3 — нижня третина гомілки. Змінні визначено a priori. Багатофакторну регресію Firth із тим самим набором коваріат використано як аналіз чутливості.

кількість подій, їх слід інтерпретувати як вторинні експлораторні кінцеві точки.

Безсимптомні рубцево-шкірні та кістково-шкірні зміни не потребували лікування й не підлягали хірургічній корекції. За наявності симптомів спочатку застосовували консервативне місцеве лікування та протезні заходи за показаннями: корекцію куксоприймача, локальне розвантаження скомпрометованих ділянок кукси та інші зміни протезної конструкції.

Хірургічне лікування виконували лише за наявності стійких клінічно значущих симптомів, якщо протезні рішення були неможливими або не забезпечували належного результату, зокрема не дозволяли повноцінно користуватися протезом. Такий підхід давав змогу уникати необґрунтованих ревізій і оцінювати саме клінічно значущі ускладнення.

Пізні ревізійні оперативні втручання класифікували за рівнем корекції патологічних змін кукси: рівень шкіри — висічення патологічного або симптоматичного рубця; рівень м'яких тканин — м'якотканинна пластика; рівень кістки — корекція кісткового опилу або реампутація.

Пізні ревізійні оперативні втручання виконували у 2 (4,1 %) пацієнтів основної групи та 9 (18,4 %) пацієнтів контрольної групи; різниця була статистично значущою ($\chi^2 = 5,02$; $p = 0,025$; V Крамера = 0,23). 95% ДІ частоти ревізій за методом Вілсона становив 1,1–13,7 та 10,0–31,4 % відповідно.

Висічення патологічного рубця виконували з однаковою частотою — по 1 (2,0 %) пацієнту в кожній групі (точний критерій Фішера, $p = 1,000$). М'якотканинна пластика була потрібна 1 (2,0 %) пацієнту основної та 2 (4,1 %) пацієнтам контрольної групи; через малу кількість подій статистично значущої різниці не виявлено (точний критерій Фішера, $p = 1,000$).

Найбільша відмінність стосувалася втручань на кістковому рівні: в основній групі корекцію кісткового опилу або реампутацію не виконували (0/49), тоді як у контрольній групі такі втручання були необхідні 6 (12,2 %) пацієнтам (точний критерій Фішера, $p = 0,027$). У цій вибірці загальна частота пізніх ревізійних втручань була у 4,49 раза нижчою після формування косих клаптів.

У багатофакторному аналізі застосування довгого заднього клаптя залишалося єдиним статистично значущим фактором, пов'язаним із розвитком пізніх локальних ускладнень (скоригований OR = 4,86; 95% ДІ 1,45–16,29; $p = 0,010$); інші включені до моделі фактори статистично значущими не були (усі $p > 0,05$). З огляду на невелику кількість подій результати багатофакторної моделі слід інтерпретувати з обережністю.

Для основної кінцевої точки абсолютна різниця частот між групами становила 22,45 відсоткового пункту (95% ДІ 6,81–37,22; метод Ньюкомба). Відносний ризик пізнього локального ускладнення у групі косих клаптів порівняно з групою довгого заднього клаптя становив: RR = 0,27 (95% ДІ 0,10–0,75), а OR = 0,20 (95% ДІ 0,06–0,66). Ці показники описують силу асоціації між методикою та результатом і не мають причинної інтерпретації.

Для пізніх ревізійних операцій абсолютна різниця частот між групами становила 14,29 відсоткового пункту (95% ДІ 1,51–27,61). Відносний ризик становив RR = 0,22 (95% ДІ 0,05–0,98), OR = 0,19 (95% ДІ 0,04–0,93). Через невелику кількість ревізійних подій точність цієї оцінки була нижчою.

Сукупність абсолютних і відносних показників свідчила про статистично значущу та потенційно клінічно важливу асоціацію методики формування клаптів з основною кінцевою точкою. Водночас точність оцінок для ревізійних операцій була нижчою через малу кількість подій, а спостережний нерандомізований дизайн не дозволяє трактувати виявлені відмінності як причинний ефект.

Додатковий багатофакторний аналіз чутливості із застосуванням пеналізованої логістичної регресії Firth, до якої включали той самий набір a priori визначених коваріат, підтвердив стійкість напрямку асоціації між методикою формування клаптя та пізніми локальними ускладненнями (OR = 4,54; 95% ДІ 1,55–15,89; $p = 0,005$). З огляду на невелику кількість подій ці результати слід розглядати як підтверджувальний аналіз чутливості, а не як доказ причинного ефекту.

Обговорення

Основним результатом дослідження було одночасне виявлення виражених міжгрупових відмінностей у локалізації післяопераційного рубця та частоті пізніх місцевих ускладнень. Після формування косих клаптів у всіх пацієнтів рубець розташовувався поза основною зоною клінічно визначеного протезного навантаження, тоді як у групі довгого заднього клаптя у 65,3 % він знаходився в зоні потенційного контакту з куксоприймачем, у 36,7 % — у зоні клінічно найбільшого локального навантаження, а у 26,5 % — безпосередньо над кістковим опилом. Ці анатомічні відмінності супроводжувалися нижчою частотою пізніх локальних ускладнень у групі косих клаптів — 8,2 проти 30,6 % протягом першого року спостереження. Водночас через спостережний дизайн і тісний зв'язок між типом клаптя та локалізацією рубця отримані дані не дозволяють окремо кількісно визначити незалежний внесок саме локалізації рубця у ризик ускладнень.

Отримані результати відрізняються від попередніх порівняльних досліджень, виконаних переважно в дисваскулярній популяції. У мультицентровому рандомізованому дослідженні Ruckley et al. первинне загоєння становило 60 % в обох групах, а частота ревізій на тому самому або вищому рівні істотно не відрізнялася між skew flap і long posterior flap [21]. У ретроспективному дослідженні Jesani et al. 242 транстибіальних ампутацій також не виявлено впливу типу клаптя на частоту хірургічної ревізії [22], а огляд Cochrane не підтвердив переваги одного типу розрізу

над іншим у пацієнтів з ішемією або діабетичною інфекцією [23]. На відміну від цих робіт наша когорта складалася з молодих військовослужбовців із високоенергетичною бойовою травмою, яким виконували відстрочену реампутацію після стабілізації ранового процесу. Відмінності в етіології, стані м'яких тканин, віці пацієнтів, функціональних вимогах і протезному навантаженні можуть частково пояснювати відмінність отриманих результатів, однак це припущення потребує перевірки у проспективних дослідженнях.

Отримані дані мають логічне біомеханічне пояснення. Сучасні дослідження інтерфейсу «кукса — куксоприймач» показують, що тиск і сили зсуву розподіляються нерівномірно та суттєво змінюються навіть при невеликих змінах посадки протеза [7]. Водночас дизайн куксоприймача не може повністю усунути локальне навантаження в ділянках кісткових виступів і дистальної частини кукси [6]. Тому винесення рубця з ділянки інтенсивного контакту з куксоприймачем може потенційно зменшувати повторну механічну травматизацію рубцевої тканини. Те, що основний внесок у загальну міжгрупову різницю забезпечували саме рубцево-шкірні ускладнення — 4,1 % після косих клаптів проти 24,5 % після довгого заднього клаптя, узгоджується з цією гіпотезою, але не доводить біомеханічного або причинного механізму.

Такий результат особливо важливий з огляду на сучасні дані про вразливість шкіри кукси. Тривалий контакт із куксоприймачем супроводжується тертям, оклюзією, накопиченням вологи та повторним тиском, що може спричиняти мацерацію, ерозії та виразкування [8, 9]. Додатково Peterson et al. показали, що у 50 % обстежених осіб із транстибіальною ампутацією вздовж післяопераційного рубця була відсутня захисна чутливість [10]. Таким чином, розташування рубця поза зоною найбільшого навантаження потенційно може мати клінічне значення, особливо у пацієнтів зі зниженою здатністю своєчасно відчувати надмірний локальний тиск; однак незалежний профілактичний ефект такого розташування в цьому дослідженні не оцінювався.

Частота пізніх ревізійних операцій у нашому дослідженні також була нижчою після формування косих клаптів — 4,1 проти 18,4 % у контрольній групі. Найбільша відмінність стосувалася втручань на кістковому рівні: корекцію кісткового опилу або повторну реампутацію не виконували в основній групі, тоді як у групі довгого заднього клаптя такі операції знадобилися 12,2 % пацієнтів. Ці дані узгоджуються із сучасними спостереженнями, що посттравматичні ампутації мають значний довготривалий ризик повторних операцій. Milaire et al. повідомили про 27 ревізій у 94 посттравматичних ампутованих кінцівках після 6 місяців, причому 5-річна ймовірність залишитися без ревізійного втручання становила 64 % [16]. Пряме числове порівняння з нашим дослідженням обмежене різною тривалістю спостереження та структурою вибірок, однак обидві роботи підкреслюють клінічну вагу пізньої патології кукси.

Дані Razzouk et al., отримані у пацієнтів із транстибіальними ампутаціями внаслідок воєнної травми, доповнюють цю картину. Серед причин, що унеможливлювали протезування та потребували ревізії кукси, автори описували кісткові розростання, невроми, хронічні виразки, рубцеві контрактури та порушення м'якотканинного балансу. Після корекції кісткових і м'якотканинних проблем протезування стало можливим у всіх пацієнтів цієї ревізійної когорти [17]. Ці спостереження підкреслюють, що технічна якість остаточного формування кукси є не другорядним косметичним етапом, а клінічно важливим компонентом подальшої протезної реабілітації.

Величина міжгрупової різниці була не лише статистично значущою, а й потенційно клінічно важливою: абсолютна різниця частот пізніх локальних ускладнень становила 22,45 відсоткового пункту, а RR = 0,27. Для пізніх ревізійних операцій абсолютна різниця частот становила 14,29 відсоткового пункту. Оскільки дослідження було спостережним і нерандомізованим, ці показники характеризують асоціацію між методом формування кукси та результатами й не можуть інтерпретуватися як прямий причинний лікувальний або профілактичний ефект.

Отримані результати потенційно мають значення і для подальшої якості протезування. У військовослужбовців із бойовими ампутаціями стан шкіри та комфорт користування протезом є важливими компонентами задоволеності пристроєм, а сама задоволеність позитивно асоційована з показниками якості життя [11]. У ширших популяціях осіб із ампутаціями нижніх кінцівок комфорт і функціональність протеза також асоціюються з мобільністю, задоволеністю та якістю життя [12–15]. Для пацієнтів з ампутаціями внаслідок бойових ушкоджень ці питання особливо актуальні, оскільки біль, психологічний стан і якість життя формують взаємопов'язаний комплекс віддалених наслідків травми [18]. У нашому дослідженні ці пацієнт-орієнтовані результати не були основною кінцевою точкою, тому прямого висновку про поліпшення якості життя або задоволеності протезом дійти не можна. Однак зменшення локальних ускладнень і повторних операцій створює обґрунтовану передумову для подальшої перевірки такого ефекту.

Сильними сторонами роботи є однорідність досліджуваної популяції, однаковий рівень транстибіальної реампутації, уніфіковані кістковий, м'язовий та судинно-нервовий етапи операції, а також оцінка величини асоціацій і їхніх 95% ДІ. Водночас дослідження має низку обмежень. Нерандомізований ретроспективний дизайн з історичною контрольною групою створює ризик селекційного та часового змішування (temporal confounding), оскільки між календарними періодами могли змінюватися окремі аспекти періопераційного ведення, реабілітації, протезування, конструкції куксоприймачів, термінів початку протезування та накопичуватися досвід хірургічної коман-

ди. Крім того, не всі потенційні змішувальні фактори, зокрема супутні захворювання, куріння, характеристики первинного ушкодження, інфекційний статус рани, кількість попередніх операцій та особливості протезної реабілітації, були доступні для повного багатофакторного коригування; тому залишкове змішування (residual confounding) виключити неможливо. Ретроспективне отримання даних із медичної документації в обох групах створює ризик інформаційного зміщення через варіабельність повноти та деталізації клінічних записів. Оцінка локалізації рубця та зон контакту/навантаження куксоприймача грунтувалася на задокументованій клінічній оцінці без інструментального картування тиску, стандартизованої шкали рубця та формального засліплення щодо хірургічної методики, тому можливі суб'єктивність і помилка класифікації. При 19 подіях основної кінцевої точки кількість подій на предиктор була невеликою, тому стандартну багатофакторну модель слід трактувати як експлораторну, незважаючи на аналіз чутливості Firth. Порядкове кодування рівня первинного відчленування додатково передбачало лінійний тренд між послідовними категоріями, що є спрощенням. Усі учасники були чоловіками з бойовою травмою, що обмежує зовнішню узагальнюваність. Термін спостереження становив 12 місяців і не охоплював дуже пізні зміни кукси. Комфорт протеза, задоволеність протезуванням, мобільність і якість життя не оцінювалися як стандартизовані кінцеві точки.

Подальші дослідження доцільно проводити у проспективному багатоцентровому дизайні з довшим терміном спостереження та включенням об'єктивного аналізу інтерфейсу «кукса — куксоприймач». Перспективним є поєднання оцінки локалізації рубця з картуванням тиску й сил зсуву, показниками стану шкіри, стандартизованою оцінкою комфорту куксоприймача та валідованими пацієнт-орієнтованими шкалами мобільності й якості життя. Такий підхід дозволить визначити, чи трансформується анатомічна перевага косих клаптів у довготривале поліпшення протезної функції та якості життя.

Таким чином, у цій когорті конфігурація шкірно-фасціальних клаптів була асоційована як із локалізацією післяопераційного рубця, так і з частотою пізніх локальних ускладнень після відстроченої транстибіальної реампутації. У групі косих клаптів рубець частіше розташовувався поза основними зонами клінічно визначеного протезного навантаження та спостерігалася нижча частота рубцево-шкірних ускладнень і ревізійних втручань. Водночас дослідження не дає змоги відокремити незалежний ефект локалізації рубця від ефекту самої хірургічної методики та інших відмінностей між календарними періодами. Отримані результати підтримують подальше проспективне дослідження локалізації післяопераційного рубця як потенційно важливого чинника функціональної придатності транстибіальної кукси, але не доводять причинного профілактичного ефекту косих клаптів.

Висновки

У групі косих шкірно-фасціальних клаптів спостерігалася більш сприятлива локалізація післяопераційного рубця: у всіх пацієнтів він розташовувався поза основною зоною клінічно визначеного протезного навантаження, тоді як у групі довгого заднього клаптя у 65,3 % випадків рубець знаходився в зоні потенційного контакту з куксоприймачем.

Формування косих клаптів було асоційоване з нижчою частотою пізніх локальних рубцево-шкірних та/або кістково-шкірних ускладнень — 8,2 проти 30,6 % у групі довгого заднього клаптя ($p = 0,005$); абсолютна різниця частот становила 22,45 відсоткового пункту, $RR = 0,27$.

Частота пізніх ревізійних оперативних втручань також була нижчою в групі косих клаптів — 4,1 проти 18,4 % ($p = 0,025$). Найбільш виражена міжгрупова різниця стосувалася втручань на кістковому рівні: 0 проти 12,2 %.

У багатофакторному аналізі довгий задній клапоть був асоційований із вищими шансами пізніх локальних ускладнень (скоригований OR = 4,86; 95% ДІ 1,45–16,29; $p = 0,010$); багатофакторний аналіз чутливості Firth підтвердив напрямок цієї асоціації. Через ретроспективний нерандомізований дизайн з історичною контрольною групою та можливість залишкового часового змішування отримані результати не слід трактувати як доказ причинного профілактичного ефекту.

Отримані дані обґрунтовують подальше проспективне багатоцентрове вивчення косих шкірно-фасціальних клаптів із стандартизованою незалежною оцінкою рубця та інструментальним аналізом інтерфейсу «кукса — куксоприймач».

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

Інформація про фінансування. Автори заявляють про відсутність сторонньої фінансової підтримки даного дослідження.

Внесок авторів. Кіх А.Ю. — організація клінічної бази, керівництво, критичне редагування; Ярмолюк Ю.О. — експертна військово-травматологічна складова; Бур'янов О.А. — методологія, інтерпретація результатів; Смик О.О. — збір клінічних даних, аналіз та інтерпретація даних, підготовка первинного тексту.

Список літератури

1. Garcia-Canas R, Navarro-Suay R. Combat-related orthopedic trauma in the Russo-Ukrainian War: A systematic review. J Spec Oper Med. 2026;26(1):22. doi: 10.55460/J.Spec.Oper.Med.2026.7V8D-PA9N.

2. Vogt D, Hackl S, Tjardes T, et al. Amputation versus limb salvage after gunshot wounds and combat injuries: Considerations for an integrative concept of surgical care and rehabilitation therapy. Injury. 2025;56(Suppl 1):112535. doi: 10.1016/j.injury.2025.112535.

3. Rigal S, Milaire A, Mathieu L, et al. Post-traumatic lower-limb amputation: Indications, techniques and results.

Orthop Traumatol Surg Res. 2026;112(1 Suppl):104389. doi: 10.1016/j.otsr.2025.104389.

4. Hooper RC, Kelly B, Cederna PS, et al. Amputation surgery: Review of new and emerging techniques. Phys Med Rehabil Clin N Am. 2024;35(4):725-737. doi: 10.1016/j.pmr.2024.06.001.

5. Blair JA, Puneky GA, Dickerson TE, et al. Posttraumatic soft tissue coverage of the lower leg for the orthopedic surgeon. Orthop Clin North Am. 2022;53(3):297-310. doi: 10.1016/j.ocl.2022.03.002.

6. Wang M, Nong Q, Liu Y, et al. Design of lower limb prosthetic sockets: A review. Expert Rev Med Devices. 2022;19(1):63-73. doi: 10.1080/17434440.2022.2020094.

7. Devin KM, Tang J, Moser D, et al. Assessing socket fit effects on pressure and shear at a transtibial residuum/socket interface. Appl Bionics Biomech. 2023;2023:3257059. doi: 10.1155/2023/3257059.

8. Aflatooni S, Beekman K, Hennessy K, et al. Dermatologic conditions following limb loss. Phys Med Rehabil Clin N Am. 2024;35(4):739-755. doi: 10.1016/j.pmr.2024.06.002.

9. Knight AD, Hendershot BD, Sleeman TJ, et al. Toward improving residual limb climate within prostheses for persons with lower limb loss: A technical note. Prosthet Orthot Int. 2022;46(2):202-205. doi: 10.1097/PXR.0000000000000085.

10. Peterson S, Lee CD, Miknevich MA, et al. Monofilament testing to identify insensate regions of the residual limb of individuals with transtibial amputation. Prosthet Orthot Int. 2026;50(1):89-94. doi: 10.1097/PXR.0000000000000442.

11. Eskridge SL, Dougherty AL, Watrous JR, et al. Prosthesis satisfaction and quality of life in US service members with combat-related major lower-limb amputation. Prosthet Orthot Int. 2022;46(1):68-74. doi: 10.1097/PXR.0000000000000054.

12. DadeMatthews OO, Roper JA, Vazquez A, et al. Prosthetic device and service satisfaction, quality of life, and functional performance in lower limb prosthesis clients. Prosthet Orthot Int. 2024;48(4):422-430. doi: 10.1097/PXR.0000000000000285.

13. Webster JB, Borgia M, Resnik L. Prosthesis nonuse and discontinuation in United States veterans with major limb amputation: Results of a national survey. Prosthet Orthot Int. 2023;47(6):575-585. doi: 10.1097/PXR.0000000000000248.

14. Alavi T, Jalali M, Farahmand B, et al. Predictors of quality of life in individuals with non-traumatic unilateral transtibial amputation. PLoS One. 2025;20(7):e0327781. doi: 10.1371/journal.pone.0327781.

15. Norvell DC, Henderson AW, Morgenroth DC, et al. The effect of prosthetic limb sophistication and amputation level on self-reported mobility and satisfaction with mobility. Arch Phys Med Rehabil. 2024;105(7):1338-1345. doi: 10.1016/j.apmr.2024.03.012.

16. Milaire A, Grosset A, Rigal S, et al. What are the factors associated with revision surgery on the residual limb and functional results in patients with posttraumatic lower limb amputations? Clin Orthop Relat Res. 2025;483(3):501-510. doi: 10.1097/CORR.0000000000003251.

17. Razzouk Q, Chachati S, Alloush H. Surgical revision for transtibial stump problems following war traumatic amputations: A 2016-2020 cohort from Aleppo, Syria. BMC Surg. 2026;26:215. doi: 10.1186/s12893-026-03603-x.

18. Smolynets R, Barroso J, Pasquina PF, et al. The association between quality of life, anxiety and depression, and residual limb and phantom limb pain in war-related amputees: A year-long observational study. eClinicalMedicine. 2026;95:103891. doi: 10.1016/j.eclinm.2026.103891.

19. von Elm E, Altman DG, Egger M, et al. The Strengthening the Reporting of Observational Studies in Epidemiology (STROBE) statement: guidelines for reporting observational studies. PLoS Med. 2007;4(10):e296. doi: 10.1371/journal.pmed.0040296.

20. Heinze G, Schemper M. A solution to the problem of separation in logistic regression. Stat Med. 2002;21(16):2409-2419. doi: 10.1002/sim.1047.

21. Ruckley CV, Stonebridge PA, Prescott RJ. Skewflap versus long posterior flap in below-knee amputations: multicenter trial. J Vasc Surg. 1991;13(3):423-427. doi: 10.1067/mva.1991.25644.

22. Jesani L, Gwilym B, Germain S, et al. Early and Long Term Outcomes Following Long Posterior Flap vs. Skew Flap for Below Knee Amputations. Eur J Vasc Endovasc Surg. 2020;60(2):301-308. doi: 10.1016/j.ejvs.2020.03.049.

23. Tisi PV, Than MM. Type of incision for below knee amputation. Cochrane Database Syst Rev. 2014;2014(4):CD003749. doi: 10.1002/14651858.CD003749.pub3.

Отримано/Received 04.08.2026
Рецензовано/Revised 10.09.2026
Прийнято до друку/Accepted 23.09.2026

Information about authors

Andrii Kikh, PhD, Associate Professor, Colonel of the Medical Service, Head of the Military Medical Clinical Treatment and Rehabilitation Center, Irpin, Ukraine; e-mail: kikh76@ukr.net; phone: +380 (97) 594-42-77; https://orcid.org/0000-0003-1746-7996

Yurii Yarmoliuk, MD, DSc, PhD, Professor, Colonel of the Medical Service, Chief Traumatologist of the Ukraine Armed Forces, Head of the Injury Clinic, National Military Medical Clinical Center "Main Military Clinical Hospital", Kyiv, Ukraine; e-mail: yuo1707@gmail.com; phone: +380 (67) 791-69-28; Department of Traumatology and Orthopedics, Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine; https://orcid.org/0000-0003-1971-9683

Oleh Smyk, Major of the Medical Service, Senior resident of the Trauma Department, Military Medical Clinical Treatment and Rehabilitation Center, Irpin, Ukraine; e-mail: oleg_olegovi4@ukr.net; phone: +380 (98) 999-53-30; https://orcid.org/0009-0003-3412-5557

Olexandr Burianov, MD, DSc, PhD, Professor, Department of Traumatology and Orthopedics, Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine; e-mail: kaftraum@ukr.net; phone: +380 (67) 796-68-76; https://orcid.org/0000-0002-2174-1882

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 authors declared that this study has received no financial support.

Authors' contribution. A.Yu. Kikh — organization of the clinical site, supervision, critical revision; Yu.O. Yarmoliuk — expert military and trauma component; O.A. Burianov — methodology, interpretation of results; O.O. Smyk — clinical data collection, data analysis and interpretation, preparation of the initial draft.

