



Травма

www.mif-ua.com

25
років

Том 26, № 4, 2025

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

Travma

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

Том 26, № 4, 2025

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

Volume 26, № 4, 2025

Включений в наукометричні і спеціалізовані бази даних

Scopus,

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



Травма

Travma

Спеціалізований рецензований
науково-практичний журнал

Том 26, № 4, 2025

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



Засновник журналу:
Донецький національний медичний
університет

Адреса редакції:
E-mail: medredactor.vdz@gmail.com
(Тема: До редакції журналу «Травма»)
Телефон: +38 (067) 325-10-26
www.mif-ua.com, http://trauma.zaslavsky.com.ua

Електронні адреси для звертань
З питань публікації статей
fedorklimovitskiy@gmail.com
medredactor.vdz@gmail.com

З питань розміщення реклами
та інформації про лікарські засоби
v_iliyna@ukr.net

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

Рекомендовано до друку та до поширення через мережу Інтернет вченою радою Донецького національного медичного університету, протокол № 2 від 27.02.2025 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. 9,42.
Тираж 8000 прим. Зам. 2025-trauma-127.

Видавець Заславський О.Ю.
zaslavsky@i.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 2128 від 13.05.2005

Друк: ТОВ «Ландпрес»

Головний редактор

Климовицький Федір Володимирович
(Лиман, Україна)

Заступник головного редактора

Чорний Володимир Сергійович
(Київ, Україна)

Відповідальний секретар

Гузовська М.Д. (Краматорськ, Україна)

Редакційна колегія

Бондаренко С.Є. (Харків, Україна),
Бур'янов О.А. (Київ, Україна),
Головач І.Ю. (Київ, Україна),
Зазірний І.М. (Київ, Україна),
Страфун С.С. (Київ, Україна),
Тяжелов О.А. (Харків, Україна),
Філіпенко В.А. (Харків, Україна),
Чернишова О.Є. (Краматорськ, Україна),
Hagen Schmal (Фрайбург-ім-Брайсгау,
Німеччина),
Robert Smigielski (Варшава, Польща),
Francesco Benazzo (Павія, Італія)

Редакційна рада

Анкін М.Л. (Київ, Україна),
Головаха М.Л. (Запоріжжя, Україна),
Гур'єв С.О. (Київ, Україна),
Климовицький Р.В. (Лиман, 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, 2025
© НДІ травматології та ортопедії Донецького національного медичного університету, 2025
© Заславський О.Ю., 2025

Травма

Travma

Specialized reviewed
practical scientific journal

Volume 26, № 4, 2025

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



Founder:
**Donetsk National Medical
University**

Editorial office address:

E-mail: medredactor.vdz@gmail.com

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

Tel.: +38 (067) 325-10-26

www.mif-ua.com, <https://trauma.zaslavsky.com.ua>

Correspondence addresses

Editorial office address

fedorklimovitskiy@gmail.com

medredactor.vdz@gmail.com

**Advertising and Drug
Promotion Department**
v_iliyna@ukr.net

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

Recommended for publication and distribution over the Internet by the scientific council of the Donetsk National Medical University, protocol No. 2 dated 27.02.2025

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, Kropyvnytskyi, Yu. Kovalenka st., 4a

In Ukrainian and English

Folio: 60x84/8. Printer's sheet 9,42.

Circulation 8000. Order 2025-trauma-127.

Publisher Zaslavsky O.Yu.
zaslavsky@i.ua

Publishing entity certificate
ДК № 2128 dated 13.05.2005

Print: Landpress Ltd.

Editor-in-Chief

Klymovytsky Fedir

(Lyman, Ukraine)

Deputy Editor-in-Chief

Chorny Volodymyr

(Kyiv, Ukraine)

Executive Secretary

Huzovska Maria (Kramatorsk, Ukraine)

Editorial Board

Bondarenko S.Y. (Kharkiv, Ukraine),

Burianov O.A. (Kyiv, Ukraine),

Golovach I.Yu. (Kyiv, Ukraine),

Zazirny I.M. (Kyiv, Ukraine),

Strafun S.S. (Kyiv, Ukraine),

Tyazhelov Olexiy (Kharkiv, Ukraine),

Filipenko V.A. (Kharkiv, Ukraine),

Chernyshova O.Y. (Kramatorsk, Ukraine),

Hagen Schmal (Freiburg im Breisgau, Germany),

Robert Smigielski (Warszawa, Poland),

Francesco Benazzo (Pavia, Italia)

Editorial Council

Ankin M.L. (Kyiv, Ukraine),

Golovaha M.L. (Zaporizhzhia, Ukraine),

Guryev S.O. (Kyiv, Ukraine),

Klymovytsky R.V. (Lyman, 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, 2025
© Research and Development Institute of Traumatology and Orthopedics of Donetsk National Medical University, 2025
© Zaslavsky O.Yu., 2025

Зміст

Оригінальні дослідження

Лябах А.П., Турчин О.А., Пятковський В.М., Харчик В.С., Євлантьєва Т.А. Порівняльний аналіз результатів застосування операції Сайма та транстибіальної ампутації у пацієнтів із вогнепальними ушкодженнями нижньої кінцівки.....	5
Долгополов О.В., Безрученко С.О., Занько І.С., Суворов В.Л., Карпінська О.Д., Карпінський М.Ю. Моделювання роботи м'язів лопатки при згинанні верхньої кінцівки в плечовому суглобі	12
Hussain J. Alkhatteib, Sarah Mazin Naeem Вплив традиційного бандажування на час загоєння переломів передпліччя в дітей порівняно з сучасними методами	20
Левицький А.Ф., Соколовський Ю.Л., Лиходій В.В., Ковальчук Д.Ю. Сучасна тактика лікування надвиросткових переломів плечової кістки у дітей та підлітків II типу за класифікацією Gartland: огляд літератури та метааналіз	31
Суворов В.Л., Кулик Ю.А., Дем'ян Ю.Ю., Полулях Д.М., Євлантьєва Т.А., Ларкевич О.Г., Козік Є.В., Карпінська О.Д. Ефективність і ризики зовнішньої фіксації при переломах великогомілкової кістки: метааналіз методів Ілізарова і Тейлора	39
Коноваленко С.В., Проценко В.В., Тихонов В.Г., Солоніцин Є.О., Гребенніков Ю.К., Коноваленко В.Ф., Терновий М.К. Вивчення комбінованої дії модулюючих факторів на репаративний остеогенез	48
Чорна В.В., Гринзовський А.М., Калашченко С.І., Нестерова С.Ю., Лотоцька Л.Б., Губар А.М. Оцінка ефективності та ризиків застосування турнікетів у ЗСУ під час бойових дій в Україні.....	57
Yasser Reda Mohamed, Mohammed Kanal Asal, Ahmed Mohamed Mohasseb, Waleed Elsayd Elshabrawy, Amr Mohamed Nagy, Ayman Fathy Mounir Чи потрібно використовувати цемент у пацієнтів похилого віку? Ефективність безцементної ніжки з гідроксиапатитовим покриттям у первинному ендопротезуванні кульшового суглоба в літніх осіб	64
Бур'янов О.А., Смик О.О. Використання клаптя переднього велико- гомілкового м'яза для створення ВДММ при транстибіальній ампутації для запобігання утворенню невроми поверхневого мало- гомілкового нерва: опис хірургічної техніки.....	70
Штробля В.В. Потенціювальний вплив транскутанного введення вуглекислого газу на протизапальний ефект диклофенаку натрію та хондроїтину сульфату в експериментальній моделі остеоартриту	76

Contents

Original Researches

A.P. Liabakh, O.A. Turchyn, V.M. Piatkovskiy, V.S. Kharchyk, T.A. Yevlantieva Comparative analysis of the results of the Syme's operation and transtibial amputation in patients with gunshot injuries of the lower limb	5
O.V. Dolhopolov, S.O. Bezruchenko, I.S. Zanko, V.L. Suvorov, O.D. Karpinska, M.Yu. Karpinsky Modeling the work of the shoulder muscles during upper limb flexion in the shoulder joint.....	12
Hussain J. Alkhatteib, Sarah Mazin Naeem Effect of traditional bracing vs. modern techniques on healing time in pediatric forearm fractures.....	20
A.F. Levytskyi, Yu.L. Sobolevskiy, V.V. Lykhodii, D.Yu. Kovalchuk Modern tactics of treatment for Gartland II supracondylar fractures of the humerus in children and adolescents: a literature review and meta-analysis.....	31
V.L. Suvorov, Yu.A. Kulyk, Yu.Yu. Demian, D.M. Poluliakh, T.A. Yevlantieva, O.H. Larkevych, Ye.V. Kozik, O.D. Karpinska Effectiveness and risks of external fixation in fractures of the tibia: a meta-analysis of the Ilizarov and Taylor methods	39
S.V. Konovalenko, V.V. Protsenko, V.H. Tykhonov, Ye.O. Solonitsyn, Yu.K. Hrebennikov, V.F. Konovalenko, M.K. Ternovyi Study of the modulating factors combined action on reparative osteogenesis	48
V.V. Chorna, A.M. Hrynzovskiy, S.I. Kalashchenko, S.Yu. Nesterova, L.B. Lototska, A.M. Hubar Assessment of the effectiveness and risks of using tourniquets in the Armed Forces of Ukraine during hostilities in Ukraine	57
Yasser Reda Mohamed, Mohammed Kanal Asal, Ahmed Mohamed Mohasseb, Waleed Elsayd Elshabrawy, Amr Mohamed Nagy, Ayman Fathy Mounir Do we really need cement in elderly patient? Efficacy of hydroxyapatite cementless femoral stem in primary hip arthroplasty in elderly patients.....	64
O.A. Burianov, O.O. Smyk Use of tibialis anterior muscle VDMT flip flap in transtibial amputation to prevent superficial peroneal nerve neuroma formation: a surgical technique description.....	70
V.V. Shtroblia Potentiating effect of transcutaneous carbon dioxide administration on the anti-inflammatory properties of sodium diclofenac and chondroitin sulfate in a rat model of osteoarthritis.....	76

Лябах А.П., Турчин О.А., Пятковський В.М., Харчик В.С., Євлантьєва Т.А.
ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», м. Київ, Україна

Порівняльний аналіз результатів застосування операції Сайма та транстибіальної ампутації у пацієнтів із вогнепальними ушкодженнями нижньої кінцівки

Резюме. Актуальність. Операція Сайма у пацієнтів з вогнепальними пораненнями стопи має низку переваг, однак її виконують дуже рідко. **Мета:** провести порівняльний аналіз функціональної спроможності та якості життя у пацієнтів із вогнепальною травмою нижньої кінцівки після операції Сайма та транстибіальної ампутації (ТТА). **Матеріали та методи.** 46 пацієнтів віком 20–63 роки із вогнепальними ушкодженнями нижньої кінцівки та їх наслідками, яким виконали операцію Сайма (I група, 10 пацієнтів) та транстибіальну ампутацію (II група, 36 пацієнтів). Тяжкість ушкодження кінцівки визначали за Hannover Fracture Score 98, функціональний результат оцінювали за Short Musculoskeletal Function Assessment (SMFA), якість життя — за EQoL-5D-5L. **Результати.** Не було суттєвих відмінностей у значеннях середніх, що характеризували вік, тяжкість ушкодження кінцівки та кількість операцій до госпіталізації. Результати лікування були оцінені у всіх пацієнтів у строки від 1 до 10 років. Пацієнти, яким виконали операцію Сайма, мали вірогідно кращі показники середніх за застосованими системами оцінки порівняно із пацієнтами, які перенесли ТТА. Середнє значення нормованого індексу неспроможності (SMFA) у пацієнтів I групи становило 0,13 проти 0,22 у пацієнтів II групи ($p = 0,006$; двовибірковий t -тест). Якість життя поранених, що входили до I групи, за EQoL-5D-5L (VAS) була кращою, ніж у пацієнтів II групи (83,6 та 75,4 відповідно, $p = 0,04$; двовибірковий t -тест), за рахунок сегментів «мобільність», «активність», «тривожність/депресія» (відповідно $p = 0,02$; $0,04$; $0,01$; двовибірковий t -тест). **Висновки.** Операція Сайма забезпечує кращий функціональний результат лікування за SMFA та кращу якість життя за EQoL-5D-5L, ніж ТТА. Це обумовлює можливість більш широкого застосування операції Сайма у пацієнтів із вогнепальною травмою нижньої кінцівки у показаних випадках.

Ключові слова: вогнепальна травма; нижня кінцівка; операція Сайма; транстибіальна ампутація; якість життя

Вступ

Суттєвими елементами сучасної війни є краща виживаність поранених та зростання частки ушкоджень нижньої кінцівки. Згідно з даними М.Т. Mazurek та ін. [1], виживаність поранених в американській армії з часів II Світової війни зросла з 69,7 до 88,6 % під час військової операції в Іраку. Паралельно з виживаністю у структурі вогнепальної травми зросла і частка ушкоджень нижньої кінцівки — до 87 % при застосуванні вибухових пристроїв [2]. Серед усіх поранень частка ампутацій кінцівок, за різними да-

ними, коливається від 2,3 до 5,2 % [3, 4], переважну більшість становлять ампутації нижньої кінцівки (АНК). У структурі АНК при вогнепальних пораненнях транстибіальна ампутація (ТТА) займає більше 40 % і є найчастіше виконуваною ампутацією при вогнепальній травмі нижньої кінцівки [5]. Екзартикуляцію стопи (операцію Сайма) в травматичних випадках загалом і при вогнепальній травмі стопи зокрема практикують нечасто — до 1,5 % від усіх ампутацій нижньої кінцівки [5]. Ця операція має набагато більший ужиток в хірургії діабетичної стопи та у

дітей при вроджених вадах розвитку нижньої кінцівки [6]. Однак операція Сайма має низку суттєвих переваг, серед яких можливість повного навантаження на торець кукси та збереження пропріоцепції робить її реальною альтернативою ТТА у показаних випадках [7, 8].

Дані щодо застосування операції Сайма у пацієнтів із вогнепальною травмою стопи та її наслідками обмежені кількістю випадків та частотою в окремих публікаціях. Вдалось знайти лише один систематичний огляд, присвячений операції Сайма у пацієнтів різних нозологічних груп, опублікований у 2018 році R. Braaksma та ін. [9]. У ньому показана фрагментарність та низька доказовість публікацій, що висвітлюють результати операції Сайма у пацієнтів із травмою та її наслідками. Одним із висновків їхнього систематичного огляду є рекомендація щодо порівняльного аналізу результатів операції Сайма та її логічної альтернативи — ТТА.

Нам не вдалось виявити досліджень, присвячених операції Сайма, у сучасній українській науковій літературі. Наша нещодавня публікація щодо застосування операції Сайма у випадках вогнепальних ушкоджень стопи [10] та достатній досвід у виконанні ТТА зробили можливим проведення порівняльного дослідження стосовно переваг та недоліків означених хірургічних втручань у пацієнтів із вогнепальними ушкодженнями нижньої кінцівки.

Мета роботи: провести порівняльний аналіз функціональної спроможності та якості життя у пацієнтів із вогнепальною травмою нижньої кінцівки після операції Сайма та транстибіальної ампутації.

Матеріали та методи

Під нашим спостереженням перебували 46 пацієнтів із вогнепальними ушкодженнями нижньої кінцівки та їх наслідками, яким виконали операцію Сайма (І група, 10 пацієнтів) та транстибіальну ампутацію (ІІ група, 36 пацієнтів). Усі пацієнти отримали вогнепальні поранення під час російсько-української війни, починаючи з 2014 року. Дослідження схвалене вченою радою інституту (протокол № 8 від 2023 р.), його проведення відповідало засадам Гельсінської декларації з

прав людини та вимогам локального комітету з біоетики. Інформована згода отримана від усіх пацієнтів. Дизайн дослідження: ретроспективне, паралельні групи. Усі пацієнти були чоловіками віком 20–63 роки (у середньому $37,9 \pm 2,9$ року); військовослужбовців ЗСУ та НГУ було відповідно 42 та 1, цивільних поранених — 3. Пацієнти були розділені на дві групи: І — операція Сайма, ІІ — ТТА.