A.Yu. Kikh[1], Yu.O. Yarmoliuk[2, 3], O.O. Smyk[1], O.A. Burianov[3]
[1]Military Medical Clinical Treatment and Rehabilitation Center, Irpin, Ukraine
[2]National Military Medical Clinical Center "Main Military Clinical Hospital", Kyiv, Ukraine
[3]Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine

Transtibial reamputation after combat trauma: comparison of skew flaps and a long posterior flap when forming a residual limb

Abstract. ***Background.*** Formation of a functionally suitable transtibial residual limb after combat-related trauma is an important prerequisite for effective prosthetic fitting and subsequent rehabilitation. The location of the postoperative scar and the quality of soft-tissue coverage may determine the risk of late local complications, the need for revision surgery, prosthetic effectiveness and comfort, and, consequently, may affect patients' functional activity and quality of life. ***Materials and methods.*** A single-center retrospective comparative cohort study with a historical control group included 98 patients. The control group comprised 49 consecutively included individuals who were operated before the introduction of the skew-flap technique in March 2024; the study group consisted of 49 consecutively included patients operated on after its implementation. Medical records and routine postoperative follow-up data over 12 months were analyzed retrospectively. The primary endpoint was the incidence of clinically significant late local complications, and the secondary endpoint was the rate of revision procedures. Multivariable analysis was performed using logistic regression, with additional assessment of robustness of the estimates using Firth penalized logistic regression. ***Results.*** The incidence of late local complications was 8.2 % in the skew-flap group and 30.6 % in the long posterior flap group ($p = 0.005$); the absolute risk difference was 22.45 percentage points, with risk ratio of 0.27 (95% confidence interval (CI) 0.10–0.75). Late revision procedures were performed in 4.1 and 18.4 % of patients, respectively ($p = 0.025$). In the multivariable model, use of a long posterior flap was associated with higher odds of late local complications (adjusted odds ratio (OR) = 4.86; 95% CI 1.45–16.29; $p = 0.010$); multivariable Firth analysis confirmed the direction of this association (OR = 4.54; 95% CI 1.55–15.89; $p = 0.005$). ***Conclusions.*** Within this non-randomized retrospective study, formation of skew fasciocutaneous flaps was associated with a more favorable location of the postoperative scar, a lower incidence of late local complications, and a lower rate of revision surgeries compared with the use of a long posterior flap.

Keywords: reamputation; skew flaps; residual limb; postoperative scar; reconstructive surgery; combat-related trauma

УДК 616.71-006-033.2:616.71-001.5-089.84 *DOI: https://doi.org/10.22141/1608-1706.5.27.2026.1123*

Проценко В.В.[1], Волков В.О.[2], Соболевський Ю.Л.[2], Кухарук А.С.[2]
[1]Національний науковий центр радіаційної медицини, гематології та онкології, м. Київ, Україна
[2]Національний медичний університет ім. О.О. Богомольця, м. Київ, Україна

Результати застосування методик остеосинтезу в комплексному лікуванні пацієнтів з метастатичними пухлинами довгих трубчастих кісток кінцівок

Резюме. ***Актуальність.*** *За оцінками деяких дослідників, метастази в кістках можуть уражати до 70 % онкологічних пацієнтів, 20 % з яких можуть потребувати хірургічного втручання. Метастази в кістках викликають біль, патологічні переломи, стиснення спинного мозку або нервових корінців та гіперкальціємію, що загрожує життю, і можуть потребувати хірургічного втручання, променевої терапії або медикаментозного лікування. Принципи лікування метастатичного захворювання кісток у першу чергу залежать від типу первинної пухлини та ураженого органу. Якщо існує ризик переломів або відбулися патологічні переломи кісток, необхідна стабілізація кістки або реконструкція суглоба з видаленням ураженої кістки та оточуючих тканин. Хірургічне лікування метастатичних уражень скелета проводиться з використанням або ендопротезування, або остеосинтезу. У цій статті порівнюються результати методик інтрамедулярного, екстрамедулярного, армованого остеосинтезу та черезкісткового позавогнищевого остеосинтезу довгих трубчастих кісток при метастатичних пухлинах з метою визначення клінічних ситуацій, у яких остеосинтез вважається найкращим методом стабілізації кістки.* ***Мета:*** *порівняння результатів лікування пацієнтів з метастатичними пухлинами кісток при застосуванні металоостеосинтезу інтрамедулярними стрижнями, екстрамедулярними пластинами та армованого металоостеосинтезу в схемах комплексного лікування з результатами лікування при застосуванні черезкісткового позавогнищевого остеосинтезу в схемах комплексного лікування на відновлення функції кінцівки, зменшення больового синдрому та поліпшення якості життя хворих у віддалені строки лікування.* ***Матеріали та методи.*** *Проаналізовано результати хірургічного лікування пацієнтів (n = 32, 14 чоловіків та 18 жінок, за період 2017–2025 рр.) з метастатичними пухлинами довгих трубчастих кісток, яким застосовані різні методики остеосинтезу. Групу дослідження становили 15 пацієнтів, яким проводилося комплексне лікування метастатичних пухлин довгих трубчастих кісток кінцівок із застосуванням хірургічного лікування: виконувався металоостеосинтез інтрамедулярними стрижнями, екстрамедулярними пластинами, а також армований металоостеосинтез із застосуванням кісткового цементу. Групу порівняння становили 17 пацієнтів, яким проводилося комплексне лікування метастатичних пухлин довгих трубчастих кісток кінцівок із застосуванням хірургічного лікування: виконувався черезкістковий позавогнищевий металоостеосинтез стрижневими апаратами зовнішньої фіксації. В обох групах пацієнтів визначався функціональний результат прооперованої кінцівки за шкалою MSTS (Musculoskeletal Tumor Society staging system). Оцінка болю в місці метастатичного ураження до та після лікування проводилась згідно з опитуванням за шкалою R.G. Watkins. Оцінку якості життя хворих, яким виконане хірургічне лікування, проводили згідно з опитуванням за системою EORTC QLQ-C30 (шкала від 0 до 4 балів). Виживаність пацієнтів визначали за методом Каплана — Мейєра.* ***Результати.*** *У результаті лікування 15 пацієнтів групи дослідження з метастатичними пухлинами кісток із застосуванням металоостеосинтезу інтрамедулярними стрижнями, екстрамедулярними пластинами, а також армованого металоостеосинтезу з кістковим цементом післяопераційні ускладнення спостерігалися у 2 (13,3 %) хворих, рецидиви метастатичної пухлини спостерігалися у 2 (13,3 %) пацієнтів. У*

© «Травма» / «Trauma» («Travma»), 2026
© Видавець Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2026

Для кореспонденції: Проценко Володимир Вікторович, д-р мед. наук, професор, завідувач відділу захворювань, пошкоджень та пухлин опорно-рухового апарату, Національний науковий центр радіаційної медицини, гематології та онкології, вул. Ю. Іллєнка, 53, Київ, 04050, Україна; e-mail: ip15@ukr.net; тел.:+380 (50) 380-37-81
For correspondence: Volodymyr V. Protsenko, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Diseases, Injuries and Musculoskeletal System, National Scientific Center of Radiation Medicine, 53, Y. Illenko st., Kyiv, 04050, Ukraine; e-mail: ip15@ukr.net; phone: +380 (50) 380-37-81
Full list of authors information is available at the end of the article.

результаті лікування 17 пацієнтів групи порівняння з метастатичними пухлинами кісток із застосуванням черезкісткового позавогнищевого остеосинтезу апаратами зовнішньої фіксації післяопераційні ускладнення спостерігалися у 3 (17,6 %) хворих, рецидиви метастатичної пухлини спостерігалися у 3 (17,6 %) пацієнтів. Функціональний результат прооперованої кінцівки (за шкалою MSTS) у групі дослідження (n = 15) становив від 72,3 до 85,8 %. Функціональний результат прооперованої кінцівки в групі порівняння (n = 17) становив від 65,4 до 72,9 % (p < 0,05). У післяопераційному періоді у хворих дослідної групи (за шкалою R.G. Watkins) больовий синдром зменшився з 93,4 до 26,6 %, у хворих у групі порівняння больовий синдром зменшився з 88,2 до 52,9 % (p > 0,05). Якість життя хворих у групі дослідження (n = 15) в післяопераційному періоді поліпшилася з 28 до 82 балів. Якість життя хворих у групі порівняння (n = 17) в післяопераційному періоді поліпшилася з 26 до 68 балів (p > 0,05). Трирічна загальна виживаність пацієнтів у групі дослідження (n = 15) становила 48,8 ± ± 14,6 %, у групі порівняння (n = 17) — 26,6 ± 11,3 % (p < 0,05). ***Висновки.*** *1. Використання методик остеосинтезу при метастатичних пухлинах довгих трубчастих кісток дозволило відновити функцію та опороспроможність кінцівки у 93,8 % випадків. 2. Проведення хірургічного лікування з використанням методик остеосинтезу при метастатичних пухлинах довгих трубчастих кісток дозволило зменшити больовий синдром, відновити функцію кінцівки та поліпшити якість життя хворих, а також проводити додаткову специфічну терапію. 3. На підставі аналізу анатомо-функціональних результатів кінцівки доведена виправданість паліативного хірургічного лікування, а саме використання різних методик металоостеосинтезу при патологічних переломах довгих кісток кінцівок.*

Ключові слова: *метастатичні пухлини кісток; інтрамедулярний металоостеосинтез; екстрамедулярний металоостеосинтез; армований металоостеосинтез; черезкістковий позавогнищевий металоостеосинтез*

Вступ

Рак є однією з провідних причин інвалідності у всьому світі [1]. Відмінною рисою раку є його здатність до поширення, причому кісткова тканина є одним з найчастіших місць ураження [2]. За оцінками деяких дослідників, метастази в кістках можуть уражати до 70 % онкологічних пацієнтів, 20 % з яких можуть потребувати хірургічного втручання [3, 12]. Дані літератури показали, що у деяких пацієнтів з раком молочної залози (36 %), раком легень (16 %) та раком кишечника (12 %) метастази в кістках були діагностовані ще під час початкового обстеження та лікування [4]. Метастази в кістках викликають біль, патологічні переломи, стиснення спинного мозку або нервових корінців та гіперкальціємію, що загрожує життю, і можуть потребувати хірургічного втручання, променевої терапії або медикаментозного лікування [3]. Принципи лікування метастатичного захворювання кісток у першу чергу залежать від типу первинної пухлини та ураженого органа. Якщо існує ризик перелому або відбулися патологічні переломи кісток, необхідна стабілізація кістки або реконструкція суглоба з видаленням ураженої кістки та оточуючих тканин [5]. Частота патологічних переломів довгих кісток унаслідок метастазів у кістки становить від 10 до 29 % [6]. Хірургічне лікування метастатичних уражень скелета проводиться з використанням або ендопротезування, або остеосинтезу. Очевидною перевагою ендопротезування є радикальне видалення метастазу з одночасним відновленням опороспроможності та функції кінцівки. Ендопротезування має деякі недоліки, як-от травматичний характер операції (резекція суглобової кістки призводить до великої крововтрати, м'язи відрізаються та фіксуються за допомогою швів до ендопротеза) [7]. Резекція en bloc та ендопротезні реконструкції можуть бути розглянуті при метастазах у проксимальні та дистальні відділи стегнової кістки, а також у проксимальний відділ плечової кістки, особливо у випадках, які стосуються ураження метаепіфіза [8, 9]. Інтрамедулярні штифти можуть бути використані при очікуваних переломах або патологічних переломах діафіза кістки. Як правило, використання інтрамедулярного остеосинтезу має низку переваг: введення інтрамедулярного штифта є закритим, що значно зменшує хірургічну травму та крововтрату [7]. Однак повне відновлення опороспроможності кінцівки в цьому випадку значною мірою залежить від консолідації зони перелому — якщо консолідації не відбувається, перелом або міграція штифта є частим ускладненням [10]. Крім того, використання інтрамедулярного штифта для фіксації патологічного перелому внаслідок метастазу, як правило, не передбачає видалення вогнища пухлини. Якщо є великий дефект кістки, може бути застосовано інтрамедулярне встановлення штифтів з кюретажем кісткового метастазу та пломбуванням дефекту кістки кістковим цементом [8, 9]. Перевагою пластинчастого екстрамедулярного остеосинтезу є можливість виконати кюретаж метастазу та адекватно співставити кісткові фрагменти під візуальним контролем. До недоліків цього методу належать більший обсяг та тривалість хірургічного втручання, менша надійність фіксації всієї кістки [11]. Метод черезкісткового остеосинтезу при патологічному переломі кісток кінцівок може бути використаний для стабільної фіксації та усунення деформації, дозволяє хворим самостійно обслуговувати себе і найчастіше на сьогодні є методом вибору [12]. Наявність апарата для черезкісткового остеосинтезу не є протипоказанням для проведення променевої та хіміотерапії. У низці випадків, коли досягається консолідація перелому на тлі спеціального лікування, черезкістковий остеосинтез може розглядатися як самостійний метод лікування. Коли консолідація патологічного перелому проблематична або є солітарне ураження, черезкістковий остеосинтез дозволяє провести протипухлинне лікування в комфортних для хворого умовах і

на другому етапі виконати органозберігаючу операцію (ендопротезування, алопластика, автопластика) [13]. При загрозі патологічного перелому метод позавогнищевого остеосинтезу дозволяє уникнути цього ускладнення та при позитивній динаміці лікування зберегти функцію та опороспроможність кінцівки. У цій статті порівнюються результати застосування методик інтрамедулярного металоостеосинтезу, екстрамедулярного металоостеосинтезу, армованого металоостеосинтезу та черезкісткового позавогнищевого остеосинтезу стрижневими апаратами зовнішньої фіксації при метастатичних пухлинах довгих трубчастих кісток з метою визначення клінічних ситуацій, у яких остеосинтез вважається найкращим методом стабілізації кістки.

Мета дослідження: порівняння результатів лікування пацієнтів з метастатичними пухлинами кісток при застосуванні металоостеосинтезу інтрамедулярними стрижнями, екстрамедулярними пластинами та армованого металоостеосинтезу в схемах комплексного лікування з результатами лікування при застосуванні черезкісткового позавогнищевого остеосинтезу в схемах комплексного лікування щодо відновлення функції кінцівки, зменшення больового синдрому та поліпшення якості життя хворих у віддалені строки лікування.

Матеріали та методи

Проаналізовано результати хірургічного лікування пацієнтів (n = 32, 14 чоловіків та 18 жінок, за період 2017–2025 рр.) з метастатичними пухлинами довгих трубчастих кісток, яким застосовані різні методики остеосинтезу. Середній вік пацієнтів становив 58 років. Всього було проведено 32 операції, 17 — через патологічні переломи кісток, 15 — через загрозу патологічного перелому кісток. У табл. 1 наведені морфологічні форми пухлин, які спостерігалися у пацієнтів з метастазами довгих трубчастих кісток

У табл. 2 наведені методики хірургічних втручань, які були застосовані у пацієнтів з метастатичними пухлинами довгих трубчастих кісток.

Групу дослідження становили 15 пацієнтів, яким проводилося комплексне лікування метастатичних пухлин довгих трубчастих кісток кінцівок із застосуванням хірургічного лікування: виконувався металоостеосинтез інтрамедулярними стрижнями, екстрамедулярними пластинами, а також армований металоостеосинтез із застосуванням кісткового цементу. Групу порівняння становили 17 пацієнтів, яким проводилося комплексне лікування метастатичних пухлин довгих трубчастих кісток кінцівок із застосуванням хірургічного лікування: виконувався черезкіст-

Таблиця 1. Морфологічні форми пухлин

Морфологічна форма пухлини	Стать		Усього, абс. (%)
	Чоловіки	Жінки	
Рак молочної залози	–	12	12 (37,5)
Рак нирки	5	3	8 (25,0)
Рак легень	3	1	4 (12,5)
Множинна мієлома	3	1	4 (12,5)
Рак передміхурової залози	2	–	2 (6,3)
Рак товстої кишки	1	–	1 (3,1)
Рак щитоподібної залози	–	1	1 (3,1)
Усього	14	18	32 (100,0)

Таблиця 2. Методики хірургічних втручань

Локалізація пухлини	Методика хірургічного втручання			Усього, абс. (%)
	Остеосинтез стрижнями, пластинами	Армований остеосинтез	Остеосинтез апаратами зовнішньої фіксації	
Верхня третина стегнової кістки	3	–	–	3 (9,4)
Діафіз стегнової кістки	–	1	5	6 (18,7)
Нижня третина стегнової кістки	–	–	2	2 (6,3)
Верхня третина плечової кістки	3	–	–	3 (9,4)
Діафіз плечової кістки	–	3	8	11 (34,3)
Верхня третина великогомілкової кістки	2	–	–	2 (6,3)
Діафіз великогомілкової кістки	2	1	2	5 (15,6)
Усього	10	5	17	32 (100,0)

ковий позавогнищевий металоостеосинтез стрижневими апаратами зовнішньої фіксації.

У наших спостереженнях медіана часу появи метастазів у кістках після виявлення первинної пухлини становила 18 місяців (діапазон 4–75 місяців). У 12 випадках метастази в кістках поєднувалися з вісцеральними метастазами. Поодиноке ураження кісток скелета спостерігалося у 20 пацієнтів, множинне — у 12. У 12 із 32 випадків патологічний перелом розвинувся на тлі консервативного лікування, а в решті випадків це був перший прояв пухлинного процесу або перший прояв прогресування захворювання.

На етапах лікування у 32 хворих із солідними пухлинами з метастатичним ураженням кісток ми застосовували комплексне лікування, яке включало хіміотерапію, імунотерапію, гормонотерапію, променеву терапію, бісфосфонати та радіонукліди, а також хірургічне лікування. Комплексне лікування в передопераційному та післяопераційному періоді залежало від морфологічної форми первинної злоякісної пухлини, поширеності пухлини та загального стану пацієнта. Хіміотерапію проводили за 2–3 тижні до операції, щоб дати змогу відновитися як самому хворому, так і його показникам крові. Дозу глюкокортикоїдів зменшували або поступово відміняли препарат перед операцією, щоб оптимізувати загоєння рани. Після операції хіміотерапію та глюкокортикоїди призначали приблизно через два тижні після загоєння післяопераційної рани. Імунотерапію проводили як в передопераційному періоді, так і продовжували в післяопераційному періоді. Променеву терапію призначали як до, так і після хірургічних втручань. Передопераційне опромінення зазвичай застосовували у випадках, коли передбачалося зменшення розміру метастатичної пухлини та зниження кровотечі під час операції. Післяопераційне опромінення призначали у випадках нерадикального або неабластичного видалення пухлини та, як правило, починали через 2–4 тижні після операції, щоб забезпечити загоєння післяопераційної рани. У випадках застосування черезкісткового позавогнищевого металоостеосинтезу стрижневими апаратами зовнішньої фіксації променеву терапію призначали на вогнище ураження як проміжний етап лікування з наступним виконанням армованого металоостеосинтезу або ендопротезування. Променева терапія при метастазах у кістки була проведена 15 (46,9 %) пацієнтам до операції та 17 (53,1 %) пацієнтам після черезкісткового позавогнищевого остеосинтезу в післяопераційному періоді. Бісфосфонати, що пригнічують остеокластичну резорбцію кісток, були ще одним допоміжним засобом для лікування кісткових метастазів. Введення бісфосфонатів зазвичай починали через 2 тижні після операції та призначали їх довгостроково. Деякі гіперваскулярні метастатичні пухлини, як-от рак нирок та щитоподібної залози, потребували передопераційної емболізації. Метою емболізації була деваскуляризація пухлини перед хірургічною резекцією, що допомагало зменшити інтраопераційну крововтрату та потребу в переливанні крові й кровозамінників.

Застосування армованого металоостеосинтезу базується на факторах, що забезпечують клінічний ефект армованого металоостеосинтезу: консолідація кістки та внаслідок цього забезпечення опороспроможності та функції кінцівки; термічне руйнування больових рецепторів періосту кістки та внаслідок цього усунення больового синдрому. Додатковими факторами армованого металоостеосинтезу, які впливають на клінічний ефект лікування хворих, є: хімічна цитотоксична дія на тканину пухлини (за рахунок токсичності мономеру кісткового цементу); термічний цитотоксичний вплив (термокоагуляція) на пухлинну тканину (за рахунок екзотермічної реакції композиційних матеріалів); ішемічний вплив на тканину пухлини; порушення кровопостачання пухлини. Армований металоостеосинтез був застосований нами у 5 пацієнтів з метастатичними пухлинами кісток.

Функціональний результат прооперованої кінцівки розраховувався за шкалою MSTS (Musculoskeletal Tumor Society staging system). Оцінка болю в місці метастатичного ураження до та після лікування проводилась згідно з опитуванням за шкалою R.G. Watkins. Оцінку якості життя хворих, яким виконане хірургічне лікування, проводили згідно з опитуванням за системою EORTC QLQ-C30 (шкала від 0 до 4 балів). Виживаність пацієнтів визначали за методом Каплана — Мейєра.

Отримані результати

У результаті лікування 15 пацієнтів групи дослідження з метастатичними пухлинами кісток із застосуванням металоостеосинтезу інтрамедулярними стрижнями, екстрамедулярними пластинами, а також армованого металоостеосинтезу з кістковим цементом післяопераційні ускладнення спостерігалися у 2 (13,3 %) хворих (2 випадки переломів екстрамедулярної пластини), рецидиви метастатичної пухлини спостерігалися у 2 (13,3 %) пацієнтів (при раку нирки та раку молочної залози), у першому випадку виконано видалення рецидиву пухлини та проведено променеву терапію в післяопераційному періоді на зону розташування видаленої пухлини, у другому випадку виконано екзартикуляцію кінцівки. У результаті лікування 17 пацієнтів групи порівняння з метастатичними пухлинами кісток із застосуванням черезкісткового позавогнищевого остеосинтезу апаратами зовнішньої фіксації післяопераційні ускладнення спостерігалися у 3 (17,6 %) хворих (3 випадки розхитування стрижнів та нагноєння м'яких тканин навколо стрижнів, що потребувало заміни або видалення апарата та накладання гіпсової пов'язки для продовження променевої терапії), рецидиви метастатичної пухлини спостерігалися у 3 (17,6 %) пацієнтів після променевої терапії та хіміотерапії (при раку нирки, раку молочної залози та раку легені). У першому випадку виконано сегментарну резекцію діафіза кістки з рецидивом пухлини та сегментарне ендопротезування кістки, у другому випадку виконано видалення рецидиву пухлини та застосований армований металоостеосинтез з використанням екс-

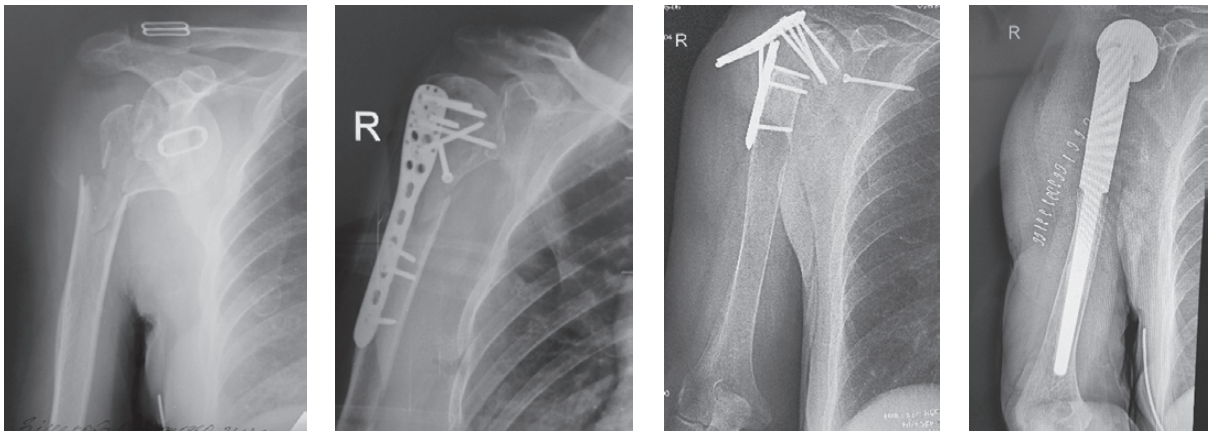


Рисунок 1. Фотовідбитки рентгенограми хворої З.: а — мієломна хвороба, патологічний перелом плечової кістки; б — стан після металоостеосинтезу патологічного перелому плечової кістки пластиною; в — перелом металевої пластини; г — стан після резекції проксимального відділу плечової кістки з пухлиною та ендопротезування плечового суглоба індивідуальним онкологічним ендопротезом

трамедулярної пластини, у третьому випадку виконано ампутацію кінцівки.

Наводимо приклади з практики. Хвора З., 67 років, надійшла у відділення з патологічним переломом проксимального відділу правої плечової кістки, у відділенні пацієнтці виконано металоостеосинтез перелому плечової кістки екстрамедулярною пластиною та трепан-біопсію місця перелому плечової кістки, патогістологічний висновок: мієлома. Хвора отримала курси поліхіміотерапії та курс променевої терапії на кістку до сумарної вогнищевої дози 40 грей. Через 6 місяців на рентгенівському знімку відмічено руйнування металевої пластини, у зв'язку з чим пацієнтці виконано резекцію проксимального відділу плечової кістки з пухлиною та ендопротезування плечового суглоба індивідуальним онкологічним ендопротезом. На рис. 1 наведені фотовідбитки рентгенограми хворої З.: на рис. 1а — мієломна хвороба, патологічний перелом плечової кістки, рис. 1б — стан після металоостеосинтезу патологічного перелому плечової кістки пластиною, рис. 1в — перелом металевої пластини, рис. 1г— стан після резекції проксимального відділу плечової кістки з пухлиною та ендопротезування плечового суглоба індивідуальним онкологічним ендопротезом.

Хвора М., 68 років, надійшла у відділення з патологічним переломом діафіза правої плечової кістки, у відділенні пацієнтці виконано остеосинтез перелому стрижневим апаратом зовнішньої фіксації та трепан-біопсію місця перелому плечової кістки, патогістологічний висновок: метастаз залозистого раку легені. Хвора отримала курс променевої терапії на кістку до сумарної вогнищевої дози 40 грей. Через 1 місяць після курсу променевої терапії пацієнтці виконано резекцію діафіза плечової кістки з пухлиною та ендопротезування плечової кістки сегментарним індивідуальним онкологічним імплантом. У післяопераційному періоді

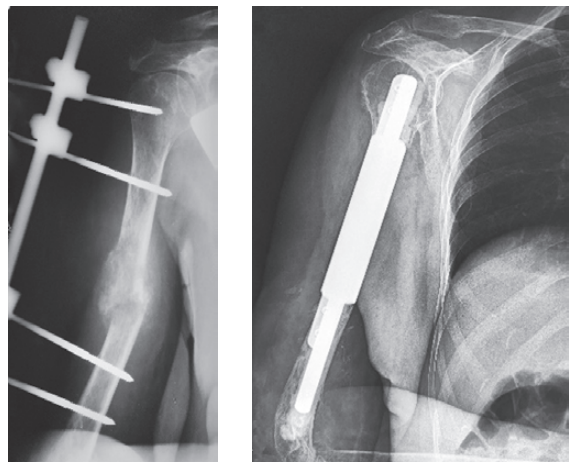


Рисунок 2. Фотовідбитки рентгенограми хворої М.: а — метастаз раку легені у плечову кістку, фіксація перелому за допомогою апарата зовнішньої фіксації; б — стан після проведення променевої терапії на пухлину в плечовій кістці, сегментарної резекції плечової кістки з метастатичною пухлиною та сегментарного ендопротезування плечової кістки

пацієнтка продовжила курси поліхіміотерапії у зв'язку з основним захворюванням. На рис. 2 наведені фотовідбитки рентгенограми хворої М.: рис. 2а — метастаз раку легені у плечову кістку, фіксація перелому за допомогою апарата зовнішньої фіксації, рис. 2б — стан після проведення променевої терапії на пухлину в плечовій кістці, сегментарної резекції плечової кістки з метастатичною пухлиною та сегментарного ендопротезування плечової кістки.

Функціональний результат прооперованої кінцівки (за шкалою MSTS) в групі дослідження (n = 15) після металоостеосинтезу інтрамедулярними стрижнями, екстрамедулярними пластинами або після армованого металоостеосинтезу становив від 72,3 до 85,8 %. Функціональний результат прооперованої кінцівки в групі порівняння (n = 17) після застосування черезкісткового позавогнищевого остеосинтезу апаратом зовнішньої фіксації становив від 65,4 до 72,9 % (p < 0,05). На рис. 3 графічно наведені функціональні результати прооперованої кінцівки в групах дослідження та порівняння.

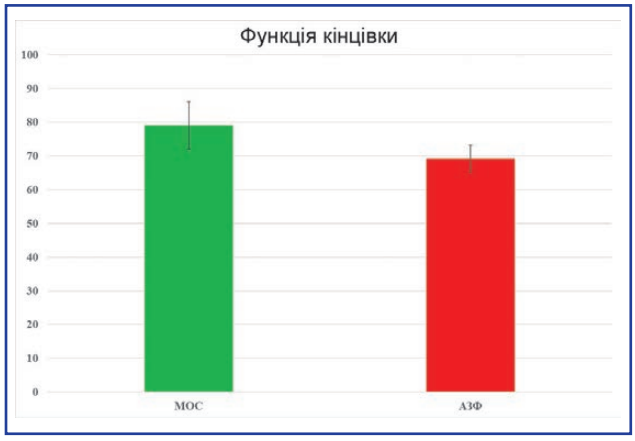


Рисунок 3. Графічне відображення функціональних результатів прооперованої кінцівки в групах дослідження та порівняння

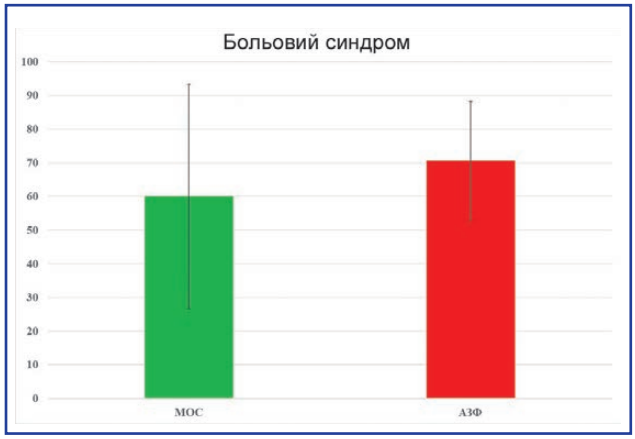


Рисунок 4. Графічне відображення показників больового синдрому після хірургічного лікування в групах дослідження та порівняння

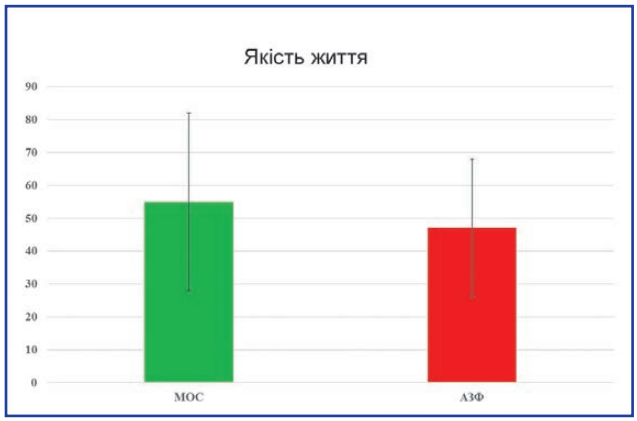


Рисунок 5. Графічне відображення показників якості життя хворих після хірургічного лікування в групах дослідження та порівняння

При оцінці больового синдрому (за шкалою R.G. Watkins) у 15 пацієнтів групи дослідження в місці метастатичного ураження до хірургічного втручання і після металоостеосинтезу інтрамедулярними стрижнями, екстрамедулярними пластинами або після армованого металоостеосинтезу із застосуванням кісткового цементу отримані наступні результати (табл. 3).

При порівняльній оцінці больового синдрому до хірургічного втручання і після металоостеосинтезу інтрамедулярними стрижнями, екстрамедулярними пластинами або після армованого металоостеосинтезу із застосуванням кісткового цементу (табл. 3) видно, що переважна більшість хворих — 10 (66,7 %) до операції мали больовий синдром, що відповідає 2–3 балам за шкалою R.G. Watkins. У 4 (26,7 %) хворих зберігався постійний сильний больовий синдром (4 бали за шкалою R.G. Watkins). Ця група пацієнтів потребувала постійного прийому наркотичних аналгетиків.

У післяопераційному періоді у 8 (53,4 %) хворих зберігався мінімальний больовий синдром (1 бал за шкалою R.G. Watkins), що не потребував прийому аналгетиків та не порушував сон. У 3 (20 %) пацієнтів больовий синдром був відсутній. У 1 (6,6 %) хворого була потреба в періодичному прийомі ненаркотичних аналгетиків, що зменшувало больовий синдром.

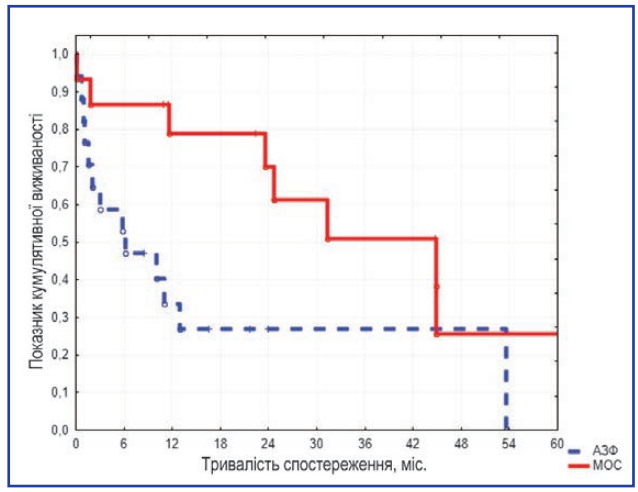


Рисунок 6. Графічне відображення загальної виживаності пацієнтів після хірургічного лікування в групі дослідження (металоостеосинтез інтрамедулярними стрижнями, екстрамедулярними пластинами або після армованого остеосинтезу) та в групі порівняння (черезкістковий позавогнищевий остеосинтез апаратом зовнішньої фіксації)

При оцінці больового синдрому у 17 хворих у місці метастатичного ураження до та після застосування черезкісткового позавогнищевого остеосинтезу апаратом зовнішньої фіксації (за шкалою R.G. Watkins) отримані такі результати (табл. 4).

При порівняльній оцінці больового синдрому до та після черезкісткового позавогнищевого остеосинтезу апаратом зовнішньої фіксації (табл. 4) видно, що переважна більшість хворих — 9 (52,9 %) до операції мали больовий синдром, відповідний 2–3 балам. У 6 (35,3 %) хворих зберігався постійний сильний больовий синдром (4 бали за шкалою R.G. Watkins). Ця група пацієнтів потребувала постійного прийому наркотичних аналгетиків. Лише у 2 хворих (11,8 %) больовий синдром був незначним (1 бал за шкалою R.G. Watkins).

У післяопераційному періоді у 6 (35,3 %) хворих зберігався мінімальний больовий синдром (1 бал за шкалою R.G. Watkins), що не потребувало прийому аналгетиків. У 2 (11,8 %) пацієнтів больовий синдром був відсутній. У 8 (47,1 %) пацієнтів больовий синдром був 2–3 бали (за шкалою R.G. Watkins), що потребувало періодичного прийому ненаркотичних аналгетиків, які зменшували його. У 1 (5,9 %) хворого зберігався постійний больовий синдром.

Таким чином, у післяопераційному періоді у хворих дослідної групи за шкалою R.G. Watkins больовий синдром знизився з 93,4 до 26,6 %, тоді як у хворих групи порівняння больовий синдром знизився з 88,2 до 52,9 % ($p > 0,05$). На рис. 4 графічно наведені показники больового синдрому після хірургічного лікування в групах дослідження та порівняння.

Якість життя хворих (за системою EORTC QLQ-C30) в групі дослідження ($n = 15$) після застосування металоостеосинтезу інтрамедулярними стрижнями, екстрамедулярними пластинами або після армованого остеосинтезу поліпшилася з 28 до 82 балів. Якість життя хворих (за системою EORTC QLQ-C30) в групі порівняння ($n = 17$) після черезкісткового позавогнищевого остеосинтезу поліпшилася з 26 до 68 балів ($p > 0,05$). На рис. 5 графічно наведені показники якості життя хворих після хірургічного лікування в групах дослідження та порівняння.

Трирічна загальна виживаність пацієнтів у групі дослідження ($n = 15$) після застосування металоостеосинтезу інтрамедулярними стрижнями, екстрамедулярними пластинами або після армованого остеосинтезу становила 48,8 ± 14,6 %. Трирічна загальна виживаність у групі порівняння ($n = 17$) після черезкісткового позавогнищевого остеосинтезу становила 26,6 ± 11,3 % ($p < 0,05$).

На рис. 6 графічно наведена загальна виживаність пацієнтів після хірургічного лікування в групі дослідження (металоостеосинтез інтрамедулярними стрижнями, екстрамедулярними пластинами або після армованого остеосинтезу) та в групі порівняння (черезкістковий позавогнищевий остеосинтез апаратом зовнішньої фіксації).

Таблиця 3. Порівняльна оцінка больового синдрому (за шкалою R.G. Watkins) у пацієнтів групи дослідження в місці метастатичного ураження кістки до хірургічного втручання і після металоостеосинтезу інтрамедулярними стрижнями, екстрамедулярними пластинами або після армованого металоостеосинтезу із застосуванням кісткового цементу

Кількість балів	До операції, кількість хворих, абс. (%)	Після операції, кількість хворих, абс. (%)
0	0 (0,0)	3 (20,0)
1	1 (6,6)	8 (53,4)
2	4 (26,7)	3 (20,0)
3	6 (40,0)	1 (6,6)
4	4 (26,7)	0 (0,0)
Усього	15 (100,0)	15 (100,0)

Таблиця 4. Порівняльна оцінка больового синдрому за шкалою R.G. Watkins до та після застосування черезкісткового позавогнищевого остеосинтезу апаратом зовнішньої фіксації

Кількість балів	До операції, кількість хворих, абс. (%)	Після операції, кількість хворих, абс. (%)
0	0 (0,0)	2 (11,8)
1	2 (11,8)	6 (35,3)
2	4 (23,5)	6 (35,3)
3	5 (29,4)	2 (11,8)
4	6 (35,3)	1 (5,9)
Усього	17 (100,0)	17 (100,0)

Обговорення

Рішення про хірургічне лікування метастатичного ураження кістки з патологічним переломом чи без нього не завжди просте. Патологічні переломи довгих кісток верхньої або нижньої кінцівки, особливо стегнової та плечової кісток, майже завжди лікуються хірургічним шляхом, оскільки це єдиний спосіб забезпечити мобілізацію пацієнта та адекватне знеболювання. Нехірургічне лікування в цих випадках призначене для пацієнтів, які перебувають на пізній, термінальній стадії захворювання. Головною метою хірургічного лікування пацієнтів з метастатичними пухлинами довгих трубчастих кісток є стабілізація ураженої метастазом кістки, відновлення функції кінцівок та створення можливості продовження адекватної протипухлинної терапії. Загалом результати хірургічного лікування пацієнтів з метастазами в кістках вважаються задовільними та прийнятними у випадку, якщо збереження або відновлення цілісності кістки у короткі терміни сприятливо впливає на якість життя пацієнтів. Частота ускладнень в групі дослідження (n = 15), у якій застосований остеосинтез інтрамедулярними штифтами, екстрамедулярними пластинами або армований металоостеосинтез, становила 13,3 %. Згідно з літературними даними, частота цих ускладнень (перелом інтрамедулярного штифта або екстрамедулярної пластини) коливається від 2,2 до 10,8 % [8, 9]. У групі порівняння (n = 17), у якій застосований черезкістковий позавогнищевий остеосинтез апаратами зовнішньої фіксації, частота ускладнень (спостерігалися випадки розхитування стрижнів та нагноєння м'яких тканин навколо них, що потребувало заміни апарата або його видалення та накладання гіпсової пов'язки для продовження променевої терапії) становила 17,6 %. Отримані нами результати можна порівняти з результатами інших авторів [16] при застосуванні апаратів зовнішньої фіксації, у яких розхитування стрижнів спостерігалося у 5–20 % випадків, а відсоток інфекційних ускладнень становив від 12,9 % для односторонніх фіксаторів до 20 % для гібридних фіксаторів, що говорить про отримані нами непогані результати лікування, хоча група пацієнтів у нашому дослідженні була невелика. Основними причинами, що потребують повторної операції після хірургічного видалення пухлини, виявилися подальший ріст метастатичної пухлини, відсутність кісткової консолідації перелому, нездатність фіксації кістки [9]. У нашому дослідженні рецидиви метастатичної пухлини в групі дослідження (n = 15) спостерігалися у 2 (13,3 %) пацієнтів. У групі порівняння (n = 17) із застосуванням черезкісткового позавогнищевого остеосинтезу рецидиви метастатичної пухлини спостерігалися у 3 (17,6 %) хворих. Рецидивів пухлини в групі дослідження спостерігалося менше завдяки більш радикальному та абластичному видаленню метастатичної пухлини під час хірургічного втручання. Функціональний результат прооперованої кінцівки після застосування металоостеосинтезу інтрамедулярними стрижнями, екстрамедулярними пластинами та армованого металоостеосинтезу становив від 72,3 до 85,8 % та був кращий порівняно із застосуванням апаратів зовнішньої фіксації, для яких він становив від 65,4 до 72,9 %, що говорить про більш надійний тип фіксації при застосуванні стрижнів, пластин та кісткового цементу. У результаті проведеного лікування клінічний ефект був кращим у хворих після застосування металоостеосинтезу інтрамедулярними стрижнями, екстрамедулярними пластинами та армованого металоостеосинтезу порівняно з хворими після застосування апаратів зовнішньої фіксації завдяки поліпшенню функції кінцівки та зменшенню больового синдрому. У післяопераційному періоді у хворих дослідної групи больовий синдром знизився з 93,4 до 26,6 %, тоді як у хворих групи порівняння больовий синдром знизився з 88,2 до 52,9 %. Деякі автори [17–19] повідомляють, що лікування метастатичних пухлин кісток є важливим для поліпшення якості життя онкологічного пацієнта. У нашому дослідженні якість життя хворих після застосування металоостеосинтезу інтрамедулярними стрижнями, екстрамедулярними пластинами та армованого металоостеосинтезу поліпшилася з 28 до 82 балів, тоді як після застосування черезкісткового позавогнищевого остеосинтезу — з 26 до 68 балів. У зв'язку з цим можна сказати, що використання металоостеосинтезу інтрамедулярними стрижнями, накістковими пластинами та армованого металоостеосинтезу є більш виправданим для збереження якості життя при метастатичних пухлинах довгих трубчастих кісток.

Таким чином, металоостеосинтез інтрамедулярними штифтами, екстрамедулярними пластинами, армований металоостеосинтез та черезкістковий позавогнищевий остеосинтез апаратами зовнішньої фіксації вважаються методиками вибору при хірургічному лікуванні метастатичних пухлин довгих трубчастих кісток. При розташуванні метастазів у метаепіфізарних зонах остеосинтез не вважається оптимальним методом реконструкції, переважним методом лікування метастатичних уражень довгих кісток у цих зонах є сегментарна резекція кістки з ендопротезуванням.

Висновки

1. У нашому дослідженні використання методик металоостеосинтезу при метастатичних пухлинах довгих трубчастих кісток дозволило відновити функцію та опороспроможність кінцівки у 93,8 % випадків.

2. Проведення хірургічного лікування з використанням методик металоостеосинтезу при метастатичних пухлинах довгих трубчастих кісток дозволило зменшити больовий синдром, відновити функцію кінцівки та поліпшити якість життя хворих, а також проводити додаткову специфічну терапію.

3. На підставі аналізу анатомо-функціональних результатів кінцівки доведена виправданість паліативного хірургічного лікування, а саме використання різних методик металоостеосинтезу при патологічних переломах довгих кісток кінцівок.

Перспектива подальшого дослідження полягає в тому, що методики остеосинтезу при метастатичних пухлинах кісток потребують постійного вдосконалення (як техніки хірургічних втручань, так і підходів до їх застосування), завдяки чому вдається зменшити кількість післяопераційних ускладнень та рецидивів пухлин кісток.

Дотримання етичних норм. Це дослідження було схвалено комісією з питань біоетичної експертизи та етики наукових досліджень при НМУ імені О.О. Богомольця, інформовану згоду на участь у дослідженні отримували від дорослих пацієнтів, які перебували на лікуванні в клінічних відділах Державної установи «Інститут травматології та ортопедії Національної академії медичних наук України» та Державної установи «Національний науковий центр радіаційної медицини, гематології та онкології Національної академії медичних наук України». Автори несуть відповідальність за всі аспекти роботи, гарантуючи належне дослідження та вирішення питань, пов'язаних із точністю чи цілісністю будь-якої частини роботи.

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

Інформація про фінансування. Жодних вигод у будь-якій формі не було отримано і не буде отримано від комерційної сторони, пов'язаної прямо чи опосередковано з предметом цієї статті.

Внесок авторів. Проценко В.В. — концепція та дизайн дослідження, аналіз отриманих даних, корекція тексту; Волков В.О. — задум, розробка та проведення дослідження, збір та обробка матеріалу, написання тексту; Соболевський Ю.Л. — аналіз та інтерпретування клінічних даних, аналіз даних літературних джерел; Кухарук А.С. — відбір історій хвороби та амбулаторних даних, статистична обробка матеріалу.

Список літератури

1. Kocarnik JM, Compton K, Dean FE, et al. Cancer incidence, mortality, years of life lost, years lived with disability, and disability-adjusted life years for 29 cancer groups from 2010 to 2019: a systematic analysis for the global burden of disease study 2019. JAMA Oncol. 2022;8:420. doi.org/10.1001/jamaoncol.2021.6987.

2. Siegel RL, Miller KD, Wagle NS, Jemal A. Cancer statistics, 2023. CA Cancer J Clin. 2023;73:17-48. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/36633525.

3. Tsagozis P, Forsberg J, Bauer HCF, et al. How Expected Survival In fluences the Choice of Surgical Procedure in Metastatic Bone Disease. Manag Bone Metastases. 2019:49-54. doi: 10.1007/978-3-319-73485-9_5.

4. Hernandez RK, Wade SW, Reich A, et al. Incidence of bone metastases in patients with solid tumors: analysis of oncology electronic medical records in the United States. BMC Cancer. 2018;18:44. doi: 10.1186/s12885-017-3922-0.

5. Auran RL, Martin JR, Duran MD, et al. Management of metastatic disease in long bones. J Orthop Trauma. 2022;36:481-8. doi: 10.1097/BOT.0000000000002360.

6. Ruggieri P, Mavrogenis AF, Casadei R, et al. Protocol of surgical treatment of long bone pathological fractures. Injury. 2010;41:1161-1167. doi: 10.1016/j.injury.2010.09.018.

7. Ropars M, Lambotte JC, Maximen J, et al. Techniques and outcomes of hip abductor reconstruction following tumor resection in adults. Orthop. Traumatol. Surg. Res. 2021;107:102765. doi.org/10.1016/j.otsr.2020.102765.

8. Errani C, Cosentino M, Ciani G, et al. C-reactive protein and tumour diagnosis predict survival in patients treated surgically for long bone metastases. Int. Orthop. 2021;45:1337-1346. doi: 10.1007/s00264-020-04921-2.

9. Errani C, Mavrogenis AF, Cevolani L, et al. Treatment for long bone metastases based on a systematic literature review. Eur. J. Orthop. Surg. Traumatol. 2017;27:205-211. doi: 10.1007/s00590-016-1857-9.

10. Macedo F, Ladeira K, Pinho F, et al. Bone metastases: an overview. Oncol Rev. 2017;11:321. doi.org/10.4081/oncol.2017.321.

11. Hunt KJ, Gollogly S, Randall RL. Surgical fixation of pathologic fractures: an evaluation of evolving treatment methods. Bull Hosp Jt Dis. 2006;63(3-4):77-82. PMID: 16878822.