Критерії включення до дослідження: однобічні відкриті переломи кісток стопи та гомілки внаслідок вогнепальної травми, оцінка функціонального результату лікування не раніше ніж 1 рік після операції.

У більшості пацієнтів переважав мінно-вибуховий механогенез вогнепального ушкодження (протипіхотні міни, імпровізований вибуховий пристрій, підрив у машині), у інших — осколкові поранення з дією вибухової хвилі або без такої. Тяжкість відкритого перелому визначали за класифікацією Gustilo-Anderson, згідно з якою переважна більшість ушкоджень підпадали під ІІІ ступінь. Розподіл пацієнтів за механізмом вогнепального ушкодження та тяжкістю відкритого перелому наведений в табл. 1.

Коректність порівняльного аналізу оцінювали з урахуванням віку, часу з моменту поранення, кількості проведених хірургічних втручань, тяжкості ушкодження кінцівки. Пацієнтам І групи була проведена операція Сайма у модифікації з дотриманням протоколу післяопераційної підготовки до протезування, прийнятого у відділенні патології стопи [10].

Методика ТТА у пацієнтів ІІ групи передбачала видалення камбалоподібного та м'язів заднього глибокого футляра, міодез литкового м'яза. У переважній більшості пацієнтів (27 випадків) був сформований довший задній клапоть, у 4 — сагітальні та у 5 — ситуаційні шкірні клапті.

Тяжкість ушкодження кінцівки визначали за Hannover Fracture Score 98 (HFS-98) [11] у балах, критична сума яких (≥ 11) є пороговою для встановлення показань до ампутації.

Для оцінки результатів лікування були застосовані Short Musculoskeletal Function Assessment (SMFA) [12], EQoL-5D-5L. SMFA була застосована для оцін-

Таблиця 1. Розподіл пацієнтів за механізмом вогнепального ушкодження та тяжкістю відкритого перелому

Показник	Операція Сайма	ТТА
Механізм вогнепального ушкодження		
Протипіхотна міна	4	20
Імпровізований вибуховий пристрій	1	—
Підрив у машині	1	3
Осколкове поранення	4	13
Тяжкість відкритого перелому за Gustilo-Anderson		
II		4
IIIA	2	4
IIIB I	4	3
IIC	4	25
Усього: 46	10	36

ки функціонального стану пацієнтів до операції та в динаміці спостереження. SMFA — опитувальник, що містить 46 пунктів, які відображають фізичний стан, функціональну спроможність пацієнта та психологічний компонент. Сума балів визначає функціональний дефіцит — більше значення відображає більшу втрату функції. Отримане числове значення переводили у нормований індекс неспроможності.

Інструмент EQoL-5D-5L [13] був використаний для оцінки якості життя у двох рекомендованих доменах — VAS і за відповідними сегментами фізичного та психічного функціонування: мобільність, самообслуговування, активність, біль/самообслуговування, тривожність/депресія. Використання опитувальника зареєстровано авторами статті для некомерційного застосування у EQoL Research Foundation (<https://euroqol.org/>) 18.12.2023 р., номер реєстрації 60833.

Отримані дані заносили в електронні таблиці, розраховували описову статистику (середнє, стандартна помилка, довірчі інтервали). Суттєвість відмінностей між середніми визначали за допомогою двовибіркового t-тесту при рівні значимості 95 % ($p < 0,05$). Розрахунки проводили в середовищі Microsoft Office Excel 2013 з використанням наданого пакета програм.

Результати

Пацієнти обох груп не мали суттєвих відмінностей у значеннях середніх, що характеризували вік, тяжкість ушкодження кінцівки та кількість операцій до госпі-

талізації. Натомість середня тривалість лікування до госпіталізації в клініку суттєво відрізнялась: $74,3 \pm 27,8$ дня у пацієнтів, яким виконали операцію Сайма, проти $229,4 \pm 32,5$ дня у тих, кому провели ТТА. Показники деталізовані у табл. 2. Відсутність суттєвої різниці за віком та тяжкістю ушкодження кінцівки робить коректним подальший порівняльний аналіз.

Вихідний стан пацієнтів I групи за SMFA був вірогідно гіршим, середнє значення індексу неспроможності становило 0,58 проти 0,51 у пацієнтів II групи ($p = 0,01$; двовибірковий t-тест). За EQoL-5D-5L (VAS) вихідний стан пацієнтів I та II груп суттєво не відрізнявся ($49,3$ та $43,9$ відповідно; $p = 0,3$; двовибірковий t-тест), проте за профілем якості життя в усіх сегментах оцінки стан пацієнтів I групи був гіршим, ніж у пацієнтів II групи (табл. 3, рис. 1). Статистично вірогідна різниця між середніми встановлена за сегментами «самообслуговування» та «активність» (відповідно $p < 0,001$; $0,01$; двовибірковий t-тест); різниця між середніми в інших сегментах була невірогідною.

Результати лікування були оцінені у всіх пацієнтів у строки від 1 до 10 років, вони відображені в табл. 4. Пацієнти обох груп мали суттєве поліпшення функціональної спроможності (SMFA) та загального стану здоров'я (EQoL-5D-5L (VAS)) ($p < 0,001$; парний t-тест). Однак пацієнти, яким виконали операцію Сайма, мали вірогідно кращі показники середніх за застосованими системами оцінки порівняно з пацієнтами, які перенесли ТТА. Так, середнє значення норма-

Таблиця 2. Вихідні дані пацієнтів на момент госпіталізації

Досліджений показник	Групи пацієнтів; $M \pm \sigma$, min–max		p^* , при $\alpha = 0,05$
	Операція Сайма	ТТА	
Вік, роки	$37,7 \pm 4,1$; 23–54	$38,1 \pm 1,8$; 20–63	0,9
Кількість операцій	$6,7 \pm 1,2$; 3–12	$6,4 \pm 0,8$; 2–21	0,85
Тривалість лікування, дні	$74,3 \pm 27,8$; 3–180	$229,4 \pm 32,5$; 1–720	0,001
Тяжкість ушкодження за HFS-98, бали	$19,9 \pm 2,7$; 12–31	$23,6 \pm 1,1$; 12–34	0,1

Примітка: * — двовибірковий t-тест.

Таблиця 3. Результати лікування пацієнтів за SMFA та EQoL-5D-5L

Показник	Операція Сайма	ТТА	$p^{\dagger}$, при $\alpha = 0,05$
SMFA			
До лікування	$0,58 \pm 0,02$ (0,54–0,68) ДІ 95% 0,55; 0,61	$0,51 \pm 0,02$ (0,24–0,72) ДІ 95% 0,47; 0,55	0,01
Після лікування	$0,13 \pm 0,02$ (0,07–0,21) ДІ 95% 0,09; 0,17	$0,22 \pm 0,01$ (0,07–0,38) ДІ 95% 0,2; 0,24	0,006
p^* , при $\alpha = 0,05$	$< 0,001$	$< 0,001$	
EQoL-5D-5L			
До лікування	$49,3 \pm 4,1$ (30–60) ДІ 95% 42,5; 56,1	$43,9 \pm 2,1$ (20–70) ДІ 95% 39,7; 48,1	0,3
Після лікування	$83,6 \pm 3,0$ (75–95) ДІ 95% 78,6; 88,6	$75,4 \pm 1,5$ (48–85) ДІ 95% 72,5; 78,3	0,04
p^* , при $\alpha = 0,05$	$< 0,001$	$< 0,001$	

Примітки: * — парний t-тест, $\dagger$ — двовибірковий t-тест.

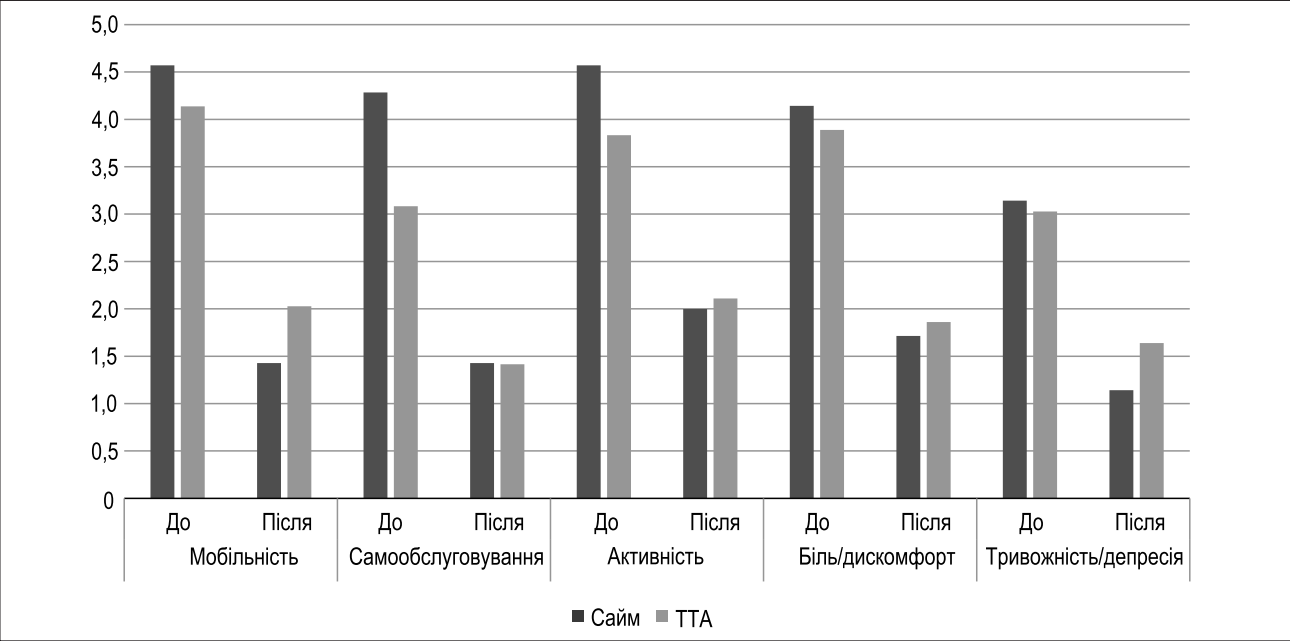


Рисунок 1. Динаміка профілю якості життя у пацієнтів, що перенесли операцію Сайма та ТТА

ного індексу неспроможності у пацієнтів I групи становило 0,13 проти 0,22 у пацієнтів II групи ($p = 0,006$; двовибірковий t-тест).

Якість життя поранених, що входили до I групи, за EQoL-5D-5L (VAS) була кращою, ніж у пацієнтів II групи (83,6 та 75,4 відповідно, $p = 0,04$; двовибірковий t-тест).

Аналіз результатів лікування за сегментами EQoL-5D-5L дозволив порівняти динаміку профілю якості життя у пацієнтів обох груп. Цифрові дані наведені в табл. 4, а їх графічна інтерпретація — на рис. 1.

Динаміка середніх за всіма сегментами EQoL-5D-5L у пацієнтів обох груп свідчить про суттєвий ефект лі-

кування ($p < 0,001$; парний t-тест), однак порівняння середніх між групами дозволяє виявити переваги та недоліки операції Сайма та ТТА. Серед пацієнтів, що перенесли операцію Сайма, мобільність та активність були вірогідно кращими, а рівень тривожності/депресії був вірогідно нижчим, ніж у пацієнтів, що перенесли ТТА (відповідно $p = 0,02$; $0,04$; $0,01$; двовибірковий t-тест).

Дискусія

Проблема лікування тяжкої травми нижньої кінцівки, зокрема вогнепальної, нерозривно пов’язана з необхідністю виконання ампутацій. Особливістю сучас-

Таблиця 4. Динаміка профілю якості життя за EQoL-5D-5L за сегментами фізичного та психічного функціонування

Показник	Операція Сайма	ТТА	p*, при $\alpha = 0,05$
Мобільність			
До лікування	4,6 ± 0,2	4,1 ± 0,2	0,1
Після лікування	1,4 ± 0,2	2,00 ± 0,05	0,02
Самообслуговування			
До лікування	4,3 ± 0,2	3,1 ± 0,1	< 0,001
Після лікування	1,4 ± 0,2	1,4 ± 0,1	0,95
Активність			
До лікування	4,6 ± 0,2	3,80 ± 0,15	0,01
Після лікування	2,7 ± 0,1	2,1 ± 0,1	0,04
Біль/дискомфорт			
До лікування	4,1 ± 0,3	3,9 ± 0,2	0,4
Після лікування	1,7 ± 0,2	1,9 ± 0,1	0,5
Тривожність/депресія			
До лікування	3,1 ± 0,3	3,0 ± 0,2	0,7
Після лікування	1,1 ± 0,1	1,6 ± 0,1	0,01

Примітка: * — двовибірковий t-тест.

ної війни є значна кількість вогнепальних ушкоджень нижньої кінцівки, які у структурі всієї вогнепальної травми скелета становлять більше ніж 50 % [14].

Сучасні медичні технології значно розширюють можливості збереження тяжко травмованої нижньої кінцівки та повернення їй опороздатності, однак у певних випадках наявний анатомічний дефект, поліструктурність ушкодження, прогнозована тривалість лікування та деякі інші фактори є вагомими умовами на користь ампутації [15]. Збереження опорної поверхні п'яткової ділянки у низці випадків робить можливим проведення операції Сайма, яка має відомі переваги перед ТТА: довга резидуальна кінцівка, можливість повної опори без протеза, менша вартість протезування [7, 8]. Стосовно операції Сайма у випадках вогнепальної травми в доступних літературних джерелах можливо знайти дані лише щодо кількості цих операцій у структурі всієї вогнепальної травми нижньої кінцівки.

Проведений нами порівняльний аналіз результатів операції Сайма та ТТА у пацієнтів із вогнепальними ушкодженнями нижньої кінцівки є першим в літературі. Слід сказати, що досліджень якості життя та функціонального стану пацієнтів із травмою, що перенесли операцію Сайма, у літературі небагато. Про це свідчить систематичний огляд, проведений R. Braaksma та ін. [9] у 2018 р. Їхнє дослідження налічує 1056 пацієнтів: 238 дітей та 818 дорослих. 213 дорослих пацієнтів перенесли операцію Сайма з приводу травм нижньої кінцівки та її наслідків, інші — з приводу трофічних розладів стопи різної етіології, переважно цукрового діабету. Автори звертають увагу читача на гетерогенність клінічного матеріалу, значну кількість описань клінічних випадків та відсутність застосування систем оцінки, що у цілому унеможливило проведення метааналізу.

Середня тривалість лікування у пацієнтів II групи (ТТА) була суттєво більшою, ніж у пацієнтів I групи (операція Сайма) — 229 днів проти 74 днів ($p = 0,001$). Це відображає тривалість реконструктивного лікування при намаганнях зберегти опороздатну нижню кінцівку у випадках тяжкої вогнепальної травми гомілки при збереженні або відносно збереженні стопи. В.Ф. Plucknette та ін. [16] порівняли функціональні результати після ТТА за методиками Е.М. Burgess та J. Ertle (варіант міжгомількового синостозування). Серед іншого вони показали, що тривалість лікування від моменту травми до фінальної операції становила в середньому 58 та 297 днів відповідно. Така суттєва ($p = 0,0001$) різниця була обумовлена тим, що операцію J. Ertle звичайно проводили як реампутацію з метою поліпшити анатомо-функціональні характеристики резидуальної кінцівки.

Порівняння вихідного стану пацієнтів обох груп за тяжкістю травми є не зовсім коректним, оскільки порівнянню підлягають дві різні анатомічні ділянки — стопа (операція Сайма) та гомілка, можливо разом із стопою (ТТА). Тяжкість ушкодження в балах за HFS-98 між пацієнтами обох груп не мала суттєвої різниці

між середніми ($p = 0,1$), значення яких були більше критичного показника (≥ 11).