12. Coleman RE, Croucher PI, Padhani AR, et al. Bone metastases. Nat Rev Dis Prim. 2020;6:83. doi.org/10.1038/s41572-020-00216-3.

13. Ryan C, Stoltzfus KC, Horn S, et al. Epidemiology of bone metastases. Bone. 2022;158:115783. doi.org/10.1016/j.bone.2020.115783.

14. Miller BJ, Soni EE, Gibbs CP, Scarborough MT. Intramedullary nails for long bone metastases: why do they fail? Orthopedics. 2011 Apr 11;34(4):274. doi: 10.3928/01477447-20110228-12.

15. Qu Huayi, Guo Wei, Yang Rongli, et al. Reconstruction of segmental bone defect of long bones after tumor resection by devitalized tumor-bearing bone. World J Surg Oncol. 2015;13:282. doi: 10.1186/s12957-015-0694-3.

16. Parameswaran AD, Roberts CS, Seligson D, Voor M. Pin track infection with contemporary external fixation: how much of a problem? J Orthop Trauma. 2003;17:503-507.

17. Bongiovanni A, Recine F, Fausti V, et al. Ten years of experience in a multidisciplinary osteo-oncology center. Support Care Cancer. 2019;27:3395-3402. doi.org/10.1007/s00520-019-4635-5.

18. Kitagawa Y, Ito T, Mizunoet Y, et al. The impact of promotional activities in orthopedics on the multidisciplinary management of patients with bone metastases. J. Nippon Med. Sch. 2019;86:327-335. doi.org/10.1272/jnms.JNMS.2019_86-609.

19. Kimura T. Interdisciplinary approach to bone metastasis: a review. Cancers (Basel). 2018;10:1-10. doi.org/10.3390/cancers10060156.

Отримано/Received 03.08.2026
Рецензовано/Revised 08.09.2026
Прийнято до друку/Accepted 11.09.2026

Information about authors

Volodymir Protsenko, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Diseases, Injuries and Musculoskeletal System, National Scientific Center of Radiation Medicine, Kyiv, Ukraine; https://orcid.org/0000-0001-8896-8371

Volodymir O. Volkov, graduate student of the Department of Traumatology and Orthopedics, O.O. Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine; https://orcid.org/0009 0002 0625 715X

Yuriy L. Sobolevskiy, MD, PhD, Associate Professor, Department of Traumatology and Orthopedics, O.O. Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine; https://orcid.org/0000 0002 86908620

Andrii S. Kukharuk, graduate student of the Department of Traumatology and Orthopedics, O.O. Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine; https://orcid.org/0009000518412462

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 benefits of any kind have been or will be received from a commercial party directly or indirectly related to the subject of this article.

Authors' contribution. V.V. Protsenko — study concept and design, data analysis, manuscript revision; V.O. Volkov — study concept, design, and implementation, data collection and processing, manuscript writing; Yu.L. Sobolevskyi — clinical data analysis and interpretation, literature review; A.S. Kukharuk — selection of medical records and outpatient data, statistical analysis.

V.V. Protsenko[1], V.O. Volkov[2], Yu.L. Sobolevskiy[2], A.S. Kukharuk[2]
[1]National Scientific Center for Radiation Medicine, Hematology and Oncology, Kyiv, Ukraine
[2]Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine

Results of the use of osteosynthesis techniques in the comprehensive treatment of patients with metastatic tumors of the long tubular bones of the extremities

Abstract. ***Background.*** Some researchers estimate that bone metastases may affect up to 70 % of cancer patients, 20 % of whom may require surgery. Bone metastases cause pain, pathological fractures, spinal cord or nerve root compression, and life-threatening hypercalcemia and may require surgery, radiation therapy, or drug treatment. The management of metastatic bone disease depends mainly on the type of primary tumor and the organ involved. If there is a risk of fracture or if pathological bone fractures have occurred, then bone stabilization or joint reconstruction with removal of the affected bone and surrounding tissues is necessary. Surgical treatment of metastatic skeletal lesions is performed using either arthroplasty or osteosynthesis. This article compares the results of intramedullary, extramedullary, reinforced osteosynthesis, and transosseous extrafocal osteosynthesis of long tubular bones in metastatic tumors, with the aim of identifying clinical situations in which osteosynthesis is considered the best method of bone stabilization. The purpose of the study was to compare treatment outcomes for patients with metastatic bone tumors when using metal osteosynthesis with intramedullary rods, extramedullary plates, and reinforced metal osteosynthesis in comprehensive regimens with those when using transosseous extrafocal osteosynthesis in comprehensive regimens for restoring limb function, reducing pain, and improving patients' quality of life in the long-term. ***Materials and methods.*** The outcomes of surgical treatment were analyzed in 32 patients (14 men and 18 women, for the period 2017–2025) with metastatic tumors of long tubular bones who were treated with various osteosynthesis methods. The study group consisted of 15 participants who underwent comprehensive treatment for metastatic tumors of long tubular bones of the extremities using surgical treatment: metal osteosynthesis with intramedullary rods, extramedullary plates, as well as reinforced metal osteosynthesis with bone cement. The comparison group included 17 patients who underwent comprehensive treatment for metastatic tumors of long tubular bones of the extremities using surgical treatment: transosseous extrafocal metal osteosynthesis with rod devices for external fixation. In both groups, the functional result of the operated limb was determined according to the Musculoskeletal Tumor Society (MSTS) staging system. Assessment of pain at the site of metastatic lesion before and after treatment was carried out according to the survey on the R.G. Watkins scale. Quality of life of patients who underwent surgical treatment was evaluated according to the EORTC QLQ-C30 system (score scale from 0 to 4). Survival was determined by the Kaplan-Meier method. ***Results.*** As a result of the treatment of 15 patients in the study group with metastatic bone tumors using metal osteosynthesis with intramedullary rods, extramedullary plates, as well as reinforced metal osteosynthesis with bone cement, postoperative complications were observed in 2 (13.3 %) cases, and relapses of the metastatic tumor in 2 (13.3 %). As a result of the treatment of 17 patients in the comparison group with metastatic bone tumors using transosseous extrafocal osteosynthesis with external fixation devices, postoperative complications were observed in 3 (17.6 %) patients, and relapses of the metastatic tumor in 3 (17.6 %). The functional result of the operated limb (according to the MSTS) in the study group was from 72.3 to 85.8 %. The functional result of the operated limb in the comparison group was from 65.4 to 72.9 % ($p < 0.05$). In the postoperative period, the pain syndrome in the study group (according to the R.G. Watkins scale) decreased from 93.4 to 26.6 %, and in the comparison group — from 88.2 to 52.9 % ($p > 0.05$). The quality of life of the patients in the study group in the postoperative period improved from 28 to 82 points and in the comparison group — from 26 to 68 points ($p > 0.05$). The three-year overall survival in the study group was 48.8 ± 14.6 %, in the comparison group, it was 26.6 ± 11.3 % ($p < 0.05$). ***Conclusions.*** 1. The use of osteosynthesis techniques in metastatic tumors of long tubular bones allowed to restore the function and weight-bearing of the limb in 93.8 % of cases. 2. Surgical treatment using osteosynthesis techniques in metastatic tumors of long tubular bones allowed to reduce pain syndrome, restore limb function and improve the quality of life of patients, as well as conduct additional specific therapy. 3. Based on the analysis of the anatomical and functional results of the limb, the justification of palliative surgical treatment has been proven, namely the use of various metal osteosynthesis techniques in pathological fractures of the long bones of the limbs.

Keywords: metastatic bone tumors; intramedullary metal osteosynthesis; extramedullary metal osteosynthesis; reinforced metal osteosynthesis; transosseous extrafocal metal osteosynthesis

Травма

DOI: https://doi.org/10.22141/1608-1706.5.27.2026.1124

Головаха М.Л., Чорний В.М.
Запорізький державний медико-фармацевтичний університет, м. Запоріжжя, Україна

Сучасні концепції лікування ушкоджень задньолатерального кута колінного суглоба

Резюме. ***Актуальність.*** *Ушкодження задньолатерального кута колінного суглоба (ЗЛККС) залишаються складною клінічною проблемою, що часто визначає результат лікування пацієнтів із багатозв'язковими травмами коліна; недостатня увага до цієї ділянки призводить до стійкої варусно-ротаційної нестабільності. Вибір між відновленням і реконструкцією, терміни втручання та технічні рішення залишаються дискусійними.* ***Мета роботи*** *— узагальнити сучасні концепції хірургічного лікування ушкоджень ЗЛККС на підставі аналізу актуальних літературних джерел.* ***Матеріали та методи.*** *Проаналізовано літературу баз даних PubMed, Scopus і Google Scholar за 2022–2026 роки за тематичними запитами щодо ЗЛККС, а також класичні джерела попередніх років; наративний огляд охоплює консервативні підходи, хірургічне відновлення та пластичну реконструкцію, протокол реабілітації й ускладнення.* ***Результати.*** *Ізольовані травми I–II ступеня піддаються неоперативному лікуванню з хорошими результатами, тоді як повні розриви потребують хірургічного лікування. Гостру травму (до 3 тижнів) за збережених тканин можна відновлювати швом, часто з аугментацією, застарілу — пластичною реконструкцією; за повного розриву реконструкція дає вищий відсоток успіху, ніж ізольований первинний шов. Анатомічна реконструкція малогомілкової колатеральної, підколінно-малогомілкової зв'язок і підколінного сухожилка переважає неанатомічні методики, зокрема тенодез сухожилка двоголового м'яза стегна; клінічно частіше обирають великогомілковий підхід, тоді як у біомеханічних порівняннях найменшу залишкову лаксацію забезпечує малогомілкова техніка з двома стегновими тунелями. Реабілітація передбачає 6-тижневу іммобілізацію, обмеження ізольованого навантаження підколінних сухожилків до 4 місяців і повернення до спорту приблизно через 6 місяців. Основні ускладнення хірургічного лікування — стійка нестабільність, ураження малогомілкового нерва, тромбоз глибоких вен та інфекція операційної рани. Фіксація трансплантата підколінного м'яза постійної довжини є неанатомічною через ротаційну зміну довжини сухожилка під час згинання коліна, що підтверджено даними 3D-моделювання з осьовим навантаженням.* ***Висновки.*** *Задньолатеральна пластична реконструкція, особливо анатомічна, забезпечує ліпші функціональні результати, ніж ізольований шов; водночас наявні методики лише частково відтворюють фізіологію підколінного комплексу й потребують уточнення точок фіксації та натягу трансплантата.*

Ключові слова: *колінний суглоб; задньолатеральний кут; зв'язки; хірургічне лікування; ускладнення; огляд*

Вступ

Пошкодження задньолатерального кута колінного суглоба (ЗЛККС) трапляються нечасто [1], але мають суттєвий вплив на відновлення функції колінного суглоба після травми. Ізольовані пошкодження ЗЛККС також трапляються нечасто, але викликають труднощі як при діагностиці, так і при виборі методу лікування. Частіше пошкодження ЗЛККС виникають у поєднанні з розривами передньої та, особливо часто, задньої хрестоподібної зв'язки — багатозв'язкові ушкодження коліна такого типу останніми роками отримали уніфіковану міжнародну класифікацію та термінологію в межах експертного консенсусу [2]. Несвоєчасна діагностика пошкоджень ЗЛККС призводить до болю та неповного відновлення функції колінного суглоба. Застарілі ушкодження структур ЗЛККС потребують пластичної реконструкції, тоді як свіжі розриви можуть бути відновлені методом шва з аугментацією.

© «Травма» / «Trauma» («Travma»), 2026
© Видавець Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2026

Для кореспонденції: Головаха Максим Леонідович, доктор медичних наук, професор, завідувач кафедри травматології та ортопедії Запорізького державного медико-фармацевтичного університету, бульвар Марії Примаченко, 26, Запоріжжя, 69035, Україна; e-mail: golovahaml@gmail.com
For correspondence: Maksym Golovakha, MD, Professor, Head of the Department of Orthopedics and Traumatology, Zaporizhzhia State Medical and Pharmaceutical University, Maria Pryimachenko blv., 26, Zaporizhzhia, 69035, Ukraine; e-mail: golovahaml@gmail.com
Full list of authors information is available at the end of the article.

Отже, дуже важливо як своєчасно визначити пошкодження структур ЗЛККС, так і вибрати раціональну лікувальну тактику.

Методи лікування пошкоджень задньолатерального кута колінного суглоба висвітлені недостатньо систематизовано, є протиріччя між вибором консервативного та хірургічного напрямків лікування.

Мета: навести огляд методів та результатів лікування пошкоджень задньолатерального кута колінного суглоба.

Матеріали та методи

Проаналізовано релевантну літературу з баз даних PubMed, Scopus і Google Scholar за період 2022–2026 років за ключовими поєднаннями термінів щодо задньолатерального кута колінного суглоба, його відновлення та реконструкції; додатково враховано класичні джерела попередніх років, що залишаються основою чинних методик, та клінічний контекст лікування ушкоджень ЗЛККС. Відбір джерел був наративним і спрямованим на клінічно значущі публікації щодо консервативного лікування, шва, пластичної реконструкції, реабілітації й ускладнень; огляд не був систематичним. Зростання частки високоенергетичних і бойових травм нижньої кінцівки [3, 4] збільшує практичну вагу своєчасного розпізнавання ушкоджень ЗЛККС і виваженого поєднання консервативних і хірургічних підходів.

Стаття є продовженням публікації «Сучасні концепції діагностики ушкоджень задньолатерального кута колінного суглоба» [5], у якій узагальнено діагностичний підхід та сучасні класифікації ступеня ушкодження структур ЗЛККС.

Результати та обговорення

Консервативне лікування. Ізольовані травми ЗЛККС I та II ступеня зазвичай можна лікувати неоперативно; за поєднаних ушкоджень I–II ступеня окремі сучасні серії all-inside відновлення також повідомляють про добрі функціональні результати [6]. Незважаючи на відсутність великої кількості публікацій про результати неоперативного лікування в літературі, результати консервативного лікування були хорошими. Мінімальні рентгенологічні зміни зареєстровані під час 8-річного спостереження в пацієнтів за умов застосування протоколу ранньої мобілізації [7, 8]. A.T. DeLeo та співавт. [9] повідомили про випадок 18-річної жінки, яка мала розтягнення латеральної колатеральної зв'язки II ступеня в поєднанні з травмою структур ЗЛККС. Пацієнтка повернулася до попереднього рівня активності без хірургічного лікування, лише після реабілітації. Відповідне відновлення та тренування ходи можуть бути корисними при лікуванні травм I або II ступеня.

Отже, відомо, що неоперативний спосіб може давати добрі результати; проте слід виявляти обережність, ураховуючи, що консервативне лікування повних розривів (саме ЗЛККС) показало погані функціональні результати [10].

Хірургічне лікування. У разі повних (III ступеня) та клінічно значущих комбінованих ушкоджень II–III ступеня, як правило, рекомендується хірургічне лікування (рис. 1); вибір конкретної тактики варто узгоджувати із сучасними алгоритмами лікування багатозв'язкових ушкоджень коліна [11].

Вибір лікування залежить також і від часу після травми. Загалом гостра травма визначається як така, що сталася протягом 3 тижнів до лікування. За збереженої життєздатності тканин можливе пряме відновлення швом, часто з аугментацією; за повного розриву ключових структур або сумнівної якості тканин доцільніше одразу розглядати пластичну реконструкцію. Сухожилок напівсухожилкового м'яза, двоголовий м'яз стегна і/або тибіальний тракт можуть використовуватись як алотрансплантати [12]; систематичний огляд і метааналіз останніх років не виявили значущої різниці функціональних результатів між авто- та алотрансплантатом при реконструкції ЗЛККС, що розширює можливості вибору тканини [13]. Під час реконструкції задньолатеральних структур рекомендоване анатомічне відновлення, що підтверджують і сучасні біомеханічні метааналізи [14]. Також можна розглянути і складніші процедури, проте вони є неанатомічними та неізометричними, що збільшує ризик подальшого обмеження руху колінного суглоба та іноді призводить до невдачі. Дуже важливо діагностувати всі супутні травми, зокрема ушкодження медіального меніска, які нерідко супроводжують гострі травми III ступеня ЗЛККС і потребують прицільної передопераційної МРТ-оцінки [15]. Для лікування відривних переломів необхідні стабільний остеосинтез або трансосальні шви.

Застаріла травма ЗЛККС — це та, що зберігається понад 3 тижні після ушкодження; саме цей поріг використовують і в сучасних систематичних оглядах для визначення «занедбаних» багатозв'язкових ушкоджень коліна [16]. Розірвана структура проростає фіброзною рубцевою тканиною після цього періоду, а пряме відновлення ускладнене через злипання тканин. Крім того, після операції вищий ризик виникнення контрактури суглоба. Тому у випадку хронічних травм рекомендується реконструкція. Крім того, у хронічних випадках важливе значення має вирівнювання осі нижніх кінцівок. Оскільки вирівнювання є найважливішим чинником, який слід ураховувати під час реконструктивної хірургії нижніх кінцівок, діагностика та корекція порушень осі кінцівки мають бути невід'ємною складовою частиною лікування хронічної нестабільності коліна [17]. Якщо варусне відхилення становить понад 3° або вісь кінцівки проходить у межах 30 % від медіальної сторони плато великогомілкової кістки, можна розглянути високу остеотомію великогомілкової кістки, зокрема з поступовим дозованим натягом задньолатерального зв'язкового комплексу за методом Ілізарова [18].

Пластична реконструкція задньолатеральних структур є методом вибору при хронічній нестабільності, а також при гострих повних розривах, які не підлягають надійному шву. Існують різні її методи, які можна поділити на два типи.

1. Неанатомічна реконструкція, яка полягає в отриманні задньолатеральної стабільності шляхом докладання натягу до задньолатеральних структур. У таких випадках рекомендують дугоподібний комплекс або просування кісткового блока, екстракапсулярний

слінг тибіального тракту, техніку аугментації та тенодез біцепса. S. Kim зі співавт. [19] повідомили про модифікований тенодез сухожилка біцепса стегна як про ще один спосіб відновлення задньолатеральних структур; середній післяопераційний бал за шкалою Lysholm Knee Score в цьому спостереженні становив 93,6.

2. Анатомічна реконструкція рекомендується в разі ушкодження малогомілкової колатеральної зв'язки, підколінного сухожилка та підколінно-малогомілкової зв'язки з використанням великогомілкової та малогомілкової технік [20]; саме ці три структури мають найвищий рівень консенсусу щодо необхідності анатомічного відновлення, хоча підколінно-малогомілкова зв'язка залишається найбільш дискусійною щодо номенклатури серед структур ЗЛККС [21].

M. Larsen та співавт. [22] описали метод малогомілкової петлі на основі головки малогомілкової кістки. За їхнім досвідом, він дає змогу належно збалансувати підколінний комплекс і латеральну колатеральну зв'язку. Цей спосіб широко використовується, оскільки це відносно проста процедура, яка дає добрі результати. L. Camarda та співавт. [23] зазначили, що цей метод мав відмінні результати в пацієнтів із хронічною задньою нестабільністю. E.P. Ho та співавт. [24] провели дослідження щодо відновлення на основі цього методу — група анатомічної реконструкції отримала найкращі результати. Y. Niki та співавт. [25] повідомили про чудові клінічні результати модифікованої процедури Larsen (рис. 2) і підкреслили відновлення натягу в підколінно-малогомілковій та латеральній колатеральній зв'язках, наголосивши на важливості фіксації сухожилка в малогомілковому тунелі. S.A. Kuzma та співавт. [26] описали анатомічну реконструкцію підколінно-малогомілкової та латеральної колатеральної зв'язок із використанням техніки на основі малогомілкової кістки й ахіллового сухожилка як алотрансплантата; за цим методом реконструйована зв'язка може бути відновлена також із використанням підколінного автологічного сухожилка, а сама техніка не потребує транстибіального тунелю. Подальшим розвитком малогомілкових технік стала методика подвійної стегнової фіксації трансплантата на регульованій петлі з інтерферентним гвинтом, яка спрощує інтраопераційне натягування трансплантата [27].

R.F. LaPrade та F. Wentorf [28] запропонували техніку на основі фіксації до великогомілкової кістки для реконструкції всіх структур, важливих для ЗЛККС (рис. 3).

K.H. Yoon та співавт. [29] та K. Lee та співавт. [30] повідомили про техніку на основі фіксації великогомілкової кістки з використанням ахіллового сухожилка як алотрансплантата (рис. 4). Варус і зовнішня ротація були значно зменшені в групі анатомічної реконструкції порівняно з групою неанатомічної. Техніка на основі фіксації до великогомілкової кістки дає змогу відновити три ключові структури, тому широко використовується клінічно, хоча є технічно складнішою і в частині спостережень може обмежувати задньолатеральну ротацію гомілки. K.H. Yoon та співавт. [31] повідомили, що не було суттєвої різниці між групою, в якій було реконструйовано всі три структури, та групою, в якій не було відновлено підколінний сухожилок. Пряме рандомізоване порівняння малогомілкової техніки Arciero та великогомілкової техніки LaPrade показало більший обсяг рухів і коротший час операції

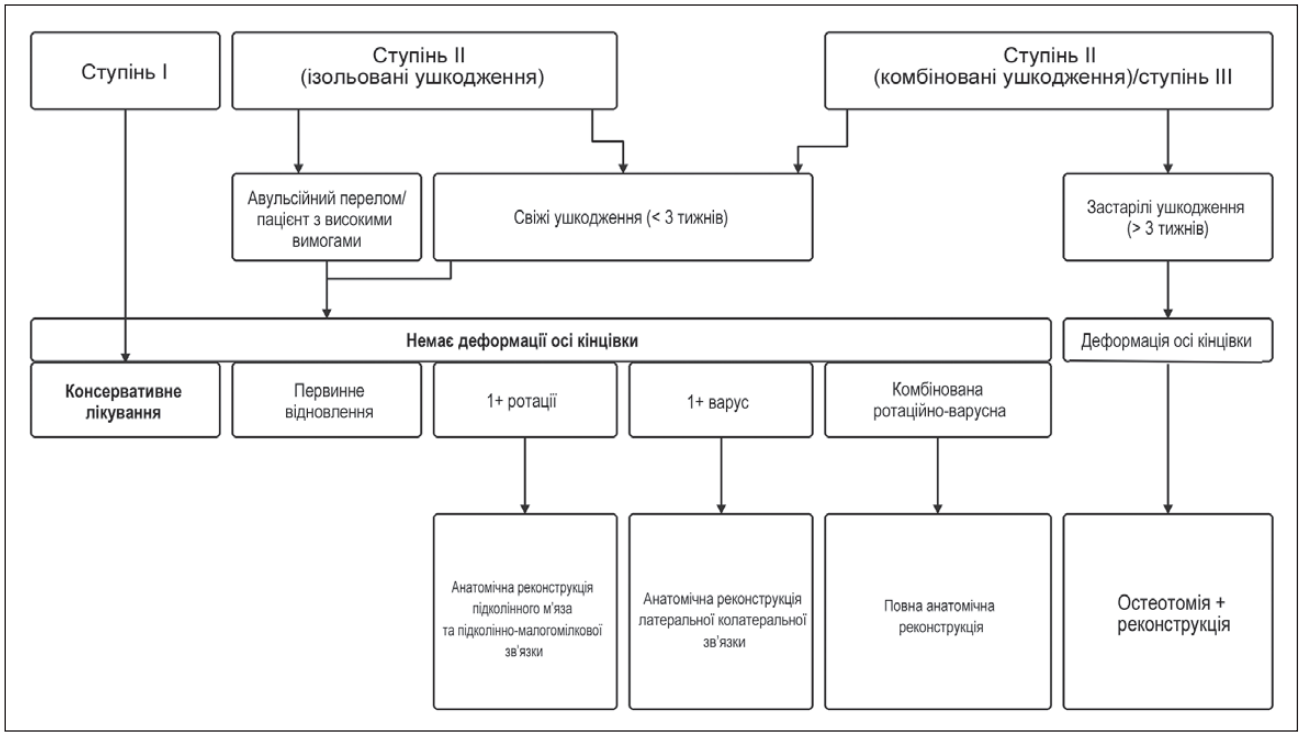


Рисунок 1. Алгоритм лікування ушкоджень задньолатерального кута колінного суглоба залежно від давності травми (гостра/застаріла) та життєздатності тканин

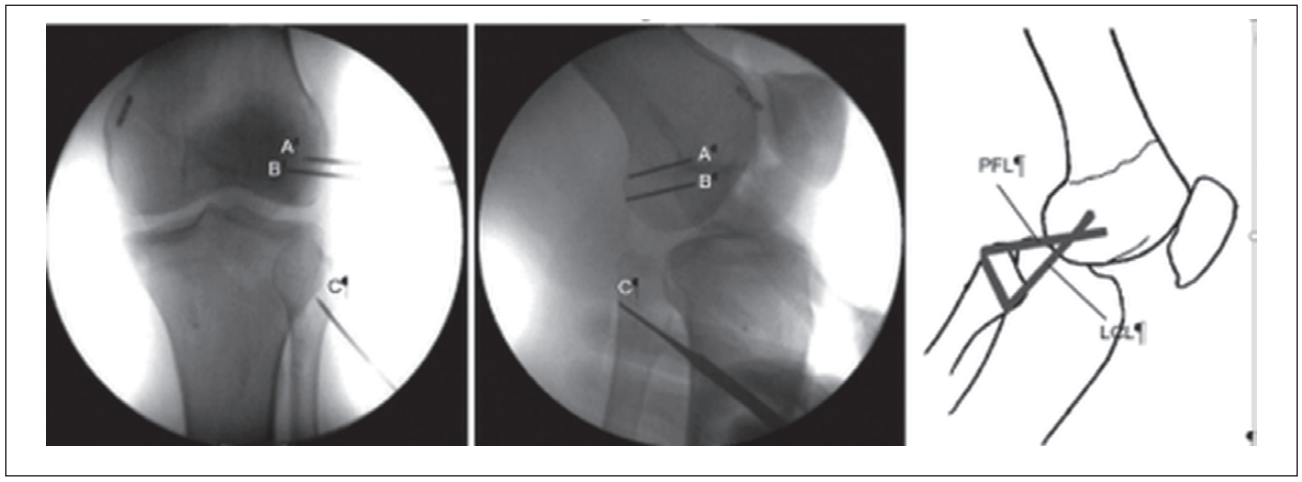


Рисунок 2. Малогомілковий тунель (модифікована техніка Larson): A, B — стегнові тунелі: анатомічні прикріплення латеральної колатеральної зв'язки та підколінного сухожилка на латеральному виростку стегнової кістки; C — малогомілковий тунель: вхід — у дистальній передньолатеральній частині головки малогомілкової кістки (прикріплення латеральної колатеральної зв'язки), вихід — у проксимальній задньомедіальній частині головки (прикріплення підколінно-малогомілкової зв'язки)

в групі Arciero за відсутності клінічно значущої різниці суб'єктивних результатів між групами [32].