Але порівняння функціонального стану та якості життя дає можливість знехтувати некоректністю анатомічного порівняння, оскільки обидві системи оцінки — SMFA та EQoL-5D-5L є опитувальниками, які відображають виключно оцінку свого стану пацієнтом. Обидві системи оцінки є пацієнтоорієнтованими, мають добрий психометричний профіль та достатній рівень валідності, що у сукупності дозволяє мінімізувати можливість ризику упередженості.

Згідно з отриманими даними, результат лікування у пацієнтів I групи був кращим за обома системами оцінки, хоча функціональний стан до операції за SMFA був гіршим у пацієнтів I групи. Оцінка якості життя до операції за усіма сегментами EQoL-5D-5L також свідчить про гірший вихідний стан пацієнтів I групи, хоча вірогідна різниця між середніми виявилась тільки за сегментами «самообслуговування» та «активність». Оцінка якості життя після операції показала статистично значиму різницю між середніми в сегментах «мобільність», «активність» та «тривожність/депресія»; пацієнти I групи мали кращий рівень мобільності та активності, були менше схильні до тривожності та депресії.

Переваги та недоліки дослідження. Проведене дослідження є першим в літературі, показує кращі функціональну спроможність та якість життя пацієнтів із вогнепальною травмою, яким виконали операцію Сайма, порівняно із пацієнтами, що перенесли ТТА.

У зв'язку з невеликою кількістю пацієнтів, що ввійшли до I групи, та достатньою анатомічною гетерогенністю клінічного матеріалу висновки з результатів порівняльного аналізу мають бути достатньо обережними.

Висновок

У пацієнтів із вогнепальними пораненнями нижньої кінцівки операція Сайма при порівнянні із ТТА забезпечує кращий функціональний результат лікування за SMFA та кращу якість життя за EQoL-5D-5L. Це обумовлює можливість більш широкого застосування операції Сайма у пацієнтів із вогнепальною травмою нижньої кінцівки у показаних випадках.

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

Інформація про фінансування. Додаткове фінансування відсутнє.

Схвалення до публікації. Усі автори прочитали фінальний текст рукопису і схвалили його.

Внесок авторів. Лябах А.П. — ідея дослідження, формулювання висновку; Турчин О.А. — літературний пошук та аналіз літературних джерел; Пятковський В.М., Харчик В.С. — участь у формуванні електронної бази даних, статистичний аналіз; Євлантьєва Т.А. — анкетування пацієнтів, участь у статистичному аналізі.

Список літератури

1. Mazurek MT, Ficke JR. The scope of wounds encountered in casualties from the global war on terrorism: from the battlefield to the tertiary treatment facility. *J Am Acad Orthop Surg.* 2006;14(10 Spec No.):S18-23. doi: 10.5435/00124635-200600001-00005.
2. Ramasamy A, Masouros SD, Newell N, Hill AM, Proud WG, Brown KA et al. In-vehicle extremity injuries from improvised explosive devices: current and future foci. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 2011;366(1562):160-70. doi: 10.1098/rstb.2010.0219.
3. Potter BK, Scoville CR. Amputation is not isolated: an overview of the US Army Amputee Patient Care Program and associated amputee injuries. *J Am Acad Orthop Surg.* 2006;14(10 Spec No.):S188-90. doi: 10.5435/00124635-200600001-00041.
4. Stansbury LG, Lalliss SJ, Branstetter JG, Bagg MR, Holcomb JB. Amputations in U.S. military personnel in the current conflicts in Afghanistan and Iraq. *J Orthop Trauma.* 2008 Jan;22(1):43-6. doi: 10.1097/BOT.0b013e31815b35aa.
5. Krueger CA, Wenke JC, Ficke JR. Ten years at war: comprehensive analysis of amputation trends. *J Trauma Acute Care Surg.* 2012;73(6 Suppl 5):S438-44. doi: 10.1097/TA.0b013e318275469c.
6. Dillon MP, Quigley M, Fatone S. Outcomes of dysvascular partial foot amputation and how these compare to trans-tibial amputation: a systematic review for the development of shared decision-making resources. *Syst Rev.* 2017;6(1):54. doi: 10.1186/s13643-017-0433-7.
7. Hudson JR, Yu GV, Marzano R, Vincent AL. Syme's amputation. Surgical technique, prosthetic considerations, and case reports. *J Am Podiatr Med Assoc.* 2002;92(4):232-46. doi: 10.7547/87507315-92-4-232.
8. Pinzur MS. Restoration of walking ability with Syme's ankle disarticulation. *Clin Orthop Relat Res.* 1999;361(4):71-5. doi: 10.1097/00003086-199904000-00010.
9. Braaksma R, Dijkstra PU, Geertzen JHB. Syme Amputation: a systematic review. *Foot Ankle Int.* 2018;39(3):284-291. doi: 10.1177/1071100717745313.
10. Лябах А.П., Турчин О.А., Євлантьєва Т.А., Харчик В.С. Операція Сайма при лікуванні вогнепальних ушкоджень стопи. *Ортопедія, травматологія та протезування.* 2024;2:5-10. Doi: 10.15674/0030-5987202425-10.
11. Seekamp A, Kontopp H, Tscherne H. Hannover fracture scale '98: reevaluation and new prospects for an established score system. *Unfallchirurg.* 2001;104(7):601-10.
12. Swiontkowski MF, Engelberg R, Martin DP, Agel J. Short musculoskeletal function assessment questionnaire: validity, reliability, and responsiveness. *J Bone Joint Surg Am.* 1999 Sep;81(9):1245-60. doi: 10.2106/00004623-19990.
13. Delvin N, Parkin D, Janssen B. Methods for analyzing and reporting EQ-5D data (eBook). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-47622-9>.
14. Melcer T, Walker J, Bhatnagar V, Richard E, Sechriest 2nd VF, Galarneau M. A comparison of four-year health outcomes following combat amputation and limb salvage. *PLoS One.* 2017;12(1):e0170569. doi: 10.1371/journal.pone.0170569.
15. Bosse MJ, Teague D, Reider L, Gary JL, Morshed S, Seymour RB et al. Outcomes after severe distal tibia, ankle, and/or foot trauma: comparison of limb salvage versus trans-tibial amputation (OUTLET). *J Orthop Trauma.* 2017;31(Suppl 1):S48-S55. doi: 10.1097/BOT.0000000000000799.
16. Plucknette BF, Krueger CA, Rivera JC, Wenke JC. Combat-related bridge synostosis versus traditional transtibial amputation: comparison of military-specific outcomes. *Strategies Trauma Limb Reconstr.* 2016;11(1):5-11. doi: 10.1007/s11751-015-0240-4.

Отримано/Received 20.05.2025

Рецензовано/Revised 04.06.2025

Прийнято до друку/Accepted 15.06.2025

Information about authors

Andrii P. Liabakh, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Foot Pathology and Complex Prosthetic Treatment, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: anliabakh@gmail.com; phone: +380 (97) 901-03-64; <https://orcid.org/0000-0001-5734-2392>

Olena A. Turchyn, MD, DSc, PhD, Head of the Department of Foot Pathology and Complex Prosthetic Treatment, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: olenaturch@gmail.com; phone: +380 (44) 486-26-89, +380 (97) 901-02-71; <https://orcid.org/0000-0002-8668-7063>

Volodymyr M. Piatkovskiy, PhD in Medicine, Senior Research Fellow, Department of Foot Pathology and Complex Prosthetic Treatment, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: piatk1981@gmail.com; phone: +380 (95) 770-00-74; <https://orcid.org/0000-0001-5448-8759>

Vasyl S. Kharchyk, Junior Research Fellow, Department of Foot Pathology and Complex Prosthetic Treatment, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: kharchik11@gmail.com; phone: +380 (50) 138-26-42; <https://orcid.org/0009-0006-7436-2524>

Tetiana A. Yevlantiya, Junior Research Fellow, Department of Foot Pathology and Complex Prosthetic Treatment, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: tyevlantiya@gmail.com; phone: +380 (97) 494-46-96; <https://orcid.org/0009-0009-6251-2814>

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 additional funding available.

Approval for publication. All authors read and approved the final manuscript.

Authors' contribution. A.P. Liabakh — research idea, formulation of conclusion; O.A. Turchyn — literary search and analysis of literary sources; V.M. Piatkovskiy, V.S. Kharchyk — participation in the formation of an electronic database, statistical analysis; T.A. Yevlantiya — patient questionnaires, participation in statistical analysis.

A.P. Liabakh, O.A. Turchyn, V.M. Piatkovskiy, V.S. Kharchyk, T.A. Yevlantiya
Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine

Comparative analysis of the results of the Syme's operation and transtibial amputation in patients with gunshot injuries of the lower limb

Abstract. Background. Syme's operation in patients with gunshot injuries of the foot has a number of advantages, but it is performed very rarely. The aim was to conduct a comparative analysis of func-

tional capacity and quality of life in patients with gunshot injuries of the lower limb after Syme's operation and transtibial amputation (TTA). **Materials and methods.** Forty-six patients aged 20–63 years

with gunshot injuries of the lower limb and their consequences who underwent Syme's operation (group I, 10 patients) and TTA (group II, 36 patients). The severity of limb injury was determined by the Hannover Fracture Scale-98, functional outcome was assessed by the Short Musculoskeletal Function Assessment (SMFA), and quality of life was assessed by the EQoL-5D-5L. **Results.** There were no significant differences in the mean values characterizing age, severity of limb injury and number of surgeries prior to hospitalization. Outcomes were assessed in all patients in terms from 1 to 10 years. Patients who underwent Syme's operation had significantly better mean scores on the applied scoring systems compared to patients who underwent TTA. The mean value of standardized disability index (SMFA) in pa-

tients of group I was 0.13 vs 0.22 in patients of group II ($p = 0.006$; two-sample t-test). The quality of life of the injured in group I, according to EQoL-5D-5L (VAS), was better than that in patients of group II (83.6 and 75.4 respectively, $p = 0.04$; two-sample t-test) due to the mobility, activity, anxiety/depression segments ($p = 0.02$; 0.04; 0.01, respectively; two-sample t-test). **Conclusions.** Syme's operation provides a better functional outcome according to SMFA and a better quality of life according to EQoL-5D-5L than TTA. This makes it possible to use Syme's operation more widely in patients with gunshot injuries of the lower limb in indicated cases.

Keywords: gunshot injury; lower limb; Syme's operation; trans-tibial amputation; quality of life

Долгополов О.В.¹, Безрученко С.О.¹, Занько І.С.¹, Суворов В.А.¹, Карпінська О.Д.²,
Карпінський М.Ю.²

¹ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», м. Київ, Україна

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

Моделювання роботи м'язів лопатки при згинанні верхньої кінцівки в плечовому суглобі

Резюме. Актуальність. Лопатка і ключиця відіграють ключову роль у стабілізації та передачі навантажень від верхньої кінцівки до тулуба. Підняття руки передбачає рух як у гленоплечовому суглобі, так і в лопатково-грудному зчленуванні. При поєднаному пошкодженні структур цих суглобів порушується як цілісність кісткового кільця надпліччя, так і м'язово-зв'язковий баланс. **Мета:** визначити величину сили та крутних моментів, які створюють м'язи, відповідальні за стабілізацію лопатки та ключиці при згинанні руки. **Матеріали та методи.** Базова модель — тривимірна модель плеча та верхньої кінцівки для моделювання динаміки руки в реальному часі, включаючи незалежний м'язовий контроль лопатки та ключиці. Аналізували силу та крутний момент, які створюють м'язи, відповідальні за стабілізацію лопатки при згинанні (підйомі руки) вперед на 90°. Проводили аналіз роботи таких м'язів: *mm. rhomboideus, trapezius scapularis та clavicularis, serratus anterior (upper), levator scapulae*. **Результати.** Під час флексії плеча до 90° лопатка виконує латероротацію, підлаштовуючи свою позицію до руху плечової кістки. Це критично важливо для збереження підакроміального простору, запобігання імпіджменту й забезпечення плавного руху. *Serratus anterior (lower)* — головний ініціатор латероротації лопатки при флексії плеча. Його крутний момент найвищий у перших 20–30°, що критично для «розгону» руху. До 60° флексії активність *serratus anterior (lower)* є максимальною, саме тут формується найбільший крутний момент, як показує графік. Після 60°: функція стабілізації переходить до трапеції, *serratus* працює менш активно (ізометрично). Основна силова пара для стабільного руху лопатки при флексії складається з *serratus anterior (lower)* та *trapezius (upper/lower)*, які забезпечують контрольовану латероротацію. Саме ці м'язи розвивають найбільші моменти при русі руки вперед — з *serratus anterior (lower)* на початку руху, *trapezius (upper/lower)* — при куті, близькому до 90°. Інші м'язи (*rhomboideus, levator scapulae*) модулюють і обмежують надмірні рухи, утримуючи лопатку стабільною. **Висновки.** За даними моделювання визначено, що основними м'язами-стабілізаторами лопатки при флексії плеча є *serratus anterior (lower)* і *trapezius*. Саме ці м'язи створюють максимальні крутні моменти при русі руки вперед. Через анатомічне положення цих м'язів — безпосереднє кріплення до найбільш рухомих ділянок лопатки — при переломі ці м'язи втрачають опору для створення моменту, що призводить до значного обмеження рухів верхньої кінцівки та порушення стабільності лопатки.

Ключові слова: плечовий суглоб; лопатка; згинання; м'язи; ізометрична сила; момент сили

Вступ

Поєднані переломи лопатки та ключиці є рідкісною травмою, яка зазвичай виникає внаслідок високоенергетичного механізму, зокрема вогнепального або мінно-вибухового поранення у пацієнтів із бойовою травмою, і становить 3–5 % усіх переломів плечового пояса та 1 % від загальної кількості переломів у ци-

вільних пацієнтів [1]. Вперше така комбінація переломів була описана Ganz та Noesberger у 1975 році, і для її позначення було запропоновано термін «флотуюче плече» (floating shoulder) [2]. У 1993 році Goss та ін. запровадили термін «верхній плечовий підвісний комплекс» (superior suspensory shoulder complex (SSSC)), який включає в себе кісткові та м'якотканинні струк-

тури, що забезпечують біомеханіку плечового суглоба, зокрема: гленіод лопатки, дзюбоподібний відросток лопатки, дзюбоподібно-ключичні зв'язки, надплечово-ключичний суглоб, надплечовий кінець ключиці та надплечовий відросток лопатки [3]. Згодом поняття «флотуюче плече» було відокремлено і стало називатись «подвійне пошкодження верхнього плечового підвісного комплексу» (double disruption of the SSSC) [4]. Обидва ці анатомічні утворення (лопатка і ключиця) відіграють ключову роль у стабілізації та передачі навантажень від верхньої кінцівки до тулуба. Ключиця забезпечує зв'язок між грудним скелетом і лопаткою, підтримуючи правильне положення останньої, тоді як лопатка є основою для прикріплення численних м'язів, що забезпечують рухи плечового суглоба. Підняття руки передбачає рух як у гленоплечовому суглобі, так і в лопатково-грудному зчленуванні. При поєднаному пошкодженні структур цих суглобів порушується як цілісність кісткового кільця надпліччя, так і м'язово-зв'язковий баланс. Це може призводити до серйозних обмежень у русі верхньої кінцівки, включаючи зниження можливості відведення, згинання, обертання у плечовому суглобі, а також до асиметрії плечового поясу. Механізми компенсації з боку м'язів-антагоністів і стабілізаторів стають неефективними, що ускладнює функціональне відновлення. Особливо вираженими є порушення координації між рухами лопатки та плечової кістки (так званий scapulohumeral rhythm), що додатково посилює дисфункцію, а лікування травм такого типу вже багато років є предметом дискусій, і наразі не існує єдиної думки щодо оптимального підходу до лікування.

Мета: визначити величину сили та крутних моментів, які створюють м'язи, відповідальні за стабілізацію лопатки та ключиці при згинанні руки.