Тривалий час бракувало довгострокових досліджень щодо реконструкції структур цієї локалізації, проте короткострокові спостереження показували добрі результати [33]; ситуацію дещо виправляють нещодавні систематичні огляди й метааналізи середньострокових результатів окремих технік, зокрема техніки Arciero [34]. У багатьох експериментах на трупному матеріалі порівнювали техніки на основі малогомілкової й великогомілкової кістки: за даними нещодавнього мережевого метааналізу біомеханічних досліджень, саме анатомічна малогомілкова техніка з двома стегновими тунелями забезпечує найменшу залишкову лаксацію при зовнішній ротації та варусному навантаженні [35]. S. Kim та співавт. [36] порівняли методи операції, які реконструюють лише дві структури з трьох у моделі. Результати не показали суттєвої різниці між ними, і жоден не був ефективним для відновлення нормальної функції колінного суглоба. M. McCarthy та співавт. [37] порівняли реконструкцію всіх трьох компонентів із відновленням лише підколінного сухожилка та латеральної колатеральної зв'язки. Результати були ліпшими після реконструкції всіх трьох компонентів, тому автори реко-

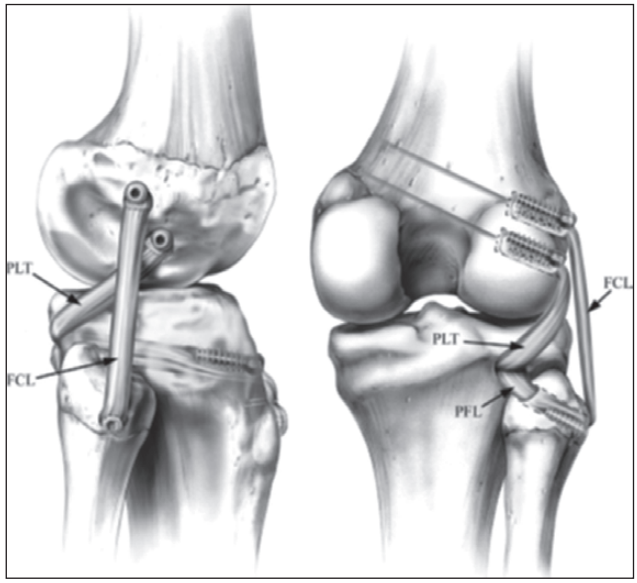


Рисунок 3. Методика анатомічної реконструкції ЗЛККС на основі фіксації до великогомілкової кістки за R.F. LaPrade [28]

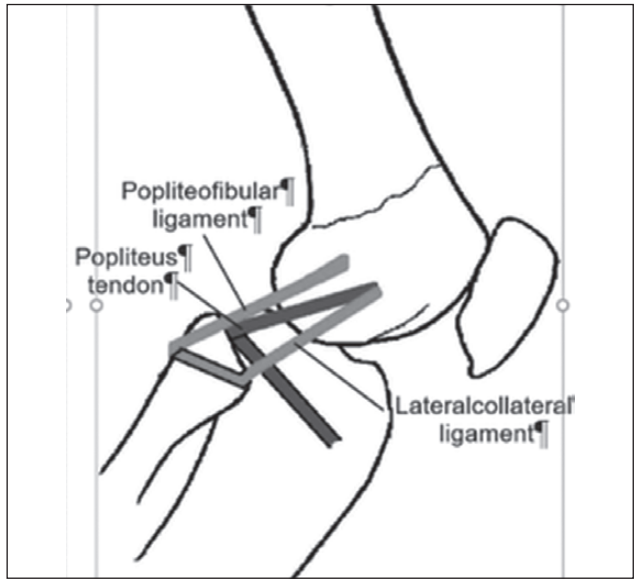


Рисунок 4. Техніка реконструкції ЗЛККС з використанням ахіллового сухожилка як алотрансплантата [29, 30]

мендували відновлення всіх трьох структур. S. Miyatake та співавт. [38] провели порівняльне дослідження дволанцюжкової та чотириланцюжкової реконструкції; остання забезпечила найкращі біомеханічні результати.

Реабілітація після операції. Метою післяопераційної реабілітації є захист реконструйованих чи відновлених зв'язкових структур. На ранньому етапі увагу приділяють зміцненню чотириголового м'яза та захисту пателофеморального суглоба. Це поступово переходить у зміцнення м'язів, розширення функціональних вправ і повсякденної активності, щоб пацієнт зрештою міг повернутися до занять спортом.

Багато досліджень ґрунтуються на рекомендаціях R.F. LaPrade щодо задньолатеральної пластичної реконструкції, яка включає підколінний сухожилок, підколінно-малогомілкову та латеральну колатеральну зв'язки; ці рекомендації узгоджуються і з чинним міжнародним експертним консенсусом щодо реабілітації після багатозв'язкових ушкоджень коліна [2]. Проте протокол може бути змінений залежно від інших супутніх ушкоджень зв'язок коліна. Після відновлення структур ЗЛККС пацієнт потребує іммобілізації кінцівки і має уникати повного осьового навантаження протягом 6 тижнів [39, 40]. У цей період пацієнту рекомендована фіксація ортезом [41]. Реабілітація починається відразу після операції, і її початкова фаза фокусується на відновленні діапазону рухів. Протягом перших 2 тижнів пасивні вправи виконуються в діапазоні від 0° до 90°, а потім поступово прогресують до повного діапазону рухів, наскільки це можливо без болю [40]. Через 6 тижнів дозволяється розпочати заняття на велотренажері та відмовитися від милиць. Після повного навантаження на ногу розпочинають вправи, спрямовані на розвиток м'язової витривалості. Дозволено зміцнення в закритому кінематичному ланцюзі, а згодом — вправи, спрямовані на прогресивний розвиток м'язової сили. Ізольоване зміцнення підколінних сухожилків обмежують, щоб уникнути навантаження на реконструйовану ділянку, доки не мине щонайменше 4 місяці після операції [39–41]. Біг або тренування на спритність можуть розпочинатися після відновлення відповідної сили та потужності м'язів. Приблизно через 6 місяців після операції дозволяється повернення до занять спортом за умови підтвердженої м'язової сили, стабільності суглоба та повного діапазону рухів.

Клінічні результати. Лікування травм структур ЗЛККС може відрізнятися залежно від тяжкості, супутніх патологій зв'язок та обраного способу. Сучасні систематичні огляди свідчать, що при гострих повних ушкодженнях ЗЛККС реконструкція частіше забезпечує стабільний результат, ніж ізольований первинний шов без аугментації [42, 43].

Результати відновлення гострих ушкоджень ЗЛККС ліпші, якщо воно виконане раніше, у гострій фазі. K.D. Shelbourne та співавт. [44] відзначили, що відновлення ЗЛККС протягом 4 тижнів після травми приводило до значно кращого результату, ніж відновлення, виконане в період від 4 до 6 тижнів після травми. Ліпші результати раннього відновлення можуть бути пов'язані з відсутністю ретракції тканин та адгезії чи рубцювання малогомілкового нерва, які іноді виникають у перші кілька тижнів після травми. Якщо втручання проводиться протягом перших 2 тижнів, анатомію набагато легше визначити, і без технічних складнощів вдається досягти відновлення цілісності звичайними швами [45]. C.L. Baker та співавт. [46] повідомили про серію з 13 пацієнтів, яким здійснили пластику структур ЗЛККС; у них були добрі об'єктивні та функціональні результати. Y. Krukhaug та співавт. [7] ретроспективно розглянули хворих після гострого відновлення або консервативного лікування. Пацієнти, яким було здійснено екстрене оперативне втручання, показали поліпшення стабільності коліна, тоді як в осіб, яким проводилося консервативне лікування, поліпшення не спостерігалося. Проте дослідження, зокрема й останніх років, показують, що первинного шва недостатньо для лікування травм латеральної колатеральної зв'язки, підколінного сухожилка або підколінно-малогомілкової зв'язки [10, 47, 48].

Результати пластичної реконструкції структур ЗЛККС. Пластика в гострому періоді після травми вважається ефективним варіантом лікування ушкоджень ЗЛККС за наявності тканин зв'язок, які неможливо зшити або рефіксувати. S.A. Ibrahim зі співавт. [49] повідомили про результати спостереження за 20 пацієнтами, яким виконали пластику структур ЗЛККС у гострому періоді після травми з використанням контралатерального підколінного сухожилка як автотрансплантата. Дослідження показало поліпшення результатів після пластики в гострому періоді: середній бал за шкалою Lysholm Knee Score становив 90 балів при 44-місячному спостереженні. J.P. Stannard та співавт. [50] виявили вищий рівень невдач у групі відновлення, ніж у групі пластичної реконструкції. B.A. Levy та співавт. [48] повідомили про випадки багатозв'язкової травми коліна, після відновлення якої здійснено відстрочену пластику хрестоподібних зв'язок; рівень невдач у них був значно нижчим, ніж у групі, у якій використовувалося лише зшивання. У дослідженнях описується, що реконструкція має найкращі результати [51, 52]; за даними новіших робіт (це стосується і вибору тканини трансплантата) клінічні результати й частота невдач суттєво не відрізняються між різними видами алографтів, що дає хірургу гнучкість у виборі [53], а поєднання ушкодження ЗЛККС із ушкодженням задньомедіального кута не погіршує функціональний результат реконструкції за умови адекватного відновлення обох структур [54]. Утім, результати можуть відрізнятися залежно від вибору хірургами різних методів. Декілька публікацій повідомили про поліпшення результатів для пацієнтів із використанням анатомічної техніки. J.P. Stannard та співавт. [50] повідомили про результати лікування 15 пацієнтів після анатомічної пластики: середній бал за шкалою Lysholm Knee Score становив 92. R.F. LaPrade і співавт. [33] продемонстрували техніку анатомічної пластики структур ЗЛККС та згодом повідомили про результати лікування когортної групи — у пацієнтів спостерігалося значне поліпшення об'єктивних балів за шкалою IKDC після операції.

Ускладнення. Частота й тяжкість ускладнень реконструкції ЗЛККС залежать не лише від обраної техніки, а й від чинників пацієнта: зокрема, підвищений індекс маси тіла асоціюється з більшою частотою періопераційних ускладнень при багатозв'язковій реконструкції коліна, хоча функціональні результати в довгостроковій перспективі суттєво не відрізняються [55].

1. Постійна нестабільність. Нестабільність може зберігатися після операції з відновлення або пластичної реконструкції. Технічні помилки можуть призвести до постійної нестабільності, якщо основні анатомічні структури не відновлені [56, 57].

2. Неврологічні та судинні ускладнення. Ураження загального малогомілкового нерва може супроводжувати травму структур ЗЛККС через його близьке розташування [58]. Коли коліно зазнає варусних і перерозгинальних сил, пов'язаних з ушкодженням структур ЗЛККС, цей нерв стає вразливим [59], тому під час операції потрібна особлива обережність. Імовірність відновлення повного парезу малогомілкового нерва варіює й піддається прогнозуванню за такими чинниками, як індекс маси тіла, стать і вік пацієнта [60].

3. Тромбоз глибоких вен може виникнути після будь-якої операції на нижніх кінцівках, зокрема й у разі реконструкції або відновлення структур ЗЛККС; за сучасними систематичними оглядами, підходи до фармакологічної профілактики варіюють від рутинного призначення до тактики, обмеженої лише пацієнтами високого ризику, оскільки абсолютний ризик симптомної венозної тромбоемболії після реконструкції зв'язок коліна залишається низьким [61, 62]. У пацієнтів із високим ризиком доцільне профілактичне введення низькомолекулярного гепарину; рання мобілізація та реабілітація також ефективні для профілактики тромбозу глибоких вен.

4. Інфекція операційної рани. Поверхнева чи глибока інфекція завжди була потенційною проблемою за будь-яких умов хірургічного втручання на коліні. У разі відкритої пластичної реконструкції коліна частота ранової інфекції становить від 0,3 до 12,5 % [63, 64]. Сучасний огляд профілактики та лікування інфекції після реконструкції зв'язок коліна підкреслює роль передопераційної антисептики шкіри, своєчасної антибіотикопрофілактики та, за потреби, просочування трансплантата ванкоміцином [65]. Профілактичні антибіотики, ретельна обробка м'яких тканин і детальне планування розрізів шкіри можуть допомогти зменшити частоту цього ускладнення [66].

Висновки

Задньолатеральна пластична реконструкція показала кращі результати порівняно з простим відновленням або зшиванням у хірургічному лікуванні травм структур задньолатерального кута колінного суглоба. Анатомічна пластична реконструкція задньолатеральних структур показана і при хронічній нестабільності. Існує два її типи: перший заснований на фіксації малогомілкової кістки до стегнової, другий — на фіксації великогомілкової кістки та головки малогомілкової кістки до латерального виростка стегнової кістки. На сьогодні великогомілковий варіант частіше застосовують для відновлення всіх трьох ключових структур, тоді як малогомілкові анатомічні техніки залишаються порівнянною альтернативою за клінічними результатами та в окремих біомеханічних дослідженнях.

Трансплантат, яким з'єднують великогомілкову кістку зі стегновою, є жорстким аугментом для сухожилка підколінного м'яза, однак це містить внутрішню суперечність. Точку його фіксації на задній поверхні великогомілкової кістки вибирають емпірично — у проєкції сухожилка підколінного м'яза. Проте цей м'яз змінює довжину залежно від ротаційних переміщень гомілки щодо стегнової кістки, а точка прикріплення його сухожилка зміщується. Пряме підтвердження цієї суперечності отримано в дослідженні на 3D-моделюванні з осьовим навантаженням: за великогомілковою технікою LaPrade задній пучок трансплантата демонструє значне подовження (неізометричність) під час згинання коліна, тоді як за технікою Larson задній пучок, навпаки, вкорочується, тобто жоден із варіантів фіксації постійної довжини не відтворює фізіологічну поведінку сухожилка підколінного м'яза, і оптимальне натягування трансплантата залежить від кута згинання коліна на момент фіксації [67]. Отже, фіксація трансплантата постійної довжини лише наближено відтворює сухожилок підколінного м'яза, а вибір точок його фіксації та кута натягу залишається предметом обговорення.

Таким чином, навіть анатомічні методики реконструкції ЗЛККС лише частково відтворюють фізіологію підколінного комплексу і потребують подальшого уточнення точок фіксації та способу натягу трансплантата.

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

Інформація про фінансування. Дослідження не отримувало окремого гранту від фінансувальних агенцій державного, комерційного або некомерційного секторів.

Внесок авторів. Головаха М.Л. — концепція та дизайн огляду, критичний перегляд і остаточне затвердження тексту; Чорний В.М. — пошук та аналіз літературних джерел, написання первинного варіанта тексту, оформлення списку літератури, підготовка ілюстративного матеріалу.

Список літератури

1. Toyooka S, Persson A, LaPrade RF, Engebretsen L, Moatshe G. Injury patterns in posterolateral corner knee injury. Orthop J Sports Med. 2023;11(8):23259671231184468. doi: 10.1177/23259671231184468.

2. Murray IR, Makaram NS, Geeslin AG, Chahla J, Moatshe G, Crossley K, et al. Multiligament knee injury (MLKI): an expert consensus statement on nomenclature, diagnosis, treatment and rehabilitation. Br J Sports Med. 2024;58(23):1385-1400. doi: 10.1136/bjsports-2024-108089.

3. Borodiuk DV, Zazirnyi IM, Ankin ML, Ladyka VO. Epidemiology and clinical features of gunshot fractures of the femur

under conditions of military conflict. Trauma. 2025;26(2):94-99. doi: 10.22141/1608-1706.2.26.2025.1006.

4. Epstein CS, Prokhorenko G, Los D, Pavchak R. Combat orthopedic trauma care: challenges and innovations in Ukraine's wartime response. Surgery. 2025;182(3):109313. doi: 10.1016/j.surg.2025.109313.

5. Golovakha ML, Yehorov VF, Bezverkhyi AA, Havrylenko BS, Zabielin IM. Correlation between magnetic resonance imaging and clinical examination in the analysis of posterolateral corner knee injuries. Orthopaedics, Traumatology and Prosthetics. 2026;(2):31-37. Ukrainian. doi: 10.15674/0030-59872026231-37.

6. Komnos G, Mitrousias V, Duthon V, Menetrey J. Excellent outcomes following repair of grade I-II isolated posterolateral corner injury and meniscal instability using an all-inside, arthroscopic technique. J Exp Orthop. 2025;12(4):e70462. doi: 10.1002/jeo2.70462.

7. Krukhaug Y, Mølster A, Rodt A, Strand T. Lateral ligament injuries of the knee. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 1998;6(1):21-25. doi: 10.1007/s001670050067.

8. Kannus P. Nonoperative treatment of grade II and III sprains of the lateral ligament compartment of the knee. Am J Sports Med. 1989;17(1):83-88. doi: 10.1177/036354658901700114.

9. DeLeo AT, Woodzell WW, Snyder-Mackler L. Resident's case problem: diagnosis and treatment of posterolateral instability in a patient with lateral collateral ligament sprain. J Orthop Sports Phys Ther. 2003;33(4):185-195. doi: 10.2519/jospt.2003.33.4.185.

10. Geeslin AG, LaPrade RF. Outcomes of treatment of acute grade-III isolated and combined posterolateral knee injuries. J Bone Joint Surg Am. 2011;93(18):1672-1683. doi: 10.2106/JBJS.J.01639.

11. AbdelKawi A, Fargaly M, Eid G, El Assal M, Elkady H, Fetih TN. New algorithm for management of multiligament knee injuries: a tertiary level trauma center experience. J Exp Orthop. 2025;12(3):e70387. doi: 10.1002/jeo2.70387.

12. Park N, Medvecky H, Moran J, Medvecky MJ. Repair of acute grade-3 combined posterolateral corner avulsion injuries using a transosseous Krackow suture pull-through technique. JBJS Essent Surg Tech. 2024;14(4). doi: 10.2106/JBJS.ST.23.00065.

13. Kern K, Sanii R, Peterson JC, Menge T. Autograft versus allograft in posterolateral corner reconstruction: a systematic review and meta-analysis. Orthop J Sports Med. 2024;12(6):23259671241247542. doi: 10.1177/23259671241247542.

14. Zielinski KP, Wieland MD, Sequeira SB, Gould HP, Dreese JC. Posterolateral corner reconstruction: a systematic review and meta-analysis of biomechanical studies. Am J Sports Med. 2025;53(6):1524-1534. doi: 10.1177/03635465241266264.

15. Moran J, Jimenez AE, Katz LD, Wang A, McLaughlin WM, Gillinov SM, et al. Examining preoperative MRI for medial meniscal ramp lesions in patients surgically treated for acute grade 3 combined posterolateral corner knee injury. Orthop J Sports Med. 2023;11(2):23259671221144767. doi: 10.1177/23259671221144767.

16. Vivekanantha P, Ashur A, Kolde S, Meena A, Shekar A, et al. Approach to the neglected multiligament knee injury: a systematic review. Indian J Orthop. 2026;60(5):1067-1085. doi: 10.1007/s43465-025-01674-1.

17. Savarese E, Bisicchia S, Romeo R, Amendola A. Role of high tibial osteotomy in chronic injuries of posterior cruciate ligament and posterolateral corner. J Orthop Traumatol. 2010;12(1):1-17. doi: 10.1007/s10195-010-0120-0.

18. Hussein MA, Khalifa AA, Hosny GA. High tibial osteotomy for acute correction and subsequent gradual tensioning of the posterolateral knee ligament complex in treating genu varum combined with a lateral thrust using the Ilizarov technique in adults: surgical technique and early results. J Orthop Surg Res. 2023;18(1):421. doi: 10.1186/s13018-023-03900-8.

19. Kim S, Shin S, Jeong J. Posterolateral rotatory instability treated by a modified biceps rerouting technique: technical considerations and results in cases with and without posterior cruciate ligament insufficiency. Arthroscopy. 2003;19(5):493-499. doi: 10.1053/jars.2003.50102.

20. Lima-Bernardes F, Silva NV, Ribeiro P, Soares DM, Ferreira N, Nogueira H. Reconstrução anatômica do canto posterolateral do joelho com enxerto único de semitendíneo autólogo: nota técnica para o enxerto de comprimento limítrofe. Rev Bras Ortop. 2024;59(6):e991-e996. Portuguese. doi: 10.1055/s-0044-1793826.

21. Angelats X, Carrera A, Tubbs RS, Iwanaga J, Franco M, et al. Anatomy of the ligaments of the posterolateral corner of the knee: a narrative literature review. J Exp Orthop. 2025;12(4):e70562. doi: 10.1002/jeo2.70562.

22. Larsen M, Moinfar A, Moorman C. Posterolateral corner reconstruction: fibular-based technique. J Knee Surg. 2005;18(2):163-166. doi: 10.1055/s-0030-1248176.

23. Camarda L, Condello V, Madonna V, Cortese F, D'Arienzo M, Zorzi C. Results of isolated posterolateral corner reconstruction. J Orthop Traumatol. 2010;11(2):73-79. doi: 10.1007/s10195-010-0088-9.