Матеріали та методи

Моделювання проводили в пакеті OpenSim [5] — відкритій платформі, яка розроблена в Центрі біомедичних обчислень NIH Стенфордського університету для м'язово-скелетного моделювання, яка дозволяє будувати цифрові моделі людського тіла, відтворювати рухи та оцінювати внутрішні біомеханічні параметри, як-от м'язові сили, реактивні навантаження в суглобах тощо.

Базова модель для DAS3 — це тривимірна модель плеча та верхньої кінцівки для моделювання динаміки руки в реальному часі, включаючи незалежний м'язовий контроль лопатки та ключиці [6].

Аналізували силу та крутний момент, які створюють м'язи, відповідальні за стабілізацію лопатки при згинанні (підйомі руки) вперед на 90° [7].

Проводили аналіз роботи таких м'язів:

— *mm. rhomboideus*. Група глибоких власних м'язів плеча, які разом з груднино-ключично-соскоподібним, трапецієподібним, грудним м'язами, найширшим м'язом спини і переднім зубчастим м'язом утворюють плечовий пояс. М'язи відводять, піднімають і обертають лопатку, розгинають медіальний край

лопатки, утримуючи її в положенні на задній грудній стінці;

— *trapezius scapularis* та *clavicularis*. Трапецієподібний м'яз має три частини. Верхня підтримує руку, середня втягує лопатку, нижня бере участь у медіальному повороті й притисканні лопатки;

— *serratus anterior (upper)*. Великий плоский зубчастий м'яз, розташований на бічній стінці грудної клітки, під лопаткою. Основні функції: втягує лопатку вперед, від хребта, що необхідно для таких рухів, як віджимання, кидання і піднімання рук; допомагає обертати лопатку вгору, що дозволяє піднімати руку вище 90°, та утримує лопатку притиснутою до грудної клітки, запобігаючи її відшаруванню (так звана крилоподібна лопатка);

— *levator scapulae*. Функція підіймача лопатки полягає в піднятті лопатки і нахилі порожнини гленіоду донизу шляхом обертання лопатки донизу.

На графіках крутних моментів враховуємо модульні значення. Крутні моменти враховують напрямок дії сили, і при зростанні від'ємних значень це не зниження моменту, а зміна напрямку дії [8, 9].

Результати

При підйомі руки вперед до 90° біомеханіка плечового поясу включає складну взаємодію між плечовим (гленогумеральним), лопатково-грудним (скапулоторакальним) та іншими суглобами з акцентом на рух лопатки, який є ключовим для забезпечення повного діапазону руху [10].

При підйомі руки вперед до 90° відбувається комбінація рухів у кількох суглобах: плечовий суглоб (гленіод) забезпечує флексію плечової кістки; ключично-грудинний комплекс дозволяє рухи лопатки відносно грудної клітки; груднино-ключичний та надплечово-ключичний суглоби забезпечують рух ключиці, що сприяє позиціонуванню лопатки. Для забезпечення плавного руху плеча співвідношення між рухом гленогумерального суглоба та лопатки становить приблизно 2 : 1 (скапулогумеральний ритм). Наприклад, на кожні 2° флексії в гленогумеральному суглобі припадає 1° руху лопатки [11].

При флексії руки до 90° лопатка виконує кілька типів рухів у скапулоторакальному комплексі. Верхня ротація: нижній кут лопатки зміщується латерально та вгору, а верхній кут — медіально та вниз приблизно на кут 20–30° (залежно від індивідуальних особливостей). Це основний рух, який дозволяє акроміальному відростку лопатки піднятися та уникнути імпінджменту (затискання) структур в субакроміальному просторі. Задній нахил: нижній кут лопатки дещо відхиляється назад (постеріорно) на кут до 10–15°, що допомагає підтримувати субакроміальний простір. Латеральне зміщення: лопатка злегка зміщується вперед і латерально навколо грудної клітки, адаптуючись до руху руки вперед. Ці незначні рухи забезпечують оптимальне позиціонування гленіодальної порожнини для підтримки плечової кістки та максимізації діапазону руху.

Рухи лопатки контролюються кількома ключовими м'язами. Верхній пучок трапецієподібного м'яза сприяє верхній ротації та підйому лопатки. Нижній пучок трапецієподібного м'яза стабілізує нижній кут лопатки та сприяє верхній ротації. Передній зубчастий м'яз (*serratus anterior*) — основний м'яз для верхньої ротації та латерального зміщення лопатки, утримує її біля грудної клітки. Ромбоподібні м'язи та середній пучок трапецієподібного м'яза стабілізують лопатку, запобігаючи надмірному латеральному зміщенню. Грудний малий м'яз (*pectoralis minor*) може сприяти задньому нахилу та стабілізації.

Ключиця також відіграє важливу роль. У груднино-ключичному суглобі відбувається підйом (*elevation*) і задня ротація ключиці, що дозволяє лопатці рухатися вгору. В надплечово-ключичному суглобі відбувається незначна ротація, що сприяє адаптації акроміона до руху лопатки.

Розглянемо роботу м'язів, відповідальних за рух лопатки та ключиці при згинанні руки до 90°.

Trapezius clavicular (верхній пучок трапецієподібного м'яза) бере початок від зовнішнього потиличного горбка, медіальної третини верхньої шийної лінії потиличної кістки та зв'язки пучкає, прикріплюючись до заднього краю латеральної третини ключиці. *M. trapezius clavicular* відіграє важливу роль у флексії руки, сприяючи руху лопатки. Він забезпечує верхню ротацію, підйом та стабілізацію лопатки. Флексія руки, особливо до 90°, передбачає підйом руки вперед, що вимагає скоординованого руху плечового (гленоумерального) суглоба та лопатково-грудного (скапуло-торакального) комплексу. М'яз сприяє ритму плечолопаткового суглоба через прикріплення до ключиці та лопатки.

У результаті моделювання активності верхнього пучка трапецієподібного м'яза під час флексії верхньої

кінцівки встановлено, що до кута 30–35° м'язова сила (рис. 1а) залишається практично незмінною в межах 10,75–11,0 Н, що свідчить про її переважну стабілізуючу функцію на початкових етапах підйому кінцівки. Проте зі збільшенням кута згинання відзначається стрімке зростання необхідного зусилля — до 12,75 Н при досягненні 90°. Основний біомеханічний вплив на м'яз зумовлений рухом ключиці, однак під час флексії її амплітуда обмежена, тому й зміна м'язового зусилля залишається незначною.

Крутний момент (рис. 1б), що створюється верхнім пучком трапецієподібного м'яза (*m. trapezius, pars clavicularis*), змінюється у відносно вузькому діапазоні — від 0,05 до 0,3 Н·м, причому його динаміка більше залежить від напрямку руху, ніж від абсолютної сили.

M. trapezius scapularis (середній пучок трапецієподібного м'яза) (рис. 2в) виконує стабілізаційну та контрольну функцію під час флексії руки до 90°. Середні волокна м'яза йдуть до медіального краю акроміального відростка та верхнього краю ості лопатки. При флексії плеча до 90° середній пучок трапецієподібного м'яза не є основним рушієм руху, але є критично важливим стабілізатором. Він забезпечує кінематичну синхронізацію між рухом плечової кістки та лопатки. У фазі від 60° до 90° флексії середній пучок сприяє ретракції лопатки, зберігаючи її в оптимальному положенні при русі руки в сагітальній площині.

Отже, за результатами моделювання при нульовому положенні руки (рука вздовж тіла) лопатка намагається відхилитися від задньої поверхні ребер, тому *m. trapezius scapularis* розвиває силу у межах 600 Н для утримання лопатки на місці. Але при підйомі руки до кута 60° лопатка природно притягається до ребер. При подальшій флексії відбувається протракція лопатки, тому для її стабілізації збільшується сила м'яза, що і відображено на діаграмі (рис. 2а). Через те, що м'яз

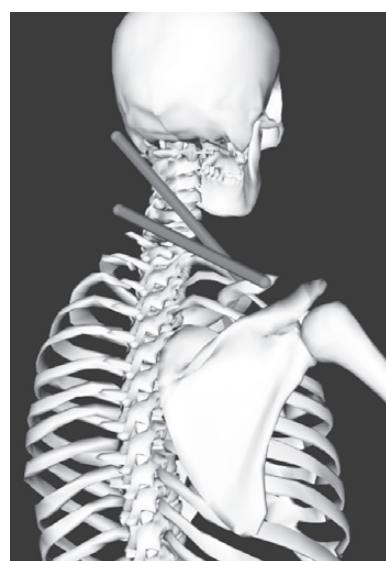
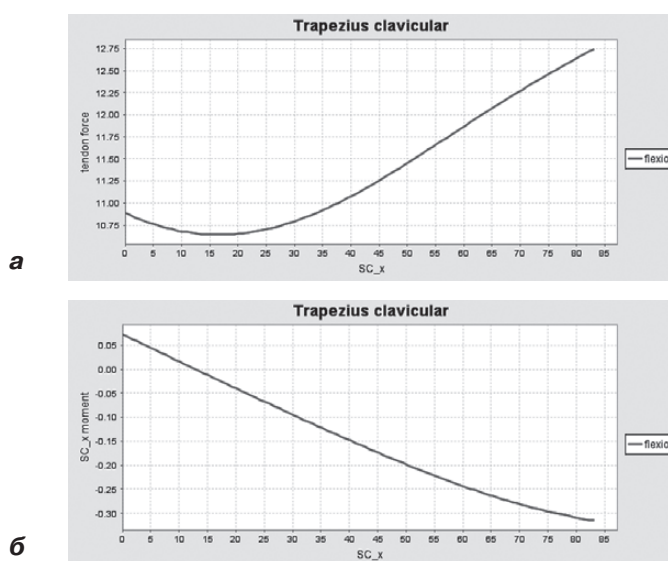


Рисунок 1. Сила (а) та крутний момент (б), які створює *m. trapezius clavicular* при флексії верхньої кінцівки на 90° (в)

впродовж всього циклу згинання руки працює в одному напрямку на скорочення, крутний момент (рис. 2б) має вигляд плавно спадаючої кривої.

М'яз *rhomboideus* (ромбоподібний м'яз) (рис. 3в). Його основні функції полягають у приведенні лопатки до хребта, підніманні медіального краю лопатки, фіксації лопатки до грудної стінки. При підйомі прямої руки вперед до 90° лопатка обертається латерально (вгору), при цьому активуються *m. trapezius* та *m. serratus anterior*. Для стабілізації лопатки *rhomboideus* тягне її медіально та вниз, тобто сприяє медіальній ротації. Стабілізатор лопатки утримує її біля хребта, особливо при статичному навантаженні.

За даними моделювання, при згинанні плеча до кута 50–60° (рис. 3а) сила ромбоподібного м'яза лишається

майже на одному рівні, тобто помірно змінюється від 0 Н при опущеній кінцівці до 70 Н. На цьому інтервалі флексії кінцівки рух лопатки незначний, що і показує графік. Але при подальшому згинанні після 60° спостерігається наростання сили ромбоподібного м'яза з максимумом у 350 Н при куті 90°. Саме при флексії кінцівки більше за 60°, як було сказано вище, починаються активні рухи лопатки та, відповідно, зростає сила м'язів, відповідальних за її стабілізацію. Крутний момент, який створює *m. rhomboideus* (рис. 3б) починає стрімко зростати саме після флексії 60°.

M. serratus anterior (передній зубчастий м'яз). *Serratus anterior* (upper) (рис. 4в) починається від верхніх ребер (1–2) і тягнеться до верхнього кута лопатки. Фіксує верхній кут лопатки на початку руху, тобто

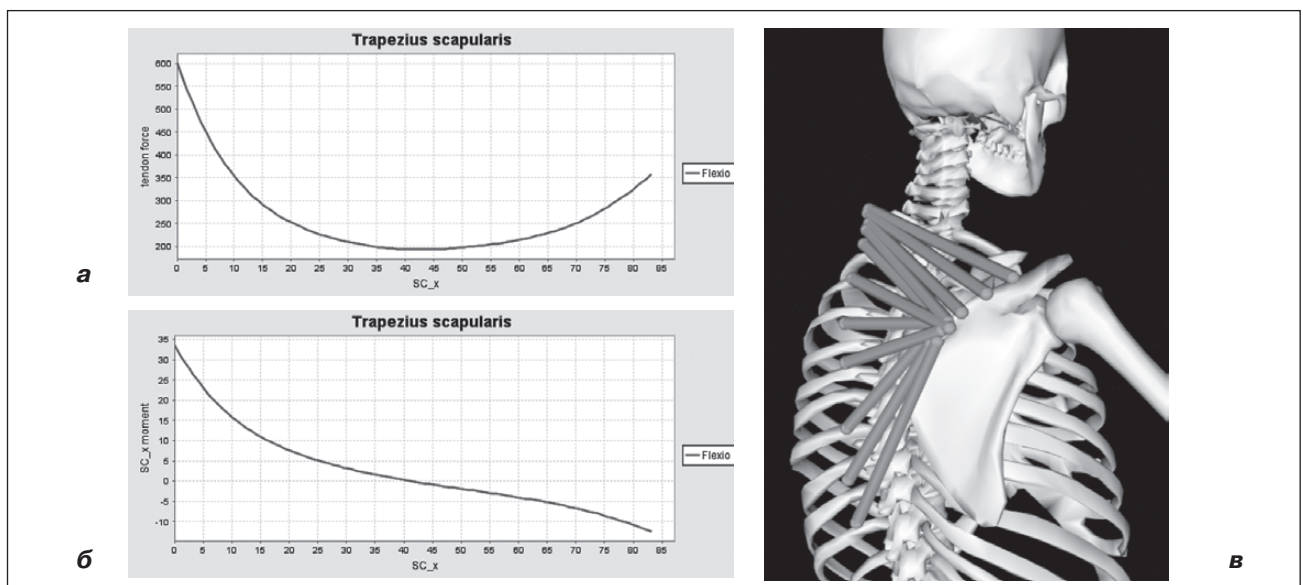


Рисунок 2. Сила (а) та крутний момент (б), які створює *m. trapezius scapularis* при флексії верхньої кінцівки на 90° (в)

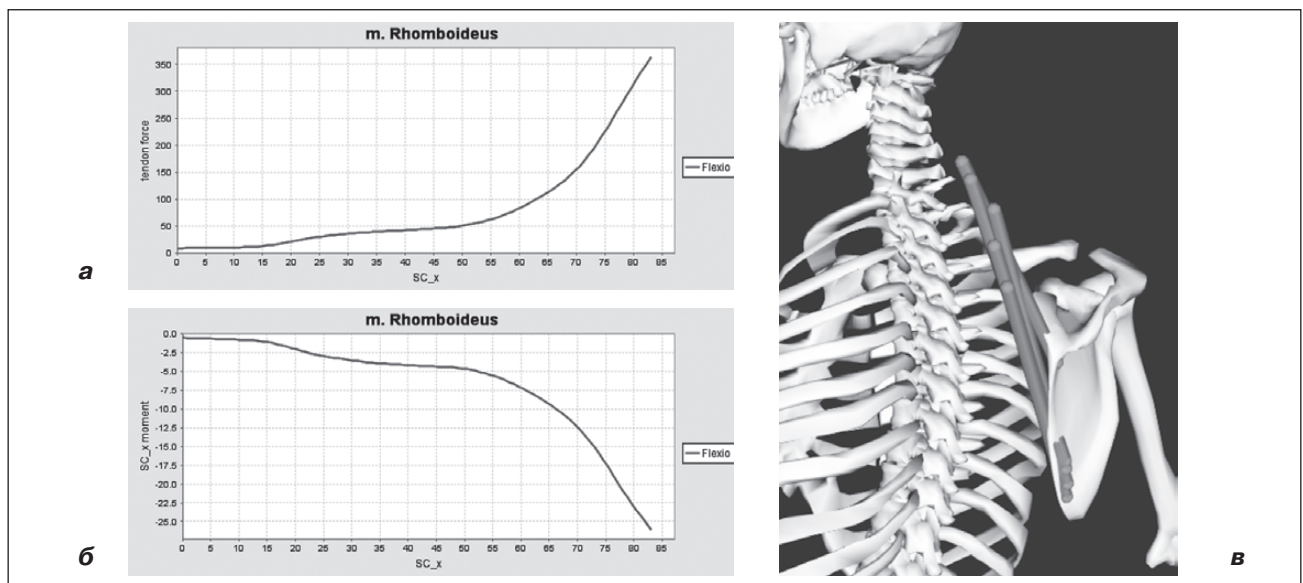


Рисунок 3. Сила (а) та крутний момент (б) *m. rhomboideus* (в)

здійснює початкову стабілізацію. Serratus anterior (lower) (рис. 5в) починається від нижніх ребер (6–9) і тягнеться до нижнього кута лопатки. М. serratus anterior фіксує лопатку до грудної клітки, втягує лопатку латерально (латеротракція) та повертає лопатку догори (латероротація), що критично важливо для підняття руки на понад 60°.