24. Ho EP, Lam M, Chung MM, Fong DT, Law BK, Yung PS, et al. Comparison of 2 surgical techniques for reconstructing posterolateral corner of the knee: a cadaveric study evaluated by navigation system. Arthroscopy. 2011;27(1):89-96. doi: 10.1016/j.arthro.2010.06.006.

25. Niki Y, Matsumoto H, Otani T, Enomoto H, Toyama Y, Suda Y. A modified Larson's method of posterolateral corner reconstruction of the knee reproducing the physiological tensioning pattern of the lateral collateral and popliteofibular ligaments. Sports Med Arthrosc Rehabil Ther Technol. 2012;4(1):21. doi: 10.1186/1758-2555-4-21.

26. Kuzma SA, Chow RM, Engasser WM, Stuart MJ, Levy BA. Reconstruction of the posterolateral corner of the knee with Achilles tendon allograft. Arthrosc Tech. 2014;3(3):e393-e398. doi: 10.1016/j.eats.2014.02.006.

27. Kennedy NI, Therrien E, Marx RG, Stuart MJ, Levy BA. Posterolateral corner reconstruction using double femoral fixation with adjustable loop cortical suspension and interference screw. Video J Sports Med. 2022;2(5):26350254221114890. doi: 10.1177/26350254221114890.

28. LaPrade RF, Wentorf F. Diagnosis and treatment of posterolateral knee injuries. Clin Orthop Relat Res. 2002;402:110-121. doi: 10.1097/00003086-200209000-00010.

29. Yoon KH, Bae DK, Ha JH, Park SW. Anatomic reconstructive surgery for posterolateral instability of the knee. Arthroscopy. 2006;22(2):159-165. doi: 10.1016/j.arthro.2005.12.003.

30. Lee K, Jung Y, Jung H, Jang E, Song K, Kim J, et al. Combined posterolateral corner reconstruction with remnant

tensioning and augmentation in chronic posterior cruciate ligament injuries: minimum 2-year follow-up. Arthroscopy. 2011;27(4):507-515. doi: 10.1016/j.arthro.2010.11.007.

31. Yoon KH, Lee JH, Bae DK, Song SJ, Chung KY, Park YW. Comparison of clinical results of anatomic posterolateral corner reconstruction for posterolateral rotatory instability of the knee with or without popliteal tendon reconstruction. Am J Sports Med. 2011;39(11):2421-2428. doi: 10.1177/0363546511415656.

32. Weiss S, Krause M, Frosch KH. Clinical results after arthroscopic reconstruction of the posterolateral corner of the knee: a prospective randomized trial comparing two different surgical techniques. Arch Orthop Trauma Surg. 2023;143(2):967-975. doi: 10.1007/s00402-022-04403-7.

33. LaPrade RF, Johansen S, Agel J, Risberg MA, Moksnes H, Engebretsen L. Outcomes of an anatomic posterolateral knee reconstruction. J Bone Joint Surg Am. 2010;92(1):16-22. doi: 10.2106/JBJS.I.00474.

34. Ghasemi SA, Murray BC, McCahon J, Rashidi S, Raphael J, Arciero R. Clinical outcomes of the Arciero technique in posterolateral corner reconstruction: a systematic review and meta-analysis. J Clin Orthop Trauma. 2025;67:103061. doi: 10.1016/j.jcot.2025.103061.

35. Bram JT, White AE, Cusano A, Halvorsen H, Zhuang S, Levy B, Marx RG. Anatomic fibular-based posterolateral corner reconstruction with 2 femoral tunnels shows lowest residual laxity with external rotation and varus stresses: a systematic review and network meta-analysis of in vitro biomechanical studies. Arthroscopy. 2025;41(5):1557-1568. doi: 10.1016/j.arthro.2024.08.046.

36. Kim S, Kim H, Moon H, Chang W, Kim S, Chun Y. A biomechanical comparison of 3 reconstruction techniques for posterolateral instability of the knee in a cadaveric model. Arthroscopy. 2010;26(3):335-341. doi: 10.1016/j.arthro.2009.08.010.

37. McCarthy M, Camarda L, Wijdicks CA, Johansen S, Engebretsen L, LaPrade RF. Anatomic posterolateral knee reconstructions require a popliteofibular ligament reconstruction through a tibial tunnel. Am J Sports Med. 2010;38(8):1674-1681. doi: 10.1177/0363546510361220.

38. Miyatake S, Kondo E, Tsai T, Hirschmann M, Halewood C, Jakobsen BW, et al. Biomechanical comparisons between 4-strand and modified Larson 2-strand procedures for reconstruction of the posterolateral corner of the knee. Am J Sports Med. 2011;39(7):1462-1469. doi: 10.1177/0363546511404135.

39. Lunden JB, Bzdusek PJ, Monson JK, Malcomson KW, LaPrade RF. Current concepts in the recognition and treatment of posterolateral corner injuries of the knee. J Orthop Sports Phys Ther. 2010;40(8):502-516. doi: 10.2519/jospt.2010.3269.

40. Dean RS, Chahla J, LaPrade RF. Posterolateral corner of the knee. In: Evidence-Based Management of Complex Knee Injuries. Elsevier; 2022. P. 112-126. doi: 10.1016/B978-0-323-71310-8.00009-8.

41. Crespo B, James EW, Metsavaht L, LaPrade RF. Injuries to posterolateral corner of the knee: a comprehensive review from anatomy to surgical treatment. Rev Bras Ortop. 2015;50(4):363-370. doi: 10.1016/j.rboe.2014.12.008.

42. Fortier LM, Knapik DM, Condon JJ, DeWald D, Khan Z, Kerzner B, et al. Higher success rate observed in reconstruction techniques of acute posterolateral corner knee injuries as compared to repair: an updated systematic review. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2023;31(12):5565-5578. doi: 10.1007/s00167-023-07582-x.

43. White AE, Bryan MR, Thomas TL, Varady NH, Cusano A, Menta SV, Baldwin RB, Ranawat AS. Repair fails more frequently than reconstruction in acute posterolateral corner knee injuries: a systematic review of outcomes following surgical management. Arthroscopy. 2025;41(8):3223. doi: 10.1016/j.arthro.2024.11.093.

44. Shelbourne KD, Haro MS, Gray T. Knee dislocation with lateral side injury. Am J Sports Med. 2007;35(7):1105-1116. doi: 10.1177/0363546507299444.

45. Spitzer E, Doyle J, Marx R. Outcomes of surgical treatment of posterolateral instability of the knee. J Knee Surg. 2015;28(6):471-474. doi: 10.1055/s-0035-1558857.

46. Baker CL, Norwood LA, Hughston JC. Acute combined posterior cruciate and posterolateral instability of the knee. Am J Sports Med. 1984;12(3):204-208. doi: 10.1177/036354658401200307.

47. Stannard JP, Brown SL, Farris RC, McGwin G, Volgas DA. The posterolateral corner of the knee: repair versus reconstruction. Am J Sports Med. 2005;33(6):881-888. doi: 10.1177/0363546504271208.

48. Levy BA, Dajani KA, Morgan JA, Shah JP, Dahm DL, Stuart MJ. Repair versus reconstruction of the fibular collateral ligament and posterolateral corner in the multiligament-injured knee. Am J Sports Med. 2010;38(4):804-809. doi: 10.1177/0363546509352459.

49. Ibrahim SA, Ghafar S, Salah M, Abo Alnas M, Al Misfer A, Farouk H, et al. Surgical management of traumatic knee dislocation with posterolateral corner injury. Arthroscopy. 2013;29(4):733-741. doi: 10.1016/j.arthro.2012.11.021.

50. Stannard JP, Brown SL, Robinson JT, McGwin G, Volgas DA. Reconstruction of the posterolateral corner of the knee. Arthroscopy. 2005;21(9):1051-1059. doi: 10.1016/j.arthro.2005.05.020.

51. Fahlbusch H, Weiß S, Landenberger J, Von Rehlingen Prinz F, Dust T, Akoto R, et al. Arthroscopic and open reconstruction of the posterolateral corner of the knee have equally good clinical results: first results of a prospective 12-month follow-up study. Arch Orthop Trauma Surg. 2024;144(6):2745-2752. doi: 10.1007/s00402-024-05355-w.

52. Cabarcas B, Patel R, Mahler R, Kumar N, Warnick D. Anatomic posterolateral corner reconstruction with single tibialis allograft and suspensory tibial fixation. Arthrosc Tech. 2025;14(3):103265. doi: 10.1016/j.eats.2024.103265.

53. Dave U, Villarreal-Espinosa JB, Shah H, Cotter EJ, Gomez-Verdejo F, Carpenter M, et al. Patients have similar clinical outcomes and failure rates after anterior cruciate ligament reconstruction with tibialis anterior tendon, bone-patellar tendon-bone, hamstring tendon, or Achilles tendon allografts: a systematic review. Arthrosc Sports Med Rehabil. 2025;7(3):101035. doi: 10.1016/j.asmr.2024.101035.

54. Zhu Y, Sun H, Wang X, Li J, Fu W. Comparison of knee function after reconstruction with posterolateral corner injury and with or without posteromedial corner injury for treating knee dislocation cases: a prospective cohort study. Orthop Surg. 2026;18(4):721-732. doi: 10.1111/os.70277.

55. Tagliero AJ, Smith JR, Iyer S, Yanamala S, Johnson T, Krych AJ, Levy BA. Comparison of multiligament

reconstruction in individuals with BMI >30 and <30 kg/m². Am J Sports Med. 2026. Epub ahead of print. doi: 10.1177/03635465261442974.

56. Harner CD, Höher J. Evaluation and treatment of posterior cruciate ligament injuries. Am J Sports Med. 1998;26(3):471-482. doi: 10.1177/03635465980260032301.

57. Fanelli GC, Giannotti BF, Edson CJ. The posterior cruciate ligament arthroscopic evaluation and treatment. Arthroscopy. 1994;10(6):673-688. doi: 10.1016/s0749-8063(05)80067-2.

58. Deutsch A, Wyzykowski RJ, Victoroff BN. Evaluation of the anatomy of the common peroneal nerve. Am J Sports Med. 1999;27(1):10-15. doi: 10.1177/03635465990270010201.

59. White J. The results of traction injuries to the common peroneal nerve. J Bone Joint Surg Br. 1968;50(2):346-350. doi: 10.1302/0301-620x.50b2.346.

60. Vasavada K, Shankar DS, Bi AS, Moran J, Petrera M, Kahan J, et al. Predictors using machine learning of complete peroneal nerve palsy recovery after multiligamentous knee injury: a multicenter retrospective cohort study. Orthop J Sports Med. 2022;10(9):23259671221121410. doi: 10.1177/23259671221121410.

61. Dave U, Lewis EG, Ierulli VK, Saraf SM, Mulcahey MK. Deep vein thrombosis prophylaxis in patients who undergo knee arthroscopy: a systematic review. Knee Surg Relat Res. 2024;36(1):44. doi: 10.1186/s43019-024-00250-5.

62. Afana HB, Ashokan S, Nau T. Venous thromboembolism prophylaxis after anterior cruciate ligament reconstruction: retrospective case-control study. SICOT-J. 2025;11:38. doi: 10.1051/sicotj/2025032.

63. Graf B, Uhr F. Complications of intra-articular anterior cruciate reconstruction. Clin Sports Med. 1988;7(4):835-848. doi: 10.1016/s0278-5919(20)30889-9.

64. Hughston JC. Complications of anterior cruciate ligament surgery. Orthop Clin North Am. 1985;16(2):237-240. doi: 10.1016/s0030-5898(20)30734-3.

65. Konstantinou E, Pfeiffer T, Rocca MS, Grandberg C, Dias K, Musahl V. Prevention and management of postoperative infection after anterior cruciate ligament reconstruction: a narrative review. J Clin Med. 2025;14(2):336. doi: 10.3390/jcm14020336.

66. MacDonald P, Vo A. Complications of posterolateral corner injuries of the knee and how to avoid them. Sports Med Arthrosc Rev. 2015;23(1):51-54. doi: 10.1097/jsa.0000000000000049.

67. Hodel S, Hasler J, Fürnstahl P, Fucentese SF, Vlachopoulos L. Elongation patterns of posterolateral corner reconstruction techniques: results using 3-dimensional weightbearing computed tomography simulation. Orthop J Sports Med. 2022;10(4):23259671221090219. doi: 10.1177/23259671221090219.

Отримано/Received 26.07.2006
Рецензовано/Revised 07.09.2026
Прийнято до друку/Accepted 12.09.2026

Information about authors

Maksym Golovakha, MD, Professor, Head of the Department of Orthopedics and Traumatology, Zaporizhzhia State Medical and Pharmaceutical University, Zaporizhzhia, Ukraine; e-mail: golovahaml@gmail.com; https://orcid.org/0000-0003-2835-9333

Vadim Chorniy, MD, Professor, Professor of the Department of Orthopedics and Traumatology, Zaporizhzhia State Medical and Pharmaceutical University, Zaporizhzhia, Ukraine; e-mail: chorniy.vadim.doc@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-8273-9276

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 did not receive a specific grant from public, commercial, or non-profit funding agencies.

Authors' contribution. M.L. Golovakha — concept and design of the review, critical revision, final approval of the text; V.M. Chorniy — literature search and analysis, drafting the manuscript, formatting the reference list, preparing illustrative material.

M.L. Golovakha, V.M. Chorniy
Zaporizhzhia State Medical and Pharmaceutical University, Zaporizhzhia, Ukraine

Modern concepts of treating posterolateral corner injuries

Abstract. ***Background.*** Posterolateral corner (PLC) injuries remain a challenging clinical problem that often determines treatment outcome in patients with multiligamentous knee injuries; insufficient attention to this region leads to persistent varus-rotational instability. The choice between repair and reconstruction, the timing of intervention, and technical solutions remain debatable. The aim of the study was to summarize current concepts of surgical treatment of PLC injuries based on an analysis of contemporary literature. ***Materials and methods.*** Relevant literature from PubMed, Scopus, and Google Scholar for 2022–2026 was analyzed using topic-related search terms on PLC injuries, together with classic sources from earlier years; this narrative review covers conservative approaches, surgical repair and reconstruction, the rehabilitation protocol, and complications. ***Results.*** Isolated grade I–II injuries respond well to nonoperative treatment, whereas complete tears require surgical management. An acute injury (within 3 weeks) with preserved tissues may be treated with repair, often with augmentation, whereas a chronic injury requires plastic reconstruction; for complete tears, reconstruction shows a higher success rate than isolated primary repair. Anatomic reconstruction of the fibular collateral ligament, popliteofibular ligament, and popliteus tendon outperforms non-anatomic techniques such as biceps tenodesis; among anatomic techniques, the tibial-based approach is more often used clinically, whereas the fibular-based technique with two femoral tunnels shows the lowest residual laxity in biomechanical studies. Rehabilitation includes six weeks of immobilization, restriction of isolated hamstring weightbearing for up to four months, and return to sport at approximately six months. The main complications of surgical treatment are persistent instability, common peroneal nerve injury, deep vein thrombosis, and surgical site infection. Fixed-length popliteus tendon graft fixation is non-anatomic, because the tendon's length changes with tibial rotation during knee flexion, which has been confirmed by data from 3D modeling with axial weightbearing. ***Conclusions.*** Posterolateral reconstruction, especially anatomic one, provides better functional outcomes than isolated repair; at the same time, current techniques only partly reproduce popliteus complex physiology and still require more precise graft fixation points and tensioning.

Keywords: knee joint; posterolateral corner; ligaments; surgical treatment; complications; review

UDC 616.833.58-001.36-036.82:615.825 DOI: https://doi.org/10.22141/1608-1706.5.27.2026.1125

R.A. Kravets[1, 2], V.V. Chorna[1], L.I. Marynych[1], K.P. Postovitenko[1], I.P. Humeniuk[1]
[1]Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine
[2]Center for Medical Rehabilitation and Sports Medicine, Vinnytsia, Ukraine

Comprehensive rehabilitation of scapulothoracic dyskinesia in traction neuropathy of the long thoracic nerve: a clinical case

Abstract. ***Background.*** *Medial-type scapulothoracic dyskinesia caused by neuropathy of the long thoracic nerve (n.thoracicus longus) is a complex orthopedic-neurological condition accompanied by impaired scapular stabilization, dysfunction of the serratus anterior muscle (m.serratus anterior), and significant limitation of the upper extremity function. Timely diagnosis and the application of structured physical therapy are crucial for restoring scapulothoracic kinematics and preventing permanent functional deficits. The purpose was to present a clinical case and evaluate the effectiveness of a comprehensive physical therapy program in a patient with medial scapular winging resulting from traction injury to the long thoracic nerve.* ***Materials and methods.*** *A clinical case analysis was conducted on a 35-year-old male with confirmed long thoracic nerve neuropathy. Diagnostic evaluation included somatoscopy, the wall push-up test, the scapular assistance test, goniometry, manual muscle testing, assessment of pain using a visual analog scale, and electroneuromyography. The 10-week rehabilitation program included therapeutic exercises, neuromuscular electrical stimulation, kinesiotaping, and progressive training of the scapular stabilizers.* ***Results.*** *During rehabilitation, positive clinical progress was observed: a reduction in the intensity of pain, an improvement in active range of motion in the shoulder joint, restoration of strength in the serratus anterior muscle, and normalization of scapulothoracic stabilization. Upon completion of the physical therapy course, the clinical manifestations of medial scapular winging were resolved, and functional activity of the upper extremity was restored.* ***Conclusions.*** *The presented clinical case confirms the effectiveness of comprehensive physical therapy for medial-type scapulothoracic dyskinesia caused by traction neuropathy of the long thoracic nerve. A comprehensive examination using physical tests, goniometry, manual muscle testing, and electroneuromyography made it possible to verify the nerve injury and functional deficit of the serratus anterior muscle.*

Keywords: *scapulothoracic dyskinesia; traction neuropathy; comprehensive neuromuscular rehabilitation; electromyography; clinical case; physical therapy*

Introduction

Scapular winging (scapula alata) is an orthopedic-neurological syndrome that, if not diagnosed in a timely manner, leads to progressive disability. Displacement of the scapula due to paralysis of the serratus anterior muscle (m.serratus anterior) is rare — approximately 15 cases out of 7,000 individuals examined by electromyography. The pathogenesis is based on a persistent disturbance of scapulothoracic kinematics and a loss of scapular stabilization relative to the rib cage. Since the bony structures of the shoulder girdle serve as a fundamental biomechanical support, this pathology leads to a global limitation of the functional potential of the entire upper limb. Patients experience a profound loss of functional independence in daily life: they are unable to flex their arm forward beyond the horizontal plane, cannot perform pushing or pulling actions, and have difficulty with basic self-care tasks (such as moving the arm to comb hair or holding everyday objects). The clinical picture is exa-

© «Травма» / «Trauma» («Travma»), 2026
© Видавець Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2026

Для кореспонденції: Чорна Валентина Володимирівна, доктор медичних наук, капітан медичної служби запасу, доцент, професор, кафедра медицини катастроф та військової медицини, директор ННІ медсестринства, Вінницький національний медичний університет імені М.І. Пирогова, вул. Пирогова, 56, м. Вінниця, 21018, Україна; e-mail: valentina.chorna65@gmail.com; тел.: +380 (67) 919-40-38
For correspondence: Valentyna Chorna, MD, DSc, PhD, Captain of the Medical Service of Reserve, Associate Professor, Professor, Department of Disaster Medicine and Military Medicine, Director of the Educational and Scientific Institute of Nursing, Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Pirogov st., 56, Vinnytsia, 21018, Ukraine; e-mail: valentina.chorna65@gmail.com; phone: +380 (67) 919-40-38
Full list of authors information is available at the end of the article.

cerbated by persistent vertebrogenic-muscular pain and psychological distress due to a pronounced cosmetic defect of the posterior surface of the chest [1, 2].

The anatomical stability of this region is determined by the balanced synergy of the muscular corset, when the serratus anterior muscle plays a leading role. Any initial dysfunction of its fibers triggers the development of medial-type scapulothoracic dyskinesia in which the medial border and caudal angle of the bone are displaced cranially and dorsally. Clinical paralysis of this muscle is, in most cases, a consequence of damage to the long thoracic nerve (LTN, n.thoracicus longus). This nerve trunk is quite long (about 24 cm) and lies close to the surface, making it highly vulnerable to exogenous influences [1, 3].

Three basic categories are identified in the etiological classification of injuries to the n.thoracicus longus [4, 5]:

— traumatic factors: acute high-energy traction (due to sudden depression of the shoulder girdle), compression by bone fragments in cases of clavicle or rib fractures, as well as chronic microtrauma resulting from repetitive eccentric movements in professional sports (volleyball, tennis, boxing);

— iatrogenic injuries: intraoperative trauma during radical mastectomy, axillary lymphadenectomy, or surgical procedures in the interscalene space (scalenectomy);

— non-traumatic (somatic) causes: post-infectious plexitis, acute allergic reactions, and idiopathic neuropathy (Parsonage-Turner syndrome). Up to 17 % of cases have an unknown (idiopathic) etiology.

Differential diagnosis is the cornerstone of clinical management. Medial dyskinesia resulting from paresis of the long thoracic nerve must be clearly distinguished from the lateral type of scapular winging caused by dysfunction of the trapezius muscle (m.trapezius, accessory nerve injury) or the rhomboid muscles. Diagnostic errors in the early stages lead to the incorrect choice of rehabilitation approach and the chronicity of the condition [6].

Given that spontaneous neural recovery remains possible for 6–24 months following purely conductive nerve injury (neurapraxia), the primary objective of the multidisciplinary rehabilitation team is to develop an individualized, pathophysiologically based rehabilitation program. Nevertheless, persistent muscle weakness and scapular biomechanical dysfunction continue beyond two years in approximately 25 % of patients, highlighting the need to establish clear time-based criteria for discontinuing conservative rehabilitation and referring patients for reconstructive surgical intervention.

The present study addresses the clinical challenge posed by the high risk of permanent upper-limb functional impairment associated with delayed diagnosis and inadequate rehabilitation of traction-induced LNT neuropathy. In addition, there is a pressing need to develop and clinically validate comprehensive rehabilitation strategies aimed at restoring normal scapulothoracic kinematics, improving upper-limb function, and enhancing patients' quality of life.

Materials and methods

A clinical case of a 35-year-old man with electromyographically confirmed LTN neuropathy was analyzed. The diagnostic assessment included postural evaluation, the wall push-up test, the scapular assistance test, shoulder goniometry, manual muscle testing, pain assessment using the visual analog scale (VAS), and electroneuromyography (ENMG).

An individualized 10-week comprehensive physical therapy program was developed according to the patient's clinical presentation. The rehabilitation protocol included therapeutic exercises, neuromuscular electrical stimulation, kinesiology taping, and progressive strengthening of the scapular stabilizing muscles. Therapeutic exercises were designed to restore serratus anterior muscle function, improve scapulothoracic stability, normalize the scapulohumeral rhythm, increase shoulder joint range of motion, and progressively restore shoulder girdle muscle strength. The rehabilitation program also incorporated neuromuscular control exercises, proprioceptive training, postural correction, and task-oriented upper-limb functional training. Exercise intensity and progression were individually adjusted according to the patient's clinical response, while avoiding pain provocation and excessive mechanical tension on the long thoracic nerve.

The effectiveness of the rehabilitation program was evaluated by changes in pain intensity, shoulder range of motion, serratus anterior muscle strength, the severity of scapular winging, and upper-limb functional performance following completion of the physical therapy intervention.

The study was conducted in accordance with the principles of the Declaration of Helsinki. Written informed consent was obtained from the patient for participation in the study and publication of anonymized clinical data.

Results and discussion

The scapula plays a pivotal role in upper-limb function by serving as a dynamic platform for glenohumeral joint movement. Coordinated motion between the scapula and the humerus, known as the scapulohumeral rhythm, is achieved through the synergistic action of the scapular stabilizing muscles. Among these, the serratus anterior muscle is the primary dynamic stabilizer and is often referred to as the "boxer's muscle" because of its essential role in shoulder protraction during punching movements [7].