Збільшення сили верхньої частини переднього зубчастого м'яза, необхідної для підтримання стабільності лопатки, починається з кута флексії більше 50° (рис. 4а). Зубчастий характер збільшення сили пов'язаний з поступовим залученням пучків зі збільшенням кута згинання. Що стосується зміни крутного моменту, то м. serratus anterior (upper) до кута 30° створює мінімальний момент, який залежить виключно від зміни координат скорочення, далі до 60° спостерігається включення

м'яза в роботу із стабілізації, і момент зростає, при подальшій флексії активна ротація зростає, але крутний момент залишається майже незмінним. На цьому відрізку контроль стабілізації передається trapezius.

Upper serratus anterior не створює значного крутного моменту самостійно при флексії плеча. Його функція полягає в утриманні лопатки стабільною, щоб не виникало паразитних ротацій. У реальності основне джерело крутного моменту для латероротації лопатки при підйомі руки — нижня частина serratus anterior (рис. 5в) у поєднанні з верхньою та нижньою трапецією.

На початку руху кінцівки сила serratus anterior (lower) спрямована на утримання нижнього кінця лопатки, але при флексії кінцівки лопатку допомагають утримувати інші м'язи, тому необхідна сила зменшується (рис. 5а).

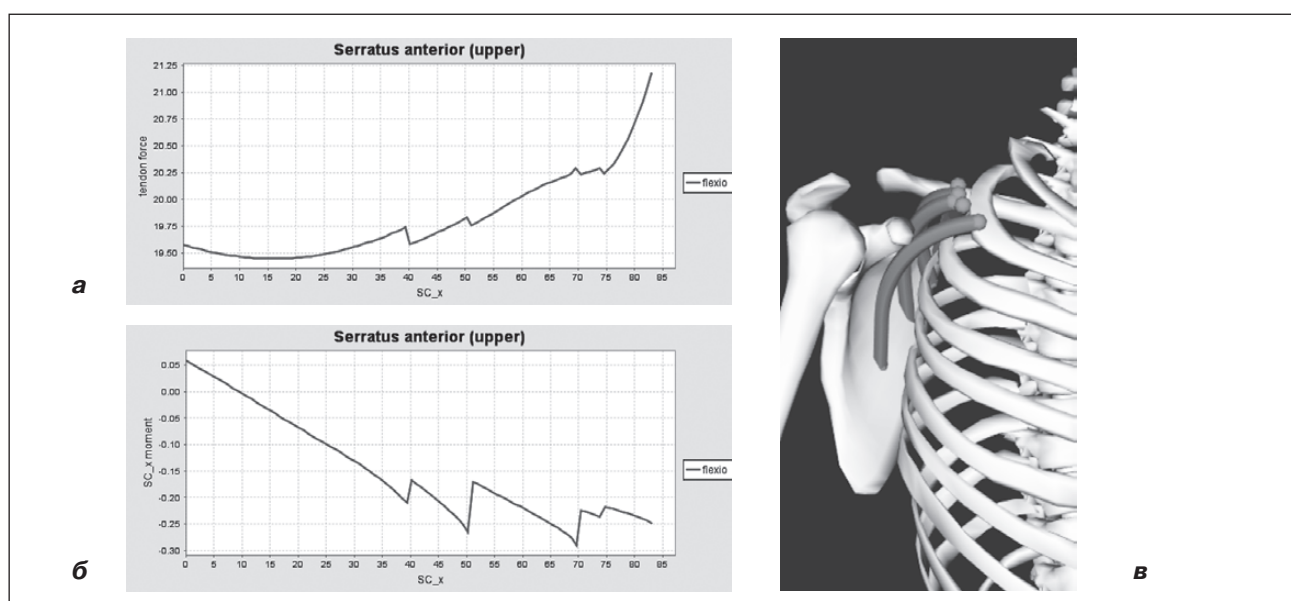


Рисунок 4. Сила (а) та крутний момент (б) м. serratus anterior (upper) (в)

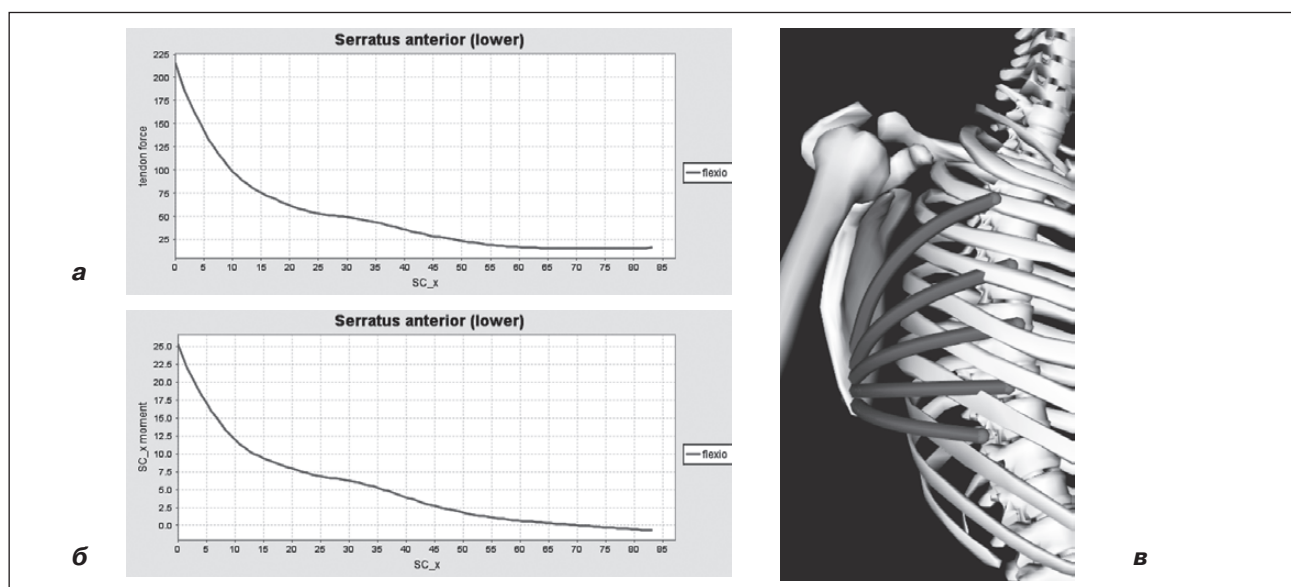


Рисунок 5. Сила (а) та крутний момент (б) м. serratus anterior (lower) (в)

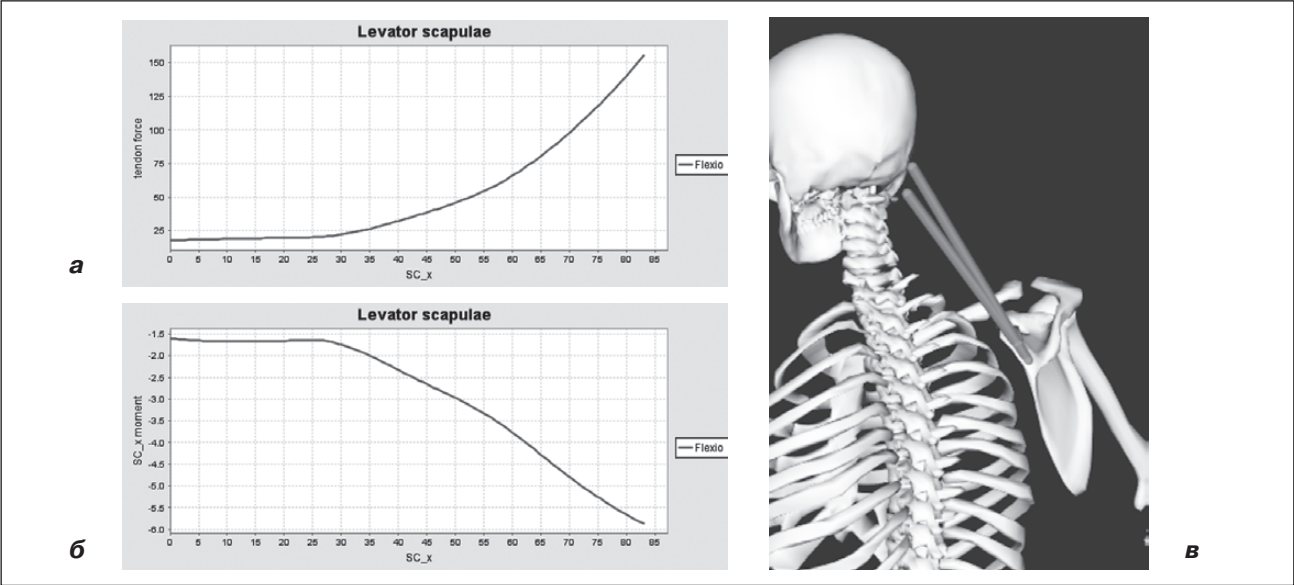


Рисунок 6. Сила (а) та крутний момент (б) *m. serratus anterior (lower)* (в)

Аналогічно розвивається і крутний момент, тобто він максимальний при опущеній кінцівці і майже близький до нульового при згинанні на 90° (рис. 56). На початку флексії (0–30°) нижня частина *serratus anterior* дуже активна. Вона забезпечує латероротацію лопатки, готує суглоб до подальшого підйому руки. У такому положенні крутний момент найбільший через значне навантаження на м'яз. При подальшій флексії (від 30° до 60°) частка моменту знижується, до руху

більше долучаються інші м'язи (трапеція, дельтоподібний). *M. serratus anterior (lower)* все ще працює, але вже не є основним рушієм. Після 70° м'яз стабілізує, але майже не створює крутного моменту, лопатка вже достатньо повернута догори, м'яз утримує її позицію, спостерігається ізометричне напруження, менше сили.

Розглянемо роботу *levator scapulae* — м'яза, який підіймає лопатку вгору та медіально (елеватор і меді-

Таблиця 1. Величина сили м'язів залежно від кута згинання плеча

М'язи	Сила, Н						
	Кут згинання						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Rhomboideus	8,7	13,4	36,0	45,8	86,0	239,7	373,0
Trapezius scapularis	600,0	290,0	208,8	193,5	215,4	286,4	359,0
Trapius clavicularis	12,9	12,8	12,9	13,0	13,2	13,5	13,7
Serratus anterior (upper)	19,6	19,4	19,6	19,7	20,0	20,3	21,2
Serratus anterior (lower)	215,0	75,0	50,0	27,0	20,0	12,0	12,0
Levator scapulae	7,9	16,8	19,0	20,2	32,5	53,8	75,5

Таблиця 2. Величина крутних моментів залежно від кута згинання плеча

М'язи	Сила, Н						
	Кут згинання						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Rhomboideus	–0,5	–1,1	–3,5	–4,4	–7,3	–17,7	–26,0
Trapezius scapularis	33,6	10,9	3,1	–0,9	–4,1	–8,4	–12,0
Trapius clavicularis	0,1	0,0	–0,1	–0,2	–0,2	–0,3	–0,3
Serratus anterior (upper)	0,0	0,0	–0,1	–0,2	–0,2	–0,2	–0,3
Serratus anterior (lower)	25	8,5	6,2	5,3	0,5	–0,5	–0,1
Levator scapulae	–0,6	–1,4	–1,6	–1,6	–2,3	–3,4	–4,3

альний ротаційний м'яз), а також нахилає шию при фіксованій лопатці. На початку підйому руки levator scapulae допомагає утримати лопатку стабільною. М'яз починається від відростків C1–C4 та йде до верхнього медіального краю лопатки (рис. 6в).

До 30–40° згинання кінцівки лопатка майже не ротується, levator scapulae стабілізує верхній кут лопатки, його сила мінімальна. Але після 50–60° флексії починається активна латероротація лопатки, до якої levator scapulae антагоністичний. Для утримання положення верхнього кута м'яз створює зростаючий момент (рис. 6б), а отже, зростає сила натягу сухожилля (рис. 6а). При куті згинання до 85–90° m. levator не ротує лопатку самостійно, а активується для балансування тяги від serratus anterior (lower) і нижньої трапеції. Його дія — це ізометрична стабілізація, щоб не допустити надмірного нахилу або крутіння лопатки.

Дані про величини сили м'язів залежно від кута згинання плеча наведені в табл. 1.

У табл. 2 наведені дані величини крутних моментів залежно від кута згинання плеча.

Обговорення

Під час флексії плеча до 90° лопатка виконує латероротацію, підлаштовуючи свою позицію до руху плечової кістки. Це критично важливо для збереження підакроміального простору, запобігання імпінджменту й забезпечення плавного руху. Ми описали роботу основних стабілізаторів лопатки при згинанні руки до 90°.

Serratus anterior (lower) — головний ініціатор латероротації лопатки при флексії плеча. Його крутний момент найвищий у перших 20–30°, що критично для «розгону» руху. До 60° флексії активність serratus anterior (lower) є максимальною, саме тут формується найбільший крутний момент, як показує графік (рис. 5а, 5б). Після 60°: функція стабілізації переходить до трапеції, serratus працює менш активно (ізометрично).

Основна силова пара для стабільного руху лопатки при флексії складається з serratus anterior (lower) та trapezius (upper/lower), які забезпечують контрольовану латероротацію. Саме ці м'язи розвивають найбільші моменти при русі руки вперед — з serratus anterior (lower) на початку руху, trapezius (upper/lower) — при куті, близькому до 90°.

Інші м'язи (rhomboides, levator scapulae) модулюють і обмежують надмірні рухи, утримуючи лопатку стабільною.

Подвійний перелом ключиці й лопатки призводить до порушення кінематичного ланцюга плечового пояса.

Порушення стабільності плечового пояса. Ключиця через груднино-ключичний суглоб є єдиним кістковим зв'язком верхньої кінцівки з тулубом. При її переломі рука «від'єднується» від аксіального скелета.

Якщо додається перелом лопатки, то порушується фіксація руки до грудної клітки через м'язи, що призводить до зростання нестабільності.

Втрата координації лопатково-гумерального ритму. Як було сказано вище, на кожному 2° руху плеча припадає

1° ротації лопатки. При порушенні цілісності ключиці/лопатки втрачається обертальний контроль, тоді рука не може підніматися вище ~60–90°, з'являється дискінезія лопатки (скапулярна нестабільність) [12].

Відповідно, перелом ключиці і лопатки призводить до обмеження флексії. Rhomboides, levator scapulae, serratus anterior, trapezius втрачають опору для тяги, адже лопатка або/та ключиця нестабільні. Виникає компенсаторне перенапруження шийних м'язів та контралатерального плечового пояса.

Флексія знижується до ~60–70° виключно за рахунок м'язів обертальної манжети, рухи тулуба провокують зміщення лопатки [13]. До цього додається біль при будь-яких рухах.

Висновки

За даними моделювання визначено, що основними м'язами-стабілізаторами лопатки при флексії плеча є serratus anterior (lower) і trapezius. Саме ці м'язи створюють максимальні крутні моменти при русі руки вперед. Через анатомічне положення цих м'язів — безпосереднє кріплення до найбільш рухомих ділянок лопатки — при переломі ці м'язи втрачають опору для створення моменту, що призводить до значного обмеження рухів верхньої кінцівки та порушення стабільності лопатки.

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

Внесок авторів. Долгополов О.В. — остаточне затвердження статті; Безрученко С.О. — концепція та дизайн роботи; Занько І.С. — критичний огляд; Суворов В.Л. — збір та аналіз даних; Карпінська О.Д., Карпінський М.Ю. — збір та аналіз даних, написання статті.

Список літератури

1. Nguyen MK, Nguyen VH, Le HGK, Cao DB. Multiple disruptions of superior suspensory shoulder complex: A case report. *International journal of surgery case reports*. 2024;124:110385. <https://doi.org/10.1016/j.ijscr.2024.110385>.
2. Hess F, Zettl R, Smolen D, Knoth C. Decision-making for complex scapula and ipsilateral clavicle fractures: a review. *European journal of trauma and emergency surgery: official publication of the European Trauma Society*. 2019;45(2):221–230. <https://doi.org/10.1007/s00068-018-0946-3>.
3. Jaën M, Sayer L, Fornaciari P. Triple Disruption of the Superior Shoulder Suspensory Complex — Review and Surgical Technique. *J Orthop Case Rep*. 2023 Jun;13(6):121–126. doi: 10.13107/jocr.2023.v13.i06.3720. PMID: 37398540; PMCID: PMC10308973.
4. Bartoniček J, Tuček M, Naňka O. Floating Shoulder: Myths and Reality. *JBJS reviews*. 2018;6(10):e5. <https://doi.org/10.2106/JBJS.RVW.17.00198>.
5. Delp SL, Anderson FC, Arnold AS, Loan P, Habib A, John CT, Guendelman E, Thelen DG. OpenSim: Open-Source Software to Create and Analyze Dynamic Simulations of Movement. *IEEE Trans Biomed Eng*. 2007;54(11):1940–1950. doi: 10.1109/TBME.2007.901024.

6. Chadwick E, Blana D, Kirsch R, Bogert A van den. *Real-Time Simulation of Three-Dimensional Shoulder Girdle and Arm Dynamics*. *IEEE Transactions on Bio-medical Engineering*. 2014;61(7):1947-1956. doi: 10.1109/TBME.2014.2309727.
7. Nordin M, Frankel VH, editors. *Basic biomechanics of the musculoskeletal system*. 4th ed. Philadelphia: Wolters Kluwer/Lippincott Williams & Wilkins Health; 2012. p. 470.
8. Hamm K. *Biomechanics of Human Movement*. E-book: <https://pressbooks.bccampus.ca/humanbiomechanics/>.
9. Тяжелов О.А., Карпінська О.Д., Рикун М.Д., Бра-ніцький О.Ю. Вплив зміни довжини компонентів м'язово-сухожильного елемента м'язів-згиначів ліктьового суглоба на ізометричну силу та крутний момент суглоба. *Ортопедія, травматологія та протезування*. 2023;4(634):48-55. doi: 10.15674/0030-59872023448-55.
10. Miniato MA, Anand P, Varacallo MA. *Anatomy, Shoulder and Upper Limb, Shoulder*. [Updated 2023 Jul 24]. In: *StatPearls* [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK536933>.
11. Crosbie J, Kilbreath SL, Hollmann L, York S. *Scapulo-humeral rhythm and associated spinal motion*. *Clinical biomechanics*. 2008 Feb 1;23(2):184-92.
12. Venus Pagare. *Scapulohumeral Rhythm*. *Physiopedia*. https://www.physio-pedia.com/Scapulohumeral_Rhythm.
13. Кравченко Д., Страфун О., Суворов В., Карпінська О., Карпінський М. Моделювання роботи м'язів при згинанні верхньої кінцівки в плечовому суглобі. *Травма*. 2025;26(3):136-144. doi: 10.22141/1608-1706.3.26.2025.1014.

Отримано/Received 02.06.2025

Рецензовано/Revised 16.06.2025

Прийнято до друку/Accepted 17.07.2025

Information about authors

Oleksii Dolhopolov, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Severe Skeletal Trauma, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: poloff.a@gmail.com; phone: +380 (50) 358-05-65; <https://orcid.org/0000-0002-5204-6137>

Serhii Bezruchenko, PhD in Medicine, Head of the Department of Severe Skeletal Trauma, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: drbezruchenko@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-1575-0344>

Ihor Zanko, PhD in Medicine, Research Fellow, Department of Severe Skeletal Trauma, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: i.s.zanko@gmail.com; phone: +380 (67) 870-04-07; <https://orcid.org/0000-0001-9202-2466>

Vasyl Suvorov, PhD in Medicine, Head of the Biomechanics Laboratory, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: vasil_suvorov@ukr.net; phone: +380 (66) 393-72-13; <https://orcid.org/0000-0002-0862-7997>

Olena Karpinska, Research Fellow, Biomechanics Laboratory, Sytenko Institute of Spine and Joint Pathology of NAMSU, Kharkiv, Ukraine; e-mail: helen.karpinska@gmail.com; phone: +380 (57) 725-14-74, +380 (99) 486-34-63; <https://orcid.org/0000-0002-1482-7733>

Mykhailo Karpinsky, Senior Research Fellow, Biomechanics Laboratory, Sytenko Institute of Spine and Joint Pathology of NAMSU, Kharkiv, Ukraine; e-mail: korab.karpinsky9@gmail.com; phone: +380 (67) 571-48-63; <https://orcid.org/0000-0002-3004-2610>

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. O.V. Dolhopolov — final approval of the article; S.O. Bezruchenko — concept and design of the work; I.S. Zanko — critical review; V.L. Suvorov — data collection and analysis; O.D. Karpinska, M.Yu. Karpinsky — data collection and analysis, article writing.

O.V. Dolhopolov¹, S.O. Bezruchenko¹, I.S. Zanko¹, V.L. Suvorov¹, O.D. Karpinska², M.Yu. Karpinsky²

¹Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine

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

Modeling the work of the shoulder muscles during upper limb flexion in the shoulder joint

Abstract. Background. The scapula and clavicle play a key role in stabilizing and transferring loads from the upper limb to the trunk. Raising the arm involves movement in the glenohumeral and scapulothoracic joints. With combined damage to the structures of these joints, both the integrity of the bony ring of the shoulder girdle and the muscle-ligamentous balance are disrupted. The purpose was to determine the magnitude of the force and torques created by the muscles responsible for stabilizing the scapula and clavicle during arm flexion. **Materials and methods.** The base model is a three-dimensional model of the shoulder and upper limb for simulating arm dynamics in real time, including independent muscle control of the scapula and clavicle. We have analyzed the force and torque created by the muscles responsible for stabilizing the scapula during flexion (raising the arm) forward by 90°. The work of the following muscles was evaluated: mm. rhomboideus, trapezius scapularis and clavicularis, serratus anterior (upper), levator scapulae. **Results.** During shoulder flexion to 90°, the scapula performs lateral rotation, adjusting its position to the movement of the humerus. This is critical to preserve the subacromial space, prevent impingement, and ensure smooth movement. Serratus anterior (lower) is the main initiator of scapular lateral rotation during shoulder flexion. Its torque is highest in the first 20–30°, which

is critical for “acceleration” of the movement. Up to 60° of flexion, the activity of serratus anterior (lower) is maximal, this is where the greatest torque is generated, as shown in the graph. After 60°: the stabilization function passes to the trapezius, the serratus works less actively (isometrically). The main force pair for stable movement of the scapula during flexion consists of serratus anterior (lower) and trapezius (upper/lower), which provide controlled lateral rotation. It is these muscles that develop the greatest torques when the arm moves forward — with serratus anterior (lower) at the beginning of the movement, trapezius (upper/lower) at an angle close to 90°. Other muscles (rhomboides, levator scapulae) modulate and limit excessive movements, keeping the scapula stable. **Conclusions.** According to the modeling data, it was determined that the main muscles that stabilize the scapula during shoulder flexion are serratus anterior (lower) and trapezius. They create maximum torques when the arm moves forward. Based on the anatomical position of these muscles — direct attachment to the most mobile areas of the scapula, with a fracture, they lose support for creating a moment, which leads to a significant limitation of upper limb movements and disruption of scapular stability.

Keywords: shoulder joint; scapula; flexion; muscles; isometric force; moment of force

Hussain J. Alkhatteib¹, Sarah Mazin Naeem²¹College of Medicine, Kufa University, Najaf, Iraq²Alsader Teaching Hospital, Najaf, Iraq

Effect of traditional bracing vs. modern techniques on healing time in pediatric forearm fractures

Abstract. Background. Musculoskeletal injuries are quite common among children, with forearm fractures being the most common type, which accounts for approximately 40 % of all long bone fractures in the pediatric population. Meanwhile, the use of modern techniques, including functional bracing, elastic intramedullary nails, or other methods has become available in the management of these fractures. These treatments are intended to decrease and minimize immobilization time, encourage early mobilization, and ultimately, accelerate recovery. **The purpose:** to examine the efficacy of conventional bracing compared to modern methods in terms of healing time, functional recovery and pain management in pediatric patients with forearm fractures. **Materials and methods.** A prospective, comparative study was performed on 40 pediatric patients aged 4 to 14 years at a single medical center. They were then divided into two groups and stratified as such; they were randomly assigned to the group of traditional bracing ($n = 20$), who wear cast in plaster, or fiberglass casts, or traditional intramedullary nails, and the modern techniques group ($n = 20$), where the functional braces or the elastic intramedullary nailing were used. Healing time (in weeks), grip strength (in kilograms), range motion of joints (in degrees), pain score (in 0–10 scale), ability to perform daily activities (scored as a percentage of normal activities) were the main outcome measures. **Results.** The patients in the modern techniques group had significantly shorter mean healing time than those in the traditional bracing group: 4.73 vs. 5.93 weeks ($p < 0.001$). In addition, grip strength and range of motion were significantly greater in the modern techniques group: 7.51 vs. 5.07 kg ($p = 0.003$) and 135.05 vs. 118.20 degrees, respectively ($p < 0.001$). The results of this study imply that modern techniques speed healing and even have a beneficial effect on functional recovery, in the sense of strength and mobility. In terms of pain, the modern techniques group scored significantly less pain (2.15 vs. 3.30, $p < 0.001$). We also found that patients in the modern techniques group had a better ability to perform daily activities (86.85 vs. 67.10 %; $p < 0.001$). The results of the regression analysis confirmed the significance of fixation type as a predictor of all outcomes, including healing time, grip strength, and range of motion, all favoring the modern techniques group ($p < 0.001$ for all indicators). **Conclusions.** The results of this study show primarily that nowadays techniques like functional bracing and elastic intramedullary nailing have several advantages over classical bracing in managing pediatric forearm fractures. As a result, modern methods lead to faster healing times, improved functional recovery, reduced pain, and an earlier return to normal activities. These findings support the use of modern techniques in clinical practice, especially for pediatric patients, to improve the quality of life and recovery outcome. **Keywords:** traditional bracing; modern techniques; fracture; healing; forearm

Pediatric forearm fractures are among the most common musculoskeletal injuries in children, accounting for nearly 40 % of all long bone fractures in the pediatric population, with an increasing incidence over the past decades due to changes in physical activity and injury mechanisms [2]. Epidemiological studies indicate that forearm fractures predominantly occur in boys aged 8–14 and girls aged 6–12, with distal radius fractures being the most frequently observed type [9]. Traditionally, these fractures have been managed conservatively with cast immobilization, which re-

mains a widely used and effective treatment approach, particularly for non-displaced fractures [4]. However, controversy exists regarding the optimal treatment, especially for displaced fractures, leading to variations in practice among orthopedic surgeons [12]. The emergence of modern techniques such as elastic stable intramedullary nailing (ESIN) and functional bracing has introduced new strategies that allow for earlier mobilization and reduced immobilization times while maintaining stability [16]. Recent studies have demonstrated that modern fixation methods can signifi-

cantly reduce healing time and improve functional recovery compared to traditional casting [18]. The healing time and post-fracture rehabilitation period are critical for pediatric patients, as prolonged immobilization can lead to stiffness, muscle atrophy, and delayed return to daily activities [13]. Faster recovery times facilitated by modern techniques help minimize the impact of fractures on children's quality of life and schooling, which is a key consideration in selecting treatment approaches [3]. Additionally, functional bracing and newer intramedullary implants have been shown to provide superior stability while preserving joint mobility, reducing the risk of complications such as refractures or growth disturbances [14]. Studies evaluating titanium elastic nailing systems (TENS) in pediatric forearm fractures have further supported the benefits of modern fixation techniques, demonstrating good outcomes with minimal complications [15]. As the treatment paradigm continues to evolve, the selection between traditional and modern approaches must be guided by clinical evidence that prioritizes both healing efficiency and functional outcomes in pediatric patients [11].

The rationale for this study emerges from the limited understanding of the comparative efficacy of traditional bracing versus modern surgical techniques in the management of pediatric forearm fractures. While traditional casting has been the standard treatment, recent studies suggest that modern methods, such as intramedullary nailing or functional bracing, may offer faster recovery times and fewer complications, but robust comparisons are lacking [17]. Moreover, many studies tend to focus on isolated outcomes such as bone union, while overlooking other critical factors like functional recovery and pain management [6]. In particular, the impact of treatment choices on pediatric quality of life has been underexplored. As fractures in this population not only affect physical function but can also have long-lasting implications on daily activities and educational performance, there is an urgent need for studies that address both healing time and the broader quality of life outcomes [8]. Furthermore, while the use of titanium elastic nailing (TEN) has gained traction for its minimally invasive nature and quicker recovery, it remains unclear how this method compares to other techniques in real-world settings where children must balance recovery with their daily activities and schooling [5]. Addressing these gaps is critical for healthcare providers and policymakers to refine treatment protocols that optimize both clinical outcomes and children's quality of life [19]. This study aims to provide more comprehensive insights by evaluating both functional recovery and healing times between traditional and modern approaches to pediatric forearm fractures, which could help inform clinical decisions and guidelines in the future.

In this study, the primary objective was to compare the healing times in pediatric forearm fractures managed using traditional bracing methods versus modern techniques. Traditional bracing, commonly used in developing countries, has been the preferred method for managing pediatric fractures for many years. However, the limited available data on the effectiveness of these traditional methods in comparison to newer techniques prompted the need for a detailed evalua-

tion. The study sought to investigate whether the healing process differed significantly between children treated with traditional bracing and those treated with modern methods, with a particular focus on the duration of healing and the functional recovery outcomes.

Another key objective was to evaluate the functional outcomes in the children who underwent treatment with traditional bracing. Functional recovery was assessed through basic strength and movement tests. Grip strength was measured as a direct indicator of muscle function, and the range of motion in the affected arm was monitored to assess overall mobility and the ability to perform everyday tasks. These assessments allowed for a comparison of functional recovery between the two treatment methods, providing a clearer understanding of how traditional bracing impacted the physical capabilities of the children as they healed.

Additionally, the study aimed to gather parental feedback on the functional recovery of the children. Since parents are often the primary caregivers and can observe the daily progress and challenges their children face, their input was deemed invaluable for understanding the broader impact of the treatment. Simple surveys were distributed to parents to collect their perceptions regarding the recovery process, including any difficulties or improvements they noticed in their child's movement, strength, and overall quality of life during the healing period. This feedback was used to complement the clinical measures of strength and motion, providing a more holistic view of the recovery process.

The purpose. To provide a comprehensive understanding of the effectiveness of traditional bracing in treating pediatric forearm fractures. The comparison of healing times, functional outcomes, and parental feedback was intended to offer insights that could guide healthcare professionals in developing more effective treatment protocols for pediatric fractures in regions where traditional bracing remains a common practice.