Anatomically, the serratus anterior is a large, fan-shaped muscle located on the lateral wall of the thorax. It originates from the external surfaces of the first eight or nine ribs by a series of muscular digitations and inserts along the medial border and inferior angle of the scapula. Its primary physiological function is to stabilize the scapula by maintaining close apposition of the scapular body to the thoracic wall both at rest and during upper-limb movements. In addition, the serratus anterior produces upward rotation of the scapula about the sagittal axis, a movement that is essential for elevating the arm above the horizontal plane [8].

In addition to the serratus anterior, the stability of the scapulothoracic articulation is maintained by the trapezius muscle, which is innervated by the spinal accessory nerve, and the rhomboid muscles, which receive innervation from the dorsal scapular nerve. Paralysis of any of these scapular stabilizers disrupts normal shoulder girdle biomechanics;

however, dysfunction of the serratus anterior results in the most pronounced functional impairment.

The serratus anterior is innervated exclusively by the LTN, historically referred to as the external respiratory nerve of Bell. The LTN originates from the anterior rami of the fifth, sixth, and seventh cervical spinal nerves (C5-C7) of the brachial plexus.

The long thoracic nerve possesses several distinctive anatomical characteristics that make it particularly susceptible to injury:

1. Considerable length. The nerve extends from the cervical region to the lower lateral thoracic wall, with an average length of approximately 22–24 cm.

2. Superficial anatomical course. After passing posterior to the brachial plexus, the nerve courses over the first rib and then descends along the superficial surface of the serratus anterior muscle. Unlike most peripheral nerves of the upper limb, it is not protected by a substantial muscular layer and is covered only by skin and subcutaneous tissue.

3. Characteristic anatomical landmark. On the surface of the serratus anterior, the long thoracic nerve joins the serratus branch of the thoracodorsal artery, forming a recognizable anatomical configuration commonly referred to as the "goose's foot" (pes anserinus), an important landmark during surgical dissection and nerve identification [9].

These anatomical features render the long thoracic nerve particularly vulnerable to both traction and compression injuries. Consequently, the nerve may be damaged by excessive stretching or external compression following clavicular or rib fractures, as well as during surgical procedures involving the axillary region [10].

Pathophysiological mechanisms of scapular winging

Injury to the LTN results in paresis or complete paralysis of the serratus anterior muscle. Loss of muscle tone compromises the ability of the serratus anterior to maintain the scapula firmly opposed to the thoracic wall. Consequently, under the unopposed action of the antagonist muscles, the scapula displaces posteriorly, superiorly, and medially. Clinically, this deformity is referred to as medial scapular winging (scapula alata).

The pathophysiological severity of LTN injury may vary according to the extent of neural damage and is commonly classified into the following categories:

— Neurapraxia (Sunderland grade I): a transient conduction block without disruption of axonal continuity, typically associated with complete spontaneous recovery.

— Axonotmesis: disruption of the axons with preservation of the connective tissue sheaths (endoneurium, perineurium, and, in most cases, epineurium), allowing axonal regeneration at an average rate of approximately 1 mm/day.

— Neurotmesis: complete anatomical transection of the nerve trunk, resulting in irreversible paralysis unless surgical reconstruction is performed [11].

Following denervation, Wallerian degeneration is initiated within approximately two weeks. Over time, muscle fibers are progressively replaced by adipose and fibrous connective tissue, resulting in muscle atrophy. If reinnervation does not occur within 12–24 months, fibrotic changes become irreversible, rendering conservative functional recovery unlikely.

Biomechanical patterns of scapular winging

Differentiating the biomechanical patterns of scapular winging is essential for understanding the underlying pathophysiology, as each pattern is associated with injury to a specific peripheral nerve.

— Medial scapular winging. The entire scapula is displaced medially toward the spine and elevated, while the medial border protrudes prominently from the thoracic wall, particularly during the wall push-up test. This finding is considered the hallmark of LTN palsy.

— Lateral scapular winging. The scapula is displaced laterally and inferiorly. Prominence of the superior angle is typically associated with spinal accessory nerve injury and trapezius muscle paralysis, whereas prominence of the inferior angle suggests dorsal scapular nerve injury with rhomboid muscle paralysis.

Loss of scapular stability associated with medial scapular winging results in secondary subacromial impingement and restricted shoulder flexion, which is typically limited to approximately 90–120°. This limitation occurs because the glenoid fossa is unable to achieve the optimal position required to maintain normal articulation and dynamic stabilization of the humeral head during arm elevation. Consequently, the pathophysiology of this condition extends beyond isolated neuromuscular injury to encompass a global disturbance of shoulder girdle biomechanics.

The diagnostic algorithm for medial scapular winging caused by LTN neuropathy is based on a comprehensive approach that integrates meticulous clinical examination, specific functional tests, and instrumental confirmation of the severity of neuromuscular involvement. Early and accurate diagnosis is crucial for determining the appropriate management strategy, including the choice between conservative rehabilitation with clinical monitoring and timely surgical intervention when indicated.

Clinical and functional assessment and provocative tests

The initial step in the diagnostic evaluation is a visual assessment of scapular position both at rest and during dynamic movement. In patients with serratus anterior paralysis, a characteristic deformity is observed in which the entire scapula is displaced medially toward the spine and abnormally elevated. The medial border and inferior angle of the scapula lose contact with the thoracic wall, producing the characteristic appearance of scapular winging.

The diagnosis is further supported by the following clinical assessment procedures:

1. Wall push-up test. The patient stands facing a wall with both arms extended forward at shoulder level and performs a wall push-up. The test is considered positive when marked medial prominence of the scapular border becomes evident, indicating failure of the serratus anterior muscle to stabilize the scapula against the thoracic wall during axial loading.

2. Scapular assistance test. The examiner manually assists upward rotation and posterior tilting of the scapula during active shoulder flexion. Improvement in shoulder range of motion and/or reduction in pain indicates that the functional deficit is primarily attributable to impaired scapular stabilization (scapular dyskinesia) rather than intrinsic glenohumeral pathology.

3. Goniometric assessment. Patients with LTN neuropathy typically demonstrate restricted active shoulder flexion, which is frequently limited to approximately 90–120°, because inadequate scapular upward rotation prevents normal arm elevation.

4. Manual muscle testing. Serratus anterior muscle strength is assessed using the standard five-point Medical Research Council grading system. The patient maintains the arm at 90° of shoulder flexion while resisting manual pressure applied by the examiner. Muscle weakness is indicated by medial scapular winging or loss of scapular stability even in response to minimal resistance [12, 13].

Differential diagnosis of scapular winging patterns

An essential step in the diagnostic algorithm is the differentiation between medial and lateral scapular winging, which allows accurate identification of the affected peripheral nerve:

— Medial scapular winging: indicates dysfunction or paralysis of the serratus anterior muscle due to LTN neuropathy (C5-C7).

— Lateral scapular winging: suggests paralysis of the trapezius muscle caused by spinal accessory nerve injury or dysfunction of the rhomboid muscles resulting from dorsal scapular nerve injury. In this condition, the superior angle of the scapula is displaced laterally and inferiorly.

Instrumental verification and imaging assessment

Instrumental diagnostic methods are essential for confirming the diagnosis, determining the severity of neural injury, and estimating the potential for functional recovery.

Electroneuromyography. ENMG is considered the gold standard for confirming the neurogenic origin of scapular winging. This examination enables detection of axonal injury of the long thoracic nerve, assessment of nerve conduction characteristics, and identification of denervation potentials (fibrillation potentials and positive sharp waves) directly within the serratus anterior muscle.

Magnetic resonance imaging. MRI is used to evaluate structural and morphological changes associated with long thoracic nerve dysfunction. It can demonstrate serratus anterior muscle atrophy, fatty infiltration, and potential sites of fibrotic nerve compression. In addition, cervical spine MRI is essential for excluding alternative causes of neuropathy, such as cervical radiculopathy due to intervertebral disc herniation or compressive space-occupying lesions.

Ultrasound examination. High-resolution ultrasound allows assessment of peripheral nerve continuity, detection of structural abnormalities, identification of pseudomeningocele as an indirect sign of nerve root avulsion, and evaluation of surrounding soft tissue structures [14–16].

The diagnostic algorithm also includes assessment of pain intensity using the VAS and evaluation of the impact of the condition on activities of daily living. Functional assessment involves determining the patient's ability to perform self-care activities, evaluating sleep quality, and identifying associated symptoms, including cervical pain (cervicalgia) or Horner syndrome, which may indicate avulsion of the C8-T1 nerve roots.

Thus, a comprehensive diagnostic protocol enables not only the identification of scapular winging but also the determination of its underlying pathophysiological mechanism. This approach provides the essential foundation for developing an effective, individualized physical therapy program [17].

Current strategies in rehabilitation management

The clinical management approach for LTN neuropathy is determined by the underlying etiology, duration of symptom persistence, and the extent of functional impairment. Since most cases involve mechanical injury to the nerve trunk presenting as neurapraxia, a proactive conservative management strategy is considered the preferred approach. This strategy is based on the implementation of multimodal physical therapy programs during the period of expected spontaneous axonal regeneration, which, according to clinical observations, may extend from 6 to 24 months.

Comprehensive rehabilitation and staged rehabilitation protocol

The current evidence-based approach to restoring function in patients with medial-type scapulothoracic dyskinesia is reflected in the three-phase rehabilitation protocol proposed by Watson and Schenkman, which has been incorporated into clinical practice and supported by the American Physical Therapy Association.

Phase 1. Optimization of mobility and targeted pain management (weeks 1–3)

During the acute phase of the pathological process, secondary denervation of the m.serratus anterior is frequently accompanied by pronounced cervicoscapular pain.

Rehabilitation goals include reduction of nociceptive pain, restoration of physiological posture, maintenance and gradual improvement of the available range of motion within the shoulder girdle complex, and preservation of upper-limb functional independence in activities of daily living.

Rehabilitation interventions include graded active-assisted exercises performed under clinical supervision. Exercises are preferentially initiated in the supine position, allowing gravity to serve as a natural stabilizing force for the scapula and facilitating controlled movement patterns.

An important component of this phase is manual myofascial release, including targeted pressure techniques aimed at reducing trigger point activity within the pectoralis minor muscle (m.pectoralis minor). Excessive tone and shortening of the pectoralis minor may contribute to pathological superior and medial displacement of the scapula, thereby ag-

gravating scapular winging and impairing normal scapulothoracic mechanics [18, 19].

Orthotic management. A pathogenetically justified component of rehabilitation involves the continuous use of specialized semi-rigid shoulder girdle orthoses or kinesiology taping techniques designed to provide dorsal fixation of the medial scapular border against the thoracic wall. This biomechanical unloading reduces persistent overstretching of the paretic serratus anterior muscle fibers and creates an optimal mechanical environment for subsequent functional reintegration and recovery.

Phase 2. Early neuromuscular strengthening and restoration of scapular stabilization control (weeks 3–6)

As pain symptoms regress and become stabilized, the therapeutic focus shifts toward active voluntary control and stabilization of the scapulothoracic interface.

Therapeutic objectives include selective strengthening and restoration of the force-generating capacity of the serratus anterior muscle, optimization of proprioceptive stability throughout the upper-limb kinetic chain, and targeted remodeling and maturation of scar tissue in cases of iatrogenic or postsurgical neuropathy.

Clinical interventions. The rehabilitation protocol is expanded through the incorporation of closed kinetic chain exercises. Key components include isometric-dynamic weight-bearing exercises performed against a vertical surface (wall push-up variations) and specific axial protraction movements, such as the serratus anterior punch. Elastic resistance bands (Thera-Band) with progressively increased resistance are used to provide controlled external loading during wall-sliding exercises.

Prevention of contractures and muscular imbalance. Targeted passive stretching and self-stretching techniques are implemented for hypertonic antagonist muscles, including the rhomboid muscles (mm.rhomboidei) and the levator scapulae muscle (m.levator scapulae). This intervention is essential for preventing adaptive shortening and fibrotic remodeling associated with prolonged absence of adequate eccentric control from the paretic serratus anterior muscle.

Phase 3. Progressive synergistic adaptation and complete functional reintegration (from week 6 onward)

During the long-term phase of rehabilitation, restoration of the strength capacity of the serratus anterior muscle enables progression toward comprehensive correction of the scapulohumeral rhythm and reintegration of the upper limb into complex functional movement patterns.

Rehabilitation objectives include increasing the power and endurance capacity of the shoulder girdle musculature and progressively returning the patient to the pre-injury level of occupational or sports participation (return-to-activity/return-to-sports).

Rehabilitation interventions. The rehabilitation program is expanded through synergistic strengthening of the entire shoulder girdle muscular system, with particular emphasis on the middle and lower portions of the trapezius muscle. High therapeutic effectiveness has been demonstrated by symmetrical and asymmetrical upper-limb elevation exercises performed with low-intensity external resistance (1–2 kg) in the prone position. These exercises facilitate coactivation of the cervicothoracic paraspinal stabilizers and bilateral scapular stabilizing musculature.

A priority component of this phase is the implementation of diagonal movement patterns based on proprioceptive neuromuscular facilitation, with emphasis on proximal scapular stabilization. At the final stage, graded axial loading exercises for the upper limbs are safely introduced to prepare the musculoskeletal system for multidirectional closed kinetic chain movements.

Adjunctive rehabilitation methods

Low-frequency neuromuscular electrical stimulation. Application of low-frequency pulsed electrical stimulation directly over the motor points of the serratus anterior muscle and along the anatomical course of the LTN (30-minute sessions performed every other day) may serve as an adjunctive intervention aimed at reducing denervation-related muscle atrophy and supporting neuromuscular recovery.

Modification of activities of daily living. During the early stages of rehabilitation, patients are advised to temporarily limit high-intensity static-dynamic loading and excessive eccentric movements of the upper limb above the horizontal plane in order to minimize the risk of recurrent microtrauma and traction-related stress on the affected nerve trunk [7, 20].

Surgical management strategy

Surgical intervention and reconstructive procedures are considered only in patients with persistent functional deficits despite comprehensive conservative management and structured physical therapy over a period of 12–24 months, which is observed in approximately 25 % of clinical cases.

— Dynamic muscle transfer. The current reconstructive approach most commonly involves transfer of the sternal head of the pectoralis major muscle (m.pectoralis major) to the inferior angle of the scapula. This procedure aims to restore the lost force vector and functional role of the serratus anterior muscle, thereby improving scapular stabilization and upper-limb function.

— Scapulothoracic arthrodesis (scapular fixation). This procedure involves rigid stabilization and fusion of the scapula to the thoracic cage and is considered a salvage procedure for selected patients with severe, persistent scapular dysfunction. However, it is associated with significant biomechanical limitations, including permanent restriction of full-range shoulder abduction, as well as potential respiratory complications resulting from reduced thoracic cage excursion [21–23].

Clinical case

A 35-year-old male patient presented with complaints of persistent dull pain in the right scapular region, pronounced muscle weakness during attempts of active forward elevation (anteflexion) of the right upper limb above the horizontal plane, and a visible deformity of the posterior thoracic

contour associated with scapular protrusion during physical activity.

The patient's medical history revealed that three months prior to the initial examination, he had experienced intensive static-dynamic physical overload, which, based on the clinical presentation, was considered a potential trigger for traction-related injury of the LTN.

During postural examination at rest, medial rotation and posterior displacement of the right scapula relative to the posterior thoracic wall were observed. The inferior angle of the scapula was displaced in a superior and medial direction compared with the contralateral side, representing a characteristic clinical sign associated with dysfunction of the m.serratus anterior.

To verify the functional deficit and assess biomechanical impairments, the following diagnostic protocol was implemented.

Goniometric assessment. Active forward elevation (flexion) of the right shoulder joint was limited to 120°.

Wall push-up test. During isometric weight-bearing against a vertical surface, pronounced posterolateral displacement of the medial scapular border was observed (positive test result), confirming the inability of the serratus anterior muscle to maintain adequate fixation of the scapula against the thoracic wall.

The photographic documentation of the wall push-up test demonstrates a distinct manifestation of medial scapular winging. During isometric pushing movement against the vertical surface, marked displacement of the medial border and inferior angle of the right scapula is observed, with separation from the posterior thoracic wall. This clinical finding provides direct visual evidence of functional insufficiency of the serratus anterior muscle, whose impaired activity prevents adequate stabilization and maintenance of the scapula in its physiological position (Fig. 1).

Scapular assistance test. Manual stabilization and guided correction of scapular kinematics performed by the examiner during active shoulder movement resulted in an immediate increase in the range of shoulder forward elevation. A positive test finding supported the diagnosis of scapular stabilization insufficiency associated with impaired scapulothoracic mechanics and helped differentiate it from primary glenohumeral joint pathology.

Manual muscle testing during 90° shoulder flexion. While the patient maintained the upper limb in a 90° flexed position against examiner-applied resistance, an inability to maintain scapular stability was observed, with immediate detachment of the scapula from the thoracic wall. This finding indicated marked weakness and functional impairment of the serratus anterior muscle fibers.

Differential diagnosis. The clinical assessment allowed clear differentiation between medial scapular winging, associated with LTN neuropathy, and lateral scapular winging, characterized by lateral displacement of the scapula and typically associated with dysfunction of the trapezius muscle due to spinal accessory nerve (n.accessorius) injury or impairment of the rhomboid muscles resulting from dorsal scapular nerve involvement.

Electroneuromyography. Stimulation ENMG demonstrated distinct signs of acute denervation-reinnervation activity within the serratus anterior muscle, accompanied by a substantial reduction in nerve conduction velocity and decreased amplitude of the compound muscle action potential (CMAP/M-response) during stimulation of the long thoracic nerve.

Magnetic resonance imaging. MRI of the cervical spine and thoracic outlet region revealed no space-occupying lesions or degenerative structural abnormalities. These findings excluded vertebrogenic pathology and extramedullary compression affecting the C5-C7 nerve roots and confirmed an isolated traumatic traction-related etiology of LTN neuropathy.

Physical therapy program and clinical dynamics of recovery

Considering the high potential for spontaneous nerve fiber recovery in cases of neurapraxia (with a reported therapeutic window ranging from 6 to 24 months), an individualized conservative rehabilitation strategy was developed for the patient. The intervention was based on a three-phase rehabilitation protocol proposed by Watson and Schenkman, adapted to the patient's functional requirements, symptom severity, and pain tolerance.

Phase 1. Optimization of mobility and initial somatosensory control (weeks 1–3)

Therapeutic objectives. The primary goals of this phase were reduction of pain intensity, prevention of secondary musculoskeletal contractures, and preservation of physiological shoulder range of motion.

Clinical interventions. The patient was advised to temporarily modify daily activities by avoiding shoulder forward elevation and abduction above the horizontal plane (overhead movements). Kinesiotherapy was initiated in the supine position, which reduced the influence of gravity and provided passive stabilization of the scapula against the thoracic wall.

To support neuromuscular activation of the affected muscle, neuromuscular electrical stimulation was applied to the serratus anterior muscle. In addition, kinesiology taping was used to reduce scapular winging by providing external mechanical support and maintaining the medial scapular border closer to the thoracic wall.

The presented photographic series demonstrates the application technique of kinesiology tape, which functioned as a dynamic external support system. The therapeutic effect was achieved through the use of non-elastic or decompressive tape strips applied according to specific anatomical and functional patterns over the right scapula and adjacent muscle groups.

The clinical objective of this intervention was to provide passive mechanical stabilization of the scapula and facilitate its alignment with the posterior thoracic wall. This biomechanical support reduced persistent overstretching of the paretic serratus anterior muscle fibers, decreased pathological scapular prominence, and improved movement mechanics within the scapulothoracic complex during the early

stages of physical rehabilitation (Fig. 2). Fig. 2 demonstrates the technique of kinesiology tape application used for external stabilization of the medial scapular border and the assessment of scapular winging during isometric loading against a vertical surface.

The implementation of low-frequency electrical stimulation in the prone position is presented in Fig. 3. Surface electrodes were placed over the motor points of the serratus anterior muscle and along the anatomical course of the LTN.



Figure 1. Wall push-up test



Figure 2. Kinesiology taping of the right scapula and performance of the wall push-up test with applied tape support

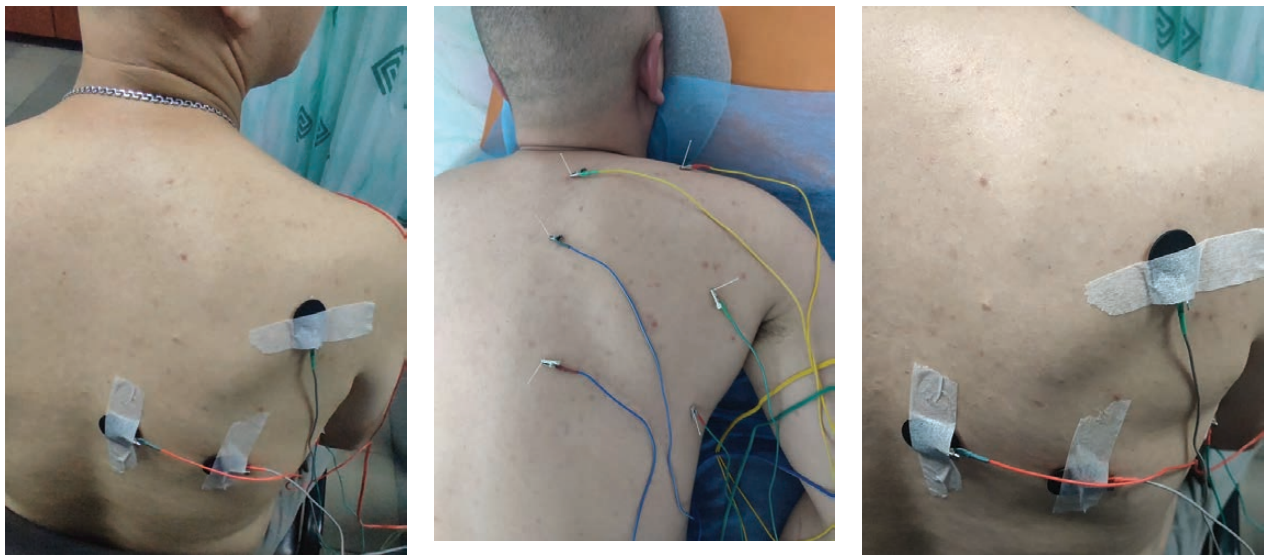


Figure 3. Low-frequency neuromuscular electrical stimulation of the right scapular muscles and the projection area of the LTN



Figure 4. Elastic resistance training for serratus anterior activation and scapular stabilization

The duration of each physiotherapeutic session was 30 minutes, it was performed every other day. The applied intervention was aimed at facilitating neuromuscular activation, maintaining muscle excitability during the period of denervation, and reducing the risk of progressive muscle atrophy associated with impaired neural input (Fig. 3).

Clinical outcome. Following the initial rehabilitation phase, the patient reported significant clinical improvement. Pain intensity measured using the VAS decreased from 6 to 2 points, while the active shoulder flexion range increased by 10°.

Phase 2. Early neuromuscular strengthening and stabilization of the scapulothoracic interface (weeks 3–6)

Therapeutic objective. The main goal of this phase was restoration of muscle force-generating capacity and development of an active scapular stabilization pattern during upper-limb movement.

Clinical interventions. The rehabilitation program focused on isolated and synergistic scapular stabilization exercises. Resistance exercises using elastic bands (Thera-Band) with individually adjusted loading vectors were introduced, along with controlled wall-sliding exercises (wall slides). These interventions enabled safe reintegration of the scapula into the functional kinetic chain of upper-limb movement.

The presented photographic series demonstrates the implementation of therapeutic exercises during different stages of the patient's rehabilitation protocol.

— Wall-sliding exercises. The patient performed the exercise in a standing position facing the wall while maintaining contact with the surface using a towel held by the affected upper limb. Controlled upward and downward sliding movements were performed under continuous scapular control. This biomechanical model was designed to facilitate restoration of shoulder flexion range of motion by providing additional external support and reducing the influence of gravitational loading.