Materials and methods

Study design

Traditional bracing in forearm fractures in children was evaluated with a study design of prospective, comparison. Therefore, this design was selected to permit the comparison of two treatment methods — traditional bracing versus modern techniques — based on objective parameters, but also to measure the amount of progress that takes place and the functional outcomes over time. The research was done at a single medical center and children treated with conservative methods for forearm fractures were studied.

The study was undertaken over the period of 12 months enrolling a total of 40 pediatric patients. Patients included and excluded according to criteria set at the beginning of the study were selected. The study population consisted of children receiving forearm fractures that are treatable conservatively instead of needing surgery. This helped us get a more homogeneous group of participants and therefore were able to clearly compare the two treatment approaches.

Treatment was either traditional bracing or a modern approach based on what was done in the hospital at the time of presentation for each participant. The study did

not randomize the allocation of the patients to each treatment group as clinical practice in handling pediatric fracture in a developing country setting was the objective. The design enabled collection of data that was representative of practice rather than testing in controlled experimental conditions.

It took data at regular intervals throughout the healing process. Grip strength and range of motion tests were used to measure the amount of time needed for healing, the main focus. The tests were run every two weeks to ensure a continuously updated idea of the healing, and the time frame it will take to be completed. Also, simple questionnaires were given to the parents at the same intervals to obtain their feedback with regard to functional recovery. The analysis included clinical and objective measures with both measures obtained through the use of this multifaceted approach of data collection.

The study, with a comparative observational design, attempted to test the evidence of effectiveness of traditional bracing in the therapy of pediatric forearm fractures. We aimed to test whether traditional approaches could yield similar results to modern therapies and assess treatment effects from the viewpoints of parents and medical professionals on the children's functional recovery from injury.

Participants

A study was carried out consisting of 40 pediatric patients with ambulatory forearm fracture treated conservatively in the medical center during the study period. Participants were aged 4–14 years, of which an even distribution across age groups was attempted to cover as large an area of pediatric fractures as possible. Specific criteria were developed to select participants to form a homogeneous sample with which to make an accurate comparison of the two treatment methods.

To be included as participants it was required that participants have a clinically confirmed forearm fracture as a greenstick or non-displaced fracture which can be managed without surgical intervention. Fractures occurred in the first 72 hours following injury, and consisted of all the participants, meaning that the treatment regimen could begin as close as possible to the beginning of the healing process. People only participated in the study if their families agreed to provide a written consent.

Cases which would have introduced confounding variables or complications in the results were exclusion criteria they were set. Fractures were excluded if the patient was a child and the fracture was open, required surgical fixation, or if the patient had underlying medical conditions (e.g., osteoporosis, metabolic disorder) that may affect bone healing. Also, children with a previous history of forearm fracture, or prior treatment for a forearm fracture with any method other than usual bracing or modern technique in the previous 6 months were not eligible.

After the clinical assessment to diagnose the fracture in emergency department or outpatient clinic treatment plan will be started according to the characteristic of the fracture. The study was conducted after eligibility had been confirmed and patients were enrolled and randomized to tradi-

tional bracing or modern technique groups according to the standard of care at the time of presentation.

During the study, all participants were monitored regularly for any complications and there was regular progress tracked through two week follow up visits. The researchers were able to get consistent and similar data from each participant as to the progress of healing from each of the different treatment methods under study, and that data finalized to indicate the effectiveness of the treatment methods. There were a number of characteristics of the participants as there were of both genders and diverse socioeconomic status with different fracture types available, making for a complete picture to be made of how standard bracing worked in real life settings.

Treatment methods

For the treatment of the participants, 20 children were given traditional bracing and 20 others were treated with modern techniques. Established clinical practices were used for the treatment protocols for each group and rigorous attempts were made to assure both methods used for the study were applied evenly among the groups.

The patients in the traditional bracing group were immobilized by a traditional plaster or fiberglass cast. Over the years, this had been the standard method of treating pediatric forearm fractures, especially when resources were limited. A comparison of the bones of the forearm after the fracture with the bones of the forearm from a normal arm was also made after the diagnosis of a forearm fracture and the limb was positioned with the bones in a neutral position to ensure proper alignment to them. From the wrist to just beyond the elbow, it was then plastered or fiberglass casted starting from the wrist up to just beyond the elbow to immobilize the whole forearm. To avoid pressure sores or any discomfort, the brace was checked for fit and comfort. Treatment protocol included routine two weekly follow-up visits during which, the cast was looked for any swelling, skin irritation or misalignment. The cast stayed in place as long as there were no complications, between four and six weeks for the radiographic demonstration of fracture healing. Physical therapy is then started to regain full functionality if needed and the children were assessed for range of motion and grip strength after the cast is removed.

On the other hand, the advanced treatment options for the children in the modern technique group were the functional bracing technique or the elastic intramedullary nail (EIN) technique. They chose these modern methods because of its helping effectiveness in early mobilization and reducing complications with traditional plaster casting.

The first employed method was the functional bracing method. Functional bracing is capable of early movement, while at the same time correctly immobilized for fracture healing. The functional brace designed for this technique was applied to the child's forearm, was custom fitted to the child's forearm and followed protocol. Controlled motion at the fracture site was allowed with the brace with the idea of reducing stiffness and improving circulation to the area. The brace was adjustable with Velcro straps that could be

tightened so it would not hurt or loosen if healing wasn't coming along as expected or if the child would be comfortable. Typically, the functional brace was worn for four to six weeks followed by weekly clinical examination and radiographic imaging visits for two weeks to assess healing. At follow-up visits, they modified the brace as needed to get the best alignment and support. During this period, patients were advised to move their injured arm with lights movements to prevent its stiffness, and a physical therapy program was initiated at the end of bracing period to restore strength and flexibility.

The second modern technique employed in this study was the EIN technique, which is a minimally invasive method of the treatment of pediatric forearm fractures. The procedure for this was to put a flexible titanium nail into the medullary canal of the fractured bone while the patient was under general anesthesia. The enabling internal stabilization from the EIN allowed the fracture to heal without having to put the break in a cast. This treatment protocol involved insertion of the elastic intramedullary nail via a small incision at the elbow or wrist depending on the fracture's location. The bending of the nail matched the natural curvature of the bone for added alignment and fracture support while healing. After it was inserted, the EIN was secured in place, and the arm was immobilized in a sling for the first couple of days to allow for the initial healing. Once patients recovered, they were helped to easily begin to move their elbows and wrists in order not to become atrophic. Radiographic evaluation was carried out at every two weeks follow-up visits and if necessary, adjustments to the nail positioning were made. The EIN lasted up to four to six weeks, then it was cleared out by a small surgical procedure once the fracture had healed enough. The children were told not to have heavy physical activity during the healing period but to carry out daily activity as tolerated to prevent stiffness and maintain function.

The functional bracing and the elastic intramedullary nail techniques were both designed to heal faster and to have fewer complications than classic plaster casting. The modern techniques differed from the traditional method in that whereas the former relied on complete immobilization, the later aimed for early mobilization with reduction in risk of joint stiffness and muscle weakness common with prolonged casting. Additionally, the modern technique was intended to reduce the discomfort and inconvenience of protracted immobility while further expediting and completing the functional recovery.

All participants were closely monitored for side effects throughout the treatment, namely infection, misplacement, or delayed healing. The medical team documented any adverse events and dealt with them immediately. For both treatment groups, the aim was to achieve sufficient bone healing with minimal functional disadvantages, and each approach was adapted to the single needs of the patient according to his type of fracture, age, or general health. The outcome of the treatment was measured by a combination of clinical examination, radiographic imaging and functional testing to assess speed and recovery quality in the ability to bear weight.

Healing assessment

The healing process of each participant was closely monitored with a combination of objective clinical measures and subjective assessments. The primary focus of the healing assessment was to follow the course of fracture union and recovery of functional capacity over time. Radiographic imaging and physical evaluation were performed at stated time points during the study period in order to assess healing. The effectiveness of the treatment methods was assessed using these assessments and it also helped in making sure the fractures where healed properly.

Bone healing was monitored by radiographic imaging that was performed at two-week intervals. X-rays of the forearm in standard, anteroposterior and lateral views were taken to examine the severity of the alignment and union of the fracture site. This observation enabled the medical team to determine any debris, delayed union, non-union or misalignment on the radiographs. Healed was accepted to be considered complete when bridging callus formation and continuity at the fracture site was observed and the cortex was continuous at the fracture site. Radiographs were compared to baseline radiographs just after the fracture was first diagnosed to determine the rate of healing over time.

It was also assessed through functional healing (grip strength, range of motion) as well as radiographic imaging. A hand dynamometer was used to measure grip strength, whereas quantification of the strength of the injured hand was in kilograms. Starting on the day the treatment began, this test was run every two weeks. Moreover, grip strength was used as a surrogate marker for recovery of muscle function and acute limb strength. People who had an improved grip strength seemed to be returning to normal muscle activity in the forearm, while those that did not progress may be running later with respect to recovery.

The affected forearm's flexibility and mobility were also measured to determine its range of motion. The moves of the elbow and wrist joints were measured using a standard goniometer, with degrees. The measurements were an objective indicator of how good the child's arm was recovering (mobility and joint function). We defined the full range of motion as the ability to move as well as was possible in the uninjured forearm.

These healing assessments collected the data and it used to track participants' progress and to identify any deviation from an expected recovery timeline. Adjustments to the treatment protocol were made in case a participant had signs of delay in healing or functional limitation. These evaluations revealed the details about the speed and quality of recovery during the traditional bracing and to the modern techniques.

Parental feedback collection measures

An important part of the study was parental feedback, which was essential to learn about functional recovery of the children for whom clinical measures were not enough. Parents were primary caregivers and most familiar with the activities and progress of the child during the day; therefore, it was important to their contribution in the understanding of how the treatment affected the child's life. Feedback for

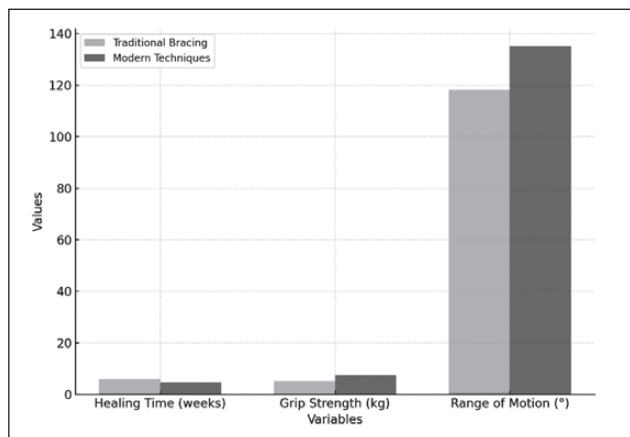


Figure 1. Statistical comparison of healing indices between study groups: traditional bracing vs. modern techniques

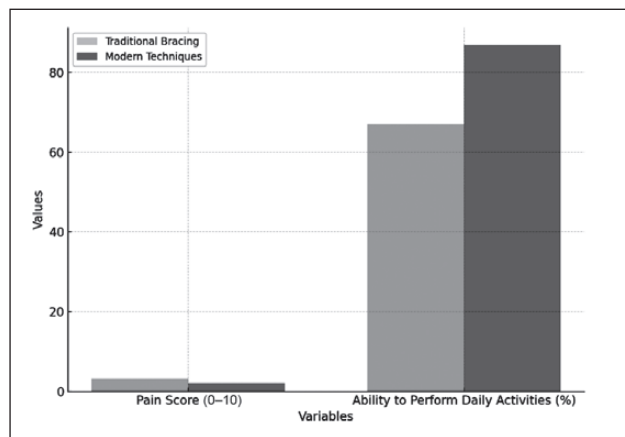


Figure 2. Comparison of pain score and ability to perform daily activities between traditional bracing and modern techniques

this was collected at regular intervals with a structured survey that was developed to be conducted twice a week over the study period beginning with the two week follow-up and every two weeks after that.

In developing the survey, parents were asked to provide reports on a number of aspects of their child's recovery without feeling threatened by complicated medical terminology. The questions were about how the child could or could not do daily activities that involve such things as dressing, eating, writing and playing, and any restrictions the child might have suffered from because of the injury or treatment. They also asked parents to describe their child's level of pain or discomfort, and how often the child had swollen, bruised or couldn't move. The type of questions referred to those aspects of the child's functional status (independence and participation in daily tasks), which were the most relevant indicators of the success of the treatment, according to those people who had higher proximity to observe the reliability of its results.

The survey also asked about the psychological effects the injury and treatment imposed on the child. Parents were asked whether their child displayed signs of anxiety, frustration or other emotional distress about the injury or the recovery situation. This information was imperative in comprehending the conceptual and emotional prices that the injury or its treatment could potentially have on the complete recovery procedure and the child's wellness. The round out of the clinical measures via this aspect of feedback helped to flesh out the recovery experience.

Parents were also admonished to report any difficulties or issues they had whilst caring for their child while they were healed. Such issues included problems with treatment such as how to keep a cast clean, keep a brace in, going to and attending appointments. After reviewing and analyzing the data collected from these surveys, patterns and trends in functional recovery and parental experiences were studied across the two treatment groups.

Finally, as it was an important component in the clinical effectiveness of the treatment methods, this parental feedback provided an accurate contextualization of the clinical outcome.

Objective measures of physical healing, such as grip strength and range of motion, did so, but so did the parental reports on the child's daily functioning, pain levels and emotional well-being as a way of complementing the treatment and understanding its impact on the child's life away from the clinical setting.

Ethical considerations

A study like this is given ethical approval by the institutional review board (IRB) of the medical center where the research is conducted. To make sure that the research process was safe and well for all participants, there was a design of the study. The ethical framework was built on informed consent. Every participant's purpose, procedures, and possible risks were explained to the parents or legal guardian before their enrollment into the study. The study was carried out with written consent of each parent or guardian who allowed them to participate, in that they have done so voluntarily and understood for what purpose the study was.

The data collected in the study were anonymized in order to protect the participants' privacy and confidentiality. The records were cleaned, and only aggregated data were used in the analysis. Access to the research team was denied except in the case of medical history of participants, treatment details and feedback about their treatments. The right to withdraw at any time was also highlighted in the study with no impact on its standard of care of children.

Also, the study was consistent with principles of minimal harm. Participation in all treatments was according to medical guidelines, and there was monitoring of any adverse effects of treatment and provision of prompt intervention for development of complication.

Statistical analysis

Healing time, age, grip strength, range of motion, and BMI were subjected to statistical analysis using SPSS (version 25, IBM Corp., Armonk, NY, USA) for continuous variables. To compare the means between the two groups, the independent samples t-test was used and categorical variables such as gender distribution were analyzed using the

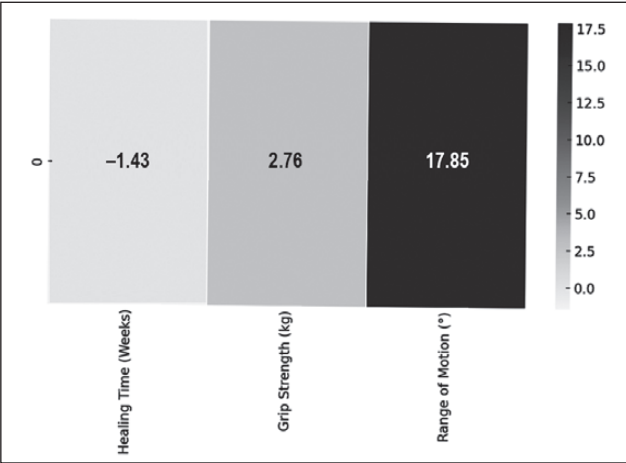


Figure 3. Regression coefficients for healing time, grip strength, and range of motion predicted by type of bracing

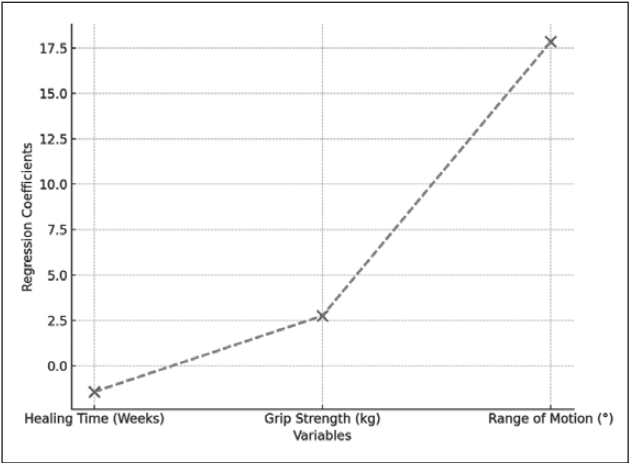


Figure 4. Regression coefficients for healing time, grip strength, and range of motion predicted by type of bracing

chi square test. Regression analysis was conducted to determine predictability based on the type of bracing (traditional vs. modern) of healing time, grip strength, range of motion, pain scores and ability to perform daily activities using the β coefficient, standard error, t-value and p-value. Statistically significance was determined to have a p-value less than 0.05. The R^2 values from the regression models helped to determine the percentage variability explained by the type of bracing used for each outcome.