— Elastic resistance training. The presented images demonstrate the use of a Thera-Band elastic resistance band (orange color, corresponding to a low-to-moderate resistance level). The patient performs active scapular protraction against a controlled external resistance vector. This exercise is biomechanically justified for selective strengthening of the serratus anterior muscle and restoration of dynamic scapulothoracic motor control (Fig. 4).

— Prone exercises. The patient performed symmetrical upper-limb elevation exercises in the prone position using low-intensity external resistance (1–2 kg weights). This movement pattern provided enhanced bilateral scapular stabilization through coordinated activation of the rhomboid muscles, the inferior portion of the trapezius muscle, and deep cervicothoracic stabilizing musculature.

Clinical outcome. Manual muscle testing of the serratus anterior muscle demonstrated improvement to 5/5 compared with 4/5 at the beginning of this rehabilitation phase. Residual pain intensity remained stable at 1 point according to the VAS.

Phase 3. Progressive eccentric-concentric adaptation and preparation for complete functional recovery (weeks 6–10)

Therapeutic objective. The primary goal of this phase was complete reintegration of the patient into previous levels of daily and physical activity.

Clinical interventions. The rehabilitation program progressed toward active functional loading through the introduction of low-intensity resistance exercises using free weights (1–2 kg dumbbells) in the prone position. These exercises enabled simultaneous activation of the cervicothoracic paraspinal musculature and scapular stabilizers.

At the final stage of rehabilitation, graded axial loading of the upper limb was safely incorporated to prepare the joint and ligamentous structures for complex three-dimensional movement patterns.

Clinical outcomes and long-term prognosis

Following completion of the 10-week targeted physical therapy program, the patient reported complete resolution of pain symptoms and improvement in overall psychological well-being. Functional parameters of the right shoulder-scapular complex demonstrated substantial recovery, with active forward elevation and shoulder abduction reaching full functional range without compensatory trunk movements.

Repeated functional loading assessment using the wall push-up test revealed the absence of clinically evident medial scapular winging and abnormal scapular rotation, indicating restoration of serratus anterior stabilization capacity and improved tolerance of the LTN to daily functional demands.

To prevent recurrence and maintain the achieved neuromuscular control, the patient received an individualized home exercise program and ergonomic recommendations aimed at minimizing excessive eccentric traction loading of the upper limb.

The prognosis for restoration of full occupational and daily functional capacity was considered favorable.

Conclusions

1. Medial-type scapulothoracic dyskinesia caused by traction neuropathy of the long thoracic nerve represents a complex orthopedic and neurological syndrome characterized by impaired scapular stabilization, resulting in significant limitations of upper-limb function and altered biomechanics of the entire shoulder girdle.

2. A comprehensive clinical and functional assessment, including physical examination tests, evaluation of serratus anterior muscle strength, pain assessment, and analysis of functional limitations, is essential for establishing a pathogenetically grounded diagnosis and developing an individualized rehabilitation strategy.

3. The presented clinical case demonstrates the potential effectiveness of a comprehensive physical therapy approach in patients with medial-type scapulothoracic dyskinesia associated with long thoracic nerve traction neuropathy. A multimodal diagnostic assessment, including functional tests, goniometry, manual muscle testing, and ENMG,

enabled verification of nerve impairment and identification of serratus anterior muscle dysfunction.

4. A phased, individualized rehabilitation program incorporating therapeutic exercises, neuromuscular electrical stimulation, kinesiology taping, and scapular stabilization training contributed to pain reduction, restoration of shoulder girdle function, and improvement of clinical manifestations of scapular winging. These findings support the role of conservative rehabilitation management in selected patients with this condition. An individualized multidisciplinary approach may enhance upper-limb functional recovery, reduce scapular dyskinesia-related impairments, and facilitate timely decision-making regarding surgical intervention in cases of insufficient spontaneous recovery.

Prospective directions for future research

Further research should focus on developing evidence-based rehabilitation strategies for patients with LTN neuropathy-associated scapulothoracic dyskinesia, with particular emphasis on determining the optimal timing, intensity, and duration of physical therapy interventions.

Prospective multicenter studies with larger patient cohorts are required to evaluate the effectiveness of various rehabilitation protocols and to identify clinical predictors of successful spontaneous recovery following traction-related long thoracic nerve injury. Special attention should be given to comparative analysis of conservative management strategies, including therapeutic exercise programs, neuromuscular electrical stimulation, external scapular support techniques, and proprioceptive training.

Future investigations should also aim to establish objective prognostic criteria for differentiating patients who are likely to benefit from prolonged conservative rehabilitation and those requiring early surgical consultation. The integration of ENMG, ultrasound nerve imaging, MRI, and quantitative assessment of scapular kinematics may improve early diagnosis and individualized treatment planning.

Another important area of research is the development and validation of standardized functional assessment protocols for patients with scapular winging, including evaluation of scapular motion patterns, muscle activation strategies, upper-limb functional capacity, and quality-of-life outcomes.

Further studies are needed to investigate the long-term effects of multidisciplinary rehabilitation approaches and to determine their influence on recurrence prevention, return to professional or sports activities, and the necessity for reconstructive surgical procedures in patients with persistent functional deficits.

References

1. Wu F, Ng CY. Long Thoracic Nerve Palsy: When Is Decompression Indicated. J Hand Surg Glob Online. 2023 Jan 27;5(4):519-524. doi: 10.1016/j.jhsg.2022.11.006.

2. Park SB, Weishuhn LJ, Taqi M. Winging of the Scapula. In: StatPearls. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2026 Jan-. Available from: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK541005/?utm_source=chatgpt.com.

3. Didesch JT, Tang P. Anatomy, Etiology, and Management of Scapular Winging. J Hand Surg Am. 2019 Apr;44(4):321-330. doi: 10.1016/j.jhsa.2018.08.008.

4. Zander D, Perlick L, Diedrich O. N. thoracicus longus lesion — a rare injury in weight lifting. Sportverletz Sportschaden. 2000 Dec;14(4):151-4. doi: 10.1055/s-2000-8953 (in German).

5. Berthold JB, Burg TM, Nussbaum RP. Long Thoracic Nerve Injury Caused by Overhead Weight Lifting Leading to Scapular Dyskinesis and Medial Scapular Winging. J Am Osteopath Assoc. 2017 Feb 1;117(2):133-137. doi: 10.7556/jaoa.2017.025.

6. Sahin F, Yilmaz F, Esit N, Aysal F, Kuran B. Compressive neuropathy of long thoracic nerve and accessory nerve secondary to heavy load bearing. A case report. Eura Medicophys. 2007 Mar;43(1):71-4.

7. Jildeh TR, Ference DA, Abbas MJ, et al. Scapulothoracic Dyskinesis: A Concept Review. Curr Rev Musculoskelet Med. 2021;14:246-254/ doi: 10.1007/s12178-021-09705-8.

8. Kibler WB, Sciascia A. Management of scapular dyskinesis in overhead athletes. Operative Techniques in Sports Medicine. 2021;29(1):150797. doi: 10.1016/j.otsm.2021.150797.

9. Kibler WB, Sciascia A. The role of the scapula in preventing and treating shoulder instability. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2016 Feb;24(2):390-7. doi: 10.1007/s00167-015-3736-z.

10. Pires ED, Camargo PR. Analysis of the kinetic chain in asymptomatic individuals with and without scapular dyskinesis. Clin Biomech (Bristol). 2018 May;54:8-15. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2018.02.017.

11. Huang TS, Huang CY, Ou HL, Lin JJ. Scapular dyskinesis: Patterns, functional disability and associated factors in people with shoulder disorders. Man Ther. 2016 Dec;26:165-171. doi: 10.1016/j.math.2016.09.002.

12. Soliño S, Raguzzi I, Castro LV, Porollan JC, Aponte BG, et al. Prevalence of positive modified scapular assistance test in patients with shoulder pain with and without scapular dyskinesis: a cross-sectional study. J Hand Ther. 2024 Jan-Mar;37(1):136-143. doi: 10.1016/j.jht.2023.07.004.

13. Rabin A, Chechik O, Dolkart O, Goldstein Y, Maman E. A positive scapular assistance test is equally present in various shoulder disorders but more commonly found among patients with scapular dyskinesis. Phys Ther Sport. 2018 Nov;34:129-135. doi: 10.1016/j.ptsp.2018.09.008.

14. Borms D, Maenhout A, Berckmans K, Spanhove V, Vanderstukken F, Cools A. Scapulothoracic muscle activity during kinetic chain variations of a prone elevation exercise. Braz J Phys Ther. 2022 May-Jun;26(3):100420. doi: 10.1016/j.bjpt.2022.100420.

15. Berckmans KR, Castelein B, Borms D, Parlevliet T, Cools A. Rehabilitation Exercises for Dysfunction of the Scapula: Exploration of Muscle Activity Using Fine-Wire EMG. Am J Sports Med. 2021 Aug;49(10):2729-2736. doi: 10.1177/03635465211025002.

16. Tsuruike M, Ellenbecker TS, Nishime RS. Electromyographic analysis of the scapular dyskinesis test in a baseball pitcher with a slap lesion: a case report. Int J Sports Phys Ther. 2020 May;15(3):471-477.

17. Van Alfen N. Neuralgic amyotrophy. Muscle & Nerve. 2022;65(4):383-397.

18. Huang TS, Ou HL, Lin JJ. Effects of trapezius kinesio taping on scapular kinematics and associated muscular activation in subjects with scapular dyskinesis. J Hand Ther. 2019 Jul-Sep;32(3):345-352. doi: 10.1016/j.jht.2017.10.012.

19. Tooth C, Schwartz C, Colman D, Croisier JL, Bornheim S, et al. Kinesiotaping for scapular dyskinesis: The influence on scapular kinematics and on the activity of scapular stabilizing muscles. J Electromyogr Kinesiol. 2020 Apr;51:102400. doi: 10.1016/j.jelekin.2020.102400.

20. Holt GR, Althubaiti G, Mackinnon SE. Long thoracic nerve palsy: When is decompression indicated? Journal of Hand Surgery Global Online. 2023;5(1):34-42.

21. Choate WS, Kwapisz A, Tokish JM. Split Pectoralis Major Transfer for Chronic Medial Scapular Winging. Arthrosc Tech. 2017 Oct 2;6(5):e1781-e1788. doi: 10.1016/j.eats.2017.06.050.

22. Sanchez-Urgelles P, Diez Sánchez B, Sanchez-Sotelo J. Serratus anterior palsy secondary to long thoracic nerve dysfunction. JSES Rev Rep Tech. 2025 Feb 28;5(2):170-181. doi: 10.1016/j.xrrt.2025.01.011.

23. Geurkink TH, Gacaferi H, Marang-van de Mheen PJ, Schoones JW, de Groot JH, et al. Treatment of neurogenic scapular winging: a systematic review on outcomes after nonsurgical management and tendon transfer surgery. J Shoulder Elbow Surg. 2023 Feb;32(2):e35-e47. doi: 10.1016/j.jse.2022.09.009.

Received 03.08.2026
Revised 02.09.2026
Accepted 11.09.2026

Information about authors

Rostyslav Kravets, PhD in Medicine, Associate Professor, Head of the Department of Physical and Rehabilitation Medicine, Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: mandrivnik82@gmail.com; PRM doctor, Center for Medical Rehabilitation and Sports Medicine, Vinnytsia, Ukraine; https://orcid.org/0000-0001-9667-0815

Valentyna Chorna, MD, DSc, PhD, Captain of the Medical Service of Reserve, Associate Professor, Professor, Department of Disaster Medicine and Military Medicine, Director of the Educational and Scientific Institute of Nursing, Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: valentina.chorna65@gmail.com; phone: +380 (67) 919-40-38; https://orcid.org/0000-0002-9525-0613

Liubov Marynych, PhD in Medicine, Associate Professor, Department of Internal Medicine 2, Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: lyuba27@gmail.com; https://orcid.org/0000-0003-2191-3477

Kateryna Postovitenko, PhD in Medicine, Associate Professor, Department of Physical and Rehabilitation Medicine, Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: zayazdoc@yahoo.com; https://orcid.org/0000-0002-7122-033X

Ihor Humeniuk, PhD in Medicine, Associate Professor, Department of Physical and Rehabilitation Medicine, Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: gumeniukip@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-9486-8163

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 work was conducted without external funding.

Data availability. The datasets used and/or analyzed in this meta-analysis are available from the corresponding author upon reasonable request.

Authors' contribution. R.A. Kravets, V.V. Chorna — study concept and design, data collection and analysis, responsibility for statistical analysis, drafting the article, critical review, final approval of the article; L. Marynych, I. Gumeniuk — concept and design of the study, critical review, final approval of the article; K. Postovitenko — critical review, final approval of the article.

Кравець Р.А.[1, 2], Чорна В.В.[1], Маринич Л.І.[1], Постовітенко К.П.[1], Гуменюк І.П.[1]
[1]Вінницький національний медичний університет імені М.І. Пирогова, м. Вінниця, Україна
[2]Центр медичної реабілітації та спортивної медицини, м. Вінниця, Україна

Комплексна реабілітація лопатково-грудної дискінезії при тракційній нейропатії довгого грудного нерва: клінічний випадок

Резюме. ***Актуальність.*** Лопатково-грудна дискінезія за медіальним типом, зумовлена нейропатією довгого грудного нерва (n.thoracicus longus), є складним ортопедо-неврологічним станом, який супроводжується порушенням стабілізації лопатки, дисфункцією переднього зубчастого м'яза (m.serratus anterior) та значним обмеженням функції верхньої кінцівки. Своєчасна діагностика і застосування структурованої фізичної терапії мають важливе значення для відновлення лопатково-грудної кінематики й запобігання стійкому функціональному дефіциту. ***Мета:*** подати клінічний випадок та оцінити ефективність комплексної програми фізичної терапії в пацієнта з медіальною крилоподібною лопаткою внаслідок тракційного ушкодження довгого грудного нерва. ***Матеріали та методи.*** Проведено аналіз клінічного випадку підтвердженої нейропатії довгого грудного нерва у чоловіка віком 35 років. Діагностичне обстеження включало соматоскопію, Wall Push-up Test, Scapular Assistance Test, гоніометрію, мануальне м'язове тестування, оцінку больового синдрому за візуально-аналоговою шкалою та електронейроміографічне дослідження. Реабілітаційна програма тривалістю 10 тижнів передбачала терапевтичні вправи, нейром'язову електростимуляцію, кінезіотейпування і прогресивне тренування стабілізаторів лопатки. ***Результати.*** У процесі реабілітації відзначено позитивну клінічну динаміку: зменшення інтенсивності больового синдрому, поліпшення активного обсягу рухів у плечовому суглобі, відновлення сили переднього зубчастого м'яза і нормалізацію лопатково-грудної стабілізації. Після завершення курсу фізичної терапії спостерігалося усунення клінічних проявів медіальної крилоподібної лопатки й відновлення функціональної активності верхньої кінцівки. ***Висновки.*** Наведений клінічний випадок підтверджує ефективність комплексної фізичної терапії при лопатково-грудній дискінезії за медіальним типом, спричиненій тракційною нейропатією довгого грудного нерва. Комплексне обстеження із застосуванням фізикальних тестів, гоніометрії, мануального м'язового тестування й електронейроміографії дозволило верифікувати ураження нерва та функціональний дефіцит переднього зубчастого м'яза.

Ключові слова: лопатково-грудна дискінезія; тракційна нейропатія; комплексна нервово-м'язова реабілітація; електроміографія; клінічний випадок; фізична терапія

Для нотаток



САМОЛІКУВАННЯ МОЖЕ БУТИ ШКІДЛИВИМ ДЛЯ ВАШОГО ЗДОРОВ'Я

Симптоматичне лікування різних видів болю[1-3]

Дексалгін®

декскетопрофену трометамол

Дексалгін® ОРИГІНАЛЬНИЙ ДЕКСКЕТОПРОФЕН

ШВИДКА та ЕФЕКТИВНА знеболювальна дія[1-10]



Інформація про рецептурні лікарські засоби для медичних і фармацевтичних працівників.

Перед застосуванням, будь ласка, обов'язково уважно ознайомтеся з повним текстом чинної інструкції для медичного застосування.

Фармакотерапевтична група. Нестероїдні протизапальні та протиревматичні засоби. Похідні пропіонової кислоти. Код АТХ М01А Е17.

Скорочена інструкція для медичного застосування ДЕКСАЛГІН® (DEXALGIN®)[1]

Склад: 1 таблетка, вкрита плівковою оболонкою, містить декскетопрофену 25 мг. **Показання.** Симптоматична терапія болю від легкого до помірного ступеня, наприклад, м'язово-скелетний біль, болісні менструації (дисменорея), зубний біль. **Протипоказання.** Підвищена чутливість до будь-якого компонента препарату або до іншого НПЗЗ; спричинення подібними речовинами або іншими НПЗЗ нападів бронхіальної астми, бронхоспазму, гострого риніту, розвитку поліпів у носі, кропив'янки або ангіоневротичного набряку; фотоалергічні або фототоксичні реакції на кетопрофен або фібрати; кровотеча або перфорації у травному тракті в анамнезі або в активній фазі, пов'язані із застосуванням НПЗЗ; активна фаза або рецидивуючий перебіг виразкової хвороби; хронічна диспепсія; підвищена кровоточивість; хвороба Крона або неспецифічний виразковий коліт; тяжка серцева недостатність; помірне або тяжке порушення функції нирок; тяжке порушення функції печінки; порушення згортання крові; тяжка дегідратація; III триместр вагітності та період годування груддю. **Спосіб застосування та дози.** Найменша ефективна доза повинна застосовуватись протягом найменшого часу, необхідного для усунення симптомів. Залежно від виду та інтенсивності болю рекомендована доза становить 12,5 мг кожні 4–6 годин або 25 мг кожні 8 годин. Добова доза - не більше 75 мг. Не передбачений для тривалої терапії; лікування триває, поки є симптоми. Таблетки приймати, запиваючи достатньою кількістю рідини, не менше ніж за 30 хвилин до їди. **Побічні реакції.** Часто: нудота та/або блювання, біль у животі, діарея, диспепсія. Безпека та ефективність застосування дітям віком до 18 років не встановлені. **Категорія відпуску.** За рецептом.

Скорочена інструкція для медичного застосування ДЕКСАЛГІН® САШЕ (DEXALGIN® SACHET)[2]

Склад: 1 однодозовий пакет містить декскетопрофену 25 мг. **Показання.** Короткочасне симптоматичне лікування гострого болю від легкого до середнього ступеня [illegible], наприклад, м'язово-скелетний біль, дисменорея та зубний біль. **Протипоказання.** Підвищена чутливість до будь-якого компонента препарату або до іншого НПЗЗ; спричинення подібними речовинами або іншими НПЗЗ нападів бронхіальної астми, бронхоспазму, гострого риніту, розвитку поліпів у носі, кропив'янки, ангіоневротичного набряку; фотоалергічні або фототоксичні реакції на кетопрофен або фібрати; кровотеча або перфорації у травному тракті в анамнезі, пов'язані із застосуванням НПЗЗ або виразковою хворобою [illegible]; підвищена кровоточивість; хвороба Крона або неспецифічний виразковий коліт; тяжка серцева недостатність; помірне або тяжке порушення функцій нирок; тяжке порушення функції печінки; порушення згортання крові; тяжка дегідратація; III триместр вагітності та період годування груддю. **Спосіб застосування та дози.** Найменша ефективна доза повинна застосовуватись протягом найменшого часу, необхідного для усунення симптомів. Залежно від виду та інтенсивності болю рекомендована доза становить 25 мг кожні 8 годин. Добова доза - не більше 75 мг. Розчинити вміст 1 пакета у склянці води, добре перемішати та приймати відразу. **Побічні реакції.** Часто: нудота та/або блювання, біль у животі, діарея, диспепсія. Безпека та ефективність застосування дітям віком до 18 років не встановлені. **Категорія відпуску.** За рецептом.

Скорочена інструкція для медичного застосування ДЕКСАЛГІН® ІН'ЄКТ (DEXALGIN® INJECT)[3]

Склад: 1 мл розчину для ін'єкцій/інфузій містить декскетопрофену 25 мг. **Показання.** Симптоматичне лікування гострого болю середньої та високої [illegible] у випадках, коли пероральне застосування препарату недоцільне, наприклад, при післяопераційних болях, ниркових коліках та болю у попереку. **Протипоказання.** Підвищена чутливість до будь-якого компонента препарату або до іншого НПЗЗ; спричинення подібними речовинами або іншими НПЗЗ нападів бронхіальної астми, бронхоспазму, гострого риніту, розвитку поліпів у носі, кропив'янки або ангіоневротичного набряку; фотоалергічні або фототоксичні реакції на кетопрофен або фібрати; шлунково-кишкові кровотечі або перфорації в анамнезі, пов'язані із терапією НПЗЗ; пептична виразка або кровотеча в активній фазі; хронічна диспепсія; хвороба Крона або неспецифічний виразковий коліт; тяжка серцева недостатність; порушення функції нирок середнього або тяжкого ступеня; тяжке порушення функції печінки; порушення згортання крові; виражена дегідратація; III триместр вагітності та період годування груддю; нейроаксіальне (інтратекальне або епідуральне) введення. **Спосіб застосування та дози.** Вміст однієї ампули [illegible] повільно вводити глибоко у м'язи. Для внутрішньовенної інфузії вміст ампули 2 мл розвести у 30–100 мл 0,9% розчину натрію хлориду, глюкози або Рінгера лактату. Інфузію проводити повільно протягом 10–30 хвилин. При необхідності вміст однієї ампули [illegible] вводити внутрішньовенно повільно протягом не менше 15 секунд. **Побічні реакції.** Часто: нудота, блювання, біль у місці ін'єкції, реакції у місці ін'єкції, у т.ч. запалення, гематома, кровотеча. Безпека та ефективність застосування дітям віком до 18 років не встановлені. **Категорія відпуску.** За рецептом.

[1] Інструкція для медичного застосування лікарського засобу ДЕКСАЛГІН®, РП No UA/9258/01/01, дата останнього перегляду 25.12.2025. [2] Інструкція для медичного застосування лікарського засобу ДЕКСАЛГІН® САШЕ, РП No UA/9258/02/01, дата останнього перегляду 25.12.2025. [3] Інструкція для медичного застосування лікарського засобу ДЕКСАЛГІН® ІН'ЄКТ, РП No UA/3764/01/01, дата останнього перегляду 12.01.2026. [4] Sanchez-Carpena J, et al. Comparison of dexketoprofen trometamol and dipyrone in the treatment of renal colic. Clin Drug Invest 2003, 23:139- 152. [5] Barbanoj MJ, et al. Clinical pharmacokinetics of dexketoprofen. Clin Pharmacokinet 2001, 40:245-262. [6] Marenco JL, et al. A multicentre, randomised, double-blind study to compare the efficacy and tolerability of dexketoprofen trometamol versus diclofenac in the symptomatic treatment of knee osteoarthritis. Clin Drug Invest 2000, 19:247-256. [7] Metscher B, et al. Dexketoprofen trometamol and tramadol in acute lumbago. Fortschr Med Orig 2001, 118:147-151. [8] Leman P, et al. Randomised controlled trial of the onset of analgesic efficacy of dexketoprofen and diclofenac in lower limb injury. Emerg Med J 2003, 20:511-513. [9] Ay MO, et al. Comparison of the Analgesic Efficacy of Dexketoprofen Trometamol and Meperidine HCl in the Relief of Renal Colic. American Journal of Therapeutics 2013, May 9, 1-8. [10] Karaman Y, et al. Efficacy of Dexketoprofen trometamol for acute postoperative pain relief after ENT surgery: a comparison with paracetamol and metamizole. Nobel Medicus, 2010, 6(2), 47-52.

*Внутрішні дані компанії

BERLIN-CHEMIE MENARINI

Представництво "Берлін-Хемі/А. Менаріні Україна ГмбХ". Адреса: м. Київ, вул. Березняківська, 29.
Тел.: +38 (044) 494 33 88. E-mail: berlin-chemie@menarini.com.ua

UA-Dex-01-2026-V1-Press. Останній перегляд 03.06.2026.