Results

The statistical comparison of demographic characteristics between the two study groups, traditional bracing and modern techniques, revealed no significant differences in

age, gender distribution, or BMI (Table 1). The mean age of patients in the traditional bracing group was slightly higher at 8.05 years compared to 7.75 years in the modern techniques group, but this difference was not statistically significant ($p = 0.673$). Similarly, while the traditional bracing group had a higher proportion of males (14 males and 6 females) compared to the modern techniques group (8 males and 12 females), this difference in gender distribution approached but did not reach statistical significance ($p = 0.083$). In terms of BMI, patients in the modern techniques group had a slightly higher mean BMI (18.30 kg/m^2) than those in the traditional bracing group (17.15 kg/m^2), but this difference was also not statistically significant ($p = 0.192$). Overall, these results indicate that the two

Table 1. Statistical comparison of demographic characteristics between study groups: traditional bracing vs. modern techniques

Variable	Traditional bracing (n = 20)	Modern techniques (n = 20)	p-value
Age (years)	8.05 $\pm$ 2.49	7.75 $\pm$ 2.21	0.673
Gender (male/female)	14/6	8 /12	0.083
BMI (kg/m ²)	17.15 $\pm$ 2.57	18.30 $\pm$ 2.60	0.192

Notes: continuous variables (age and BMI) are presented as mean $\pm$ standard deviation and were compared using the independent samples t-test. Categorical variables (gender distribution) were analyzed using the chi-square test. A p-value < 0.05 was considered statistically significant.

Table 2. Statistical comparison of healing indices between study groups: traditional bracing vs. modern techniques

Variable	Traditional bracing (n = 20)	Modern techniques (n = 20)	p-value
Healing time (weeks)	5.93 $\pm$ 1.22	4.73 $\pm$ 1.14	< 0.001
Grip strength (kg)	5.07 $\pm$ 2.50	7.51 $\pm$ 2.70	0.003
Range of motion (°)	118.20 $\pm$ 13.33	135.05 $\pm$ 8.43	< 0.001

Notes: continuous variables are presented as mean $\pm$ standard deviation and were compared using the independent samples t-test. A p-value < 0.05 was considered statistically significant.

Table 3. Statistical comparison of pain scores and ability to perform daily activities between study groups: traditional bracing vs. modern techniques

Variable	Traditional bracing (n = 20)	Modern techniques (n = 20)	p-value
Pain score (0–10)	3.30 ± 1.06	2.15 ± 1.21	< 0.001
Ability to perform daily activities (%)	67.10 ± 11.60	86.85 ± 8.23	< 0.001

Notes: continuous variables (pain score and ability to perform daily activities) are presented as mean ± standard deviation and were compared using the independent samples t-test. A p-value < 0.05 was considered statistically significant.

groups are comparable in terms of their demographic characteristics, with no significant differences observed in age, gender distribution, or BMI between them. This comparability ensures that any subsequent analysis or outcomes can be attributed to the intervention rather than baseline demographic disparities between the groups.

Comparing the statistical indices of healing among the two study groups of traditional bracing and modern techniques, the differences were found to be significant at all three measured variables, namely, healing time, grip strength, and range of motion (Table 2, Fig. 1). The differences between the groups were statistically significant when comparing the average time to healing from 5.93 weeks in the traditional bracing group with 4.73 weeks in the modern techniques group, $p < 0.001$. A faster healing time resulted when modern techniques were compared to traditional bracing in the patients. Significantly greater differences were also found between the two groups in terms of grip strength, with mean of 7.51 kg in the group using modern techniques compared with 5.07 kg in the group of persons using the traditional bracing ($p = 0.003$). It indicates that patients who received modern techniques of therapy showed more functional recovery in terms of hand strength. Additionally, mean range of motion was significantly higher in the modern techniques group compared to the traditional bracing group with mean values of 135.05 [135.51–134.57]°

versus 118.20 [119.98–116.5]° ($p < 0.001$). This shows the patients treated with modern techniques performed much better on joint mobility while they were recovering than those treated with old techniques. Taken together, these findings indicate that modern techniques showed extensive healing times, grip strength and ROM over traditional bracing and thus suggest a favorable therapeutic effect for patients in this study population by using modern techniques.

Finally, the statistical analysis performed between the study groups, traditional bracing and modern techniques, showed large differences in both pain score and the ability to perform daily activities (Table 3, Fig. 2). Significantly, $p < 0.001$, mean pain score in the traditional bracing group 3.30 compared to mean pain score in the modern techniques group 2.15. However, this shows that using modern techniques resulted in less pain experienced during recovery than when patients are treated with traditional braces. Patients in the modern techniques group presented significantly higher percentages of functional performance (mean 86.85 vs. 67.10 %, $p < 0.001$) regarding the ability to perform daily activities. This indicates that patients who received modern techniques are able to perform the daily tasks more successfully than patients from the traditional bracing group. Taken together, these findings demonstrate that modern techniques are more effective than traditional bracing in improving pain and enhancing functional reco-

Table 4. Regression analysis of healing time, grip strength, and range of motion predicted by type of bracing (traditional vs. modern)

Dependent variable	Predictor (type of bracing)	β coefficient	Standard error	t-value	p-value	R ²
Healing time (weeks)	Traditional vs. modern	–1.43	0.22	–6.50	< 0.001	0.682
Grip strength (kg)	Traditional vs. modern	2.76	0.58	4.76	< 0.001	0.535
Range of motion (°)	Traditional vs. modern	17.85	2.83	6.31	< 0.001	0.672

Table 5. Regression analysis of pain score and ability to perform daily activities predicted by type of bracing (traditional vs. modern)

Dependent variable	Predictor (type of bracing)	β coefficient	Standard error	t-value	p-value	R ²
Pain score (0–10)	Traditional vs. modern	–1.45	0.28	–5.18	< 0.001	0.590
Ability to perform daily activities (%)	Traditional vs. modern	17.40	2.57	6.77	< 0.001	0.712

very since they had significantly lower pain scores and higher percentages of daily activity performance. Clearly there are likely benefits, if these techniques were adopted in the recovery process in modern times.

A linear regression analysis was conducted to evaluate the predictability of healing time, grip strength, and range of motion by the type of bracing used (traditional vs. modern) (Table 4, Fig. 3). The β coefficient represents the change in the dependent variable for each unit change in the predictor variable (modern bracing compared to traditional bracing). A p -value < 0.05 was considered statistically significant. The regression analysis revealed that the type of bracing used (traditional vs. modern) was a significant predictor for all three dependent variables: healing time, grip strength, and range of motion. For healing time, the negative β coefficient (-1.43) indicates that modern bracing significantly reduced healing time by an average of 1.43 weeks compared to traditional bracing, with a highly significant p -value (< 0.001). The R^2 value of 0.682 suggests that approximately 68.2 % of the variability in healing time can be explained by the type of bracing used. For grip strength, the positive β coefficient (2.76) indicates that modern bracing was associated with a significant improvement in grip strength, increasing it by an average of 2.76 kg compared to traditional bracing ($p < 0.001$). The R^2 value of 0.535 indicates that 53.5 % of the variability in grip strength can be attributed to the type of bracing. For range of motion, the positive β coefficient (17.85) demonstrates that modern bracing significantly improved range of motion by an average of 17.85° compared to traditional bracing, with a highly significant p -value (< 0.001). The R^2 value of 0.672 suggests that approximately 67.2 % of the variability in range of motion is explained by the type of bracing. In summary, modern bracing was shown to be a strong and statistically significant predictor for faster healing times, greater grip strength, and improved range of motion compared to traditional bracing techniques in this study population. These findings underscore the effectiveness of modern bracing in enhancing recovery outcomes across multiple dimensions for patients undergoing treatment for similar conditions.

A linear regression analysis was conducted to evaluate the predictability of pain score and ability to perform daily activities by the type of bracing used (traditional vs. modern) (Table 5, Fig. 4). The β coefficient represents the change in the dependent variable for each unit change in the predictor variable (modern bracing compared to traditional bracing). A p -value < 0.05 was considered statistically significant. The regression analysis demonstrated that the type of bracing used (traditional vs. modern) was a significant predictor for both pain score and ability to perform daily activities. The negative β coefficient of -1.45 for pain score means that modern bracing does really mean that modern bracing can reduce the pain scores by an average of 1.45 points out of 10, with a highly significant ($p < 0.001$). The R^2 value of 0.590 indicates that 0.590 of pain scores variability may be explained by type of the bracing. The positive β (17.40) coefficient suggests that modern bracing is associated with a significant improvement in functional performance in that it increased the percentage of daily activity ability by an

average of 17.40 % above what is associated with traditional bracing ($p < 0.001$). A value of R^2 equal to 0.712 means about 71.2 of the variability in the ability to perform daily activities can be explained by the type of bracing. To summarize, this study population showed that modern bracing was a strong and statistically significant prognostic factor for pain scores and performance of daily activities compared to traditional bracing techniques. Finally, these findings justify the efficiency of modern bracing in enhancing patient outcomes of treatment and rehabilitation processes in relation to pain management and functional recovery.

Discussion

The reason for this study was to evaluate the efficacy of previous bracing methods with regard to present techniques used for applying pediatric forearm fractures. The most common injuries in children are forearm fractures; for many years plaster or fiberglass casts have been the traditional methods to treat such injuries but functional bracing and EIN have developed in recent years as alternate methods to treat forearm fractures. These modern methods are meant to aid in earlier mobilization, potentially improving the time one is mobilized and the functional outcome. Despite this, few studies have compared the efficacy of these newer treatments with traditional bracing during healing time, functional recovery, and impact to a child's daily functions. The lack of comprehensive, comparative data, however, leaves a large hole in clinical knowledge, especially in those areas where resources are scarce, and the practice is traditional.

This study addresses the gap that exists for empirical evidence comparing traditional bracing to modern techniques with regard to outcomes of healing and functional recovery in pediatric forearm fractures. Both treatment methods are widely used but there is no direct comparative research available, which makes it difficult for healthcare providers to know if one process will outperform the other regarding outcomes of recovery. Therefore, it is also important to understand how these treatment methods affect children's functional capabilities and their quality of life from a medical professional's view and a parent's view in order to assist in making treatment decisions. The purpose of this study was to close that gap by directly comparing healing time, grip strength ranges of motion and functional recovery outcomes between children treated with traditional bracing with children treated with modern techniques. The rest of the study was formulated in order to accomplish these essential concerns. Its goal was to ascertain how long it took fractures to heal when pediatric patients were treated with traditional bracing and with newer methods, and in what respects. It also attempted to find the functional recovery of these children as measured by grip strength and range of motion in the affected arm. In addition, it was intended to incorporate parental feedback into the assessment because parents' understanding of a child's day-in, day-out recovery information can accent information of the ability to perform daily activities and pain level. The study aimed to attain these objectives in order to attain a comprehensive view of the effect of both methods of treatment and to help

clinicians determine the most ideal treatment protocols for pediatric fractures.

The priorities of this work were addressed in a prospective comparative design utilizing the enrolment of 40 pediatric patients with forearm fractures in whom conservative management was possible. Two groups of participants were formed, with one group having traditional bracing and the other being treated with one of the modern treatment techniques. Grip strength tests, range of motion measurements and radiographic imaging done with interval were used to assess healing. Simple surveys were used to collect parental feedback on the children's ability to perform daily activities and pain level. This multi-depth approach permitted the objective clinical measure and subjective parental experience to be compared in an abstract manner in order to have a whole picture of the process of recovery and its efficacy of treatment methods.

To enable evidence-based recommendations for pediatric forearm fractures treatment particularly in resource poor settings where the traditional treatment methods are still being practiced, this comprehensive methodology was designed.

Table 2 shows significant differences in healing indices between the traditional bracing group and the modern technique one in the present study's results. This was done specifically with reference to the fact that the mean healing time was notably longer for patients who had been treated using traditional bracing (5.93 versus 4.73 weeks for patients who were treated with new techniques) with a highly significant p -value below 0.001. Moreover, the grip strength was also significantly higher in modern technique group (7.51 vs. 5.07 kg, $p = 0.003$) and range of motion in modern technique group (135.05 vs. 118.20° in traditional bracing group, $p < 0.001$). These results indicate significant benefit from modern techniques to speed the healing and enhance functional recovery and joint mobility in pediatric forearm fractures.

Further relevance is given by comparison with recently published studies. Such an example can be seen in an investigation of functional recovery in pediatric forearm fractures from Hepping et al. (2022) [8], which found the majority of children showed limitations in movement three months following treatment, illustrating a need for faster rehabilitation strategies. This is in line with findings of the present study which found that modern techniques offered faster return to range of motion in the early stages of the recovery process which may be facilitated by decreasing the duration of functional limitations.

Additionally, in Soumekh et al. (2021) [17] study comparing casting alone versus functional bracing, no difference in refracture rates was found, and while modern techniques may not always prevent refractures, functional bracing may not be inferior to most modern techniques, though at a longer time to healing. This implies that modern techniques should be integrated as a modern treatment, especially for quicker functional recovery.

Also, studies on intramedullary nailing, as performed for instance by Dvid et al. (2024) [5] confirm that flexible intramedullary nails can furnish stable fixation and res-

toration with shorter recovery periods as those achieved in this study with the use of modern techniques, including functional bracing and elastic intramedullary nailing. To support this information, these results indicate that modern fixation methods, as used in this study, have a marked advantage over traditional bracing in pediatric forearm fractures.

The results of the study by Zavras et al. (2023) [21] also confirm the findings of the present study because the surgically treated fractures, which often demand internal fixation and generally heal faster and with fewer complications than non-operative bracing, go a long way in supporting the above conclusions. This corroborates the result of the present study that modern techniques involve less restrictive immobilization and early mobilization that yields better recovery outcome than the traditional methods.

A second study conducted by Bauer and Albanese (2022) [1] searched whether a brace prescription after a cast decreases the risk of refracture and found no effect. Despite this, failure to brace did not affect refracture rates, showing that extended immobilization was beneficial though modest, though they also noted the possible advantages of more rapid mobilization and recovery with the current strategies. These results are in line with findings from this study where modern techniques not only provided faster healing but also provided better functional results like grip strength and range of motion.

To summarize, the results of the present study add to a growing collection of studies that demonstrate modern techniques do not only lead to faster healing, but also to faster functional recovery in children's forearm fractures. It compares the result with other recent studies in order to highlight the shift in the treatment protocol preference for more active treatment that encompasses early mobilization and shorter healing times and its integration of modern treatment strategies into clinical practice.

Table 3, the results of that present study, clearly show that there is a striking difference in the simple ability to perform daily activities and the provision of pain scores between the traditional bracing and the modern techniques groups. Both mean pain scores at week 2 (4.5) and 4 (3.2) followed were higher ($p = 0.01$) for the population that was braced in the traditional manner versus those who were braced by modern techniques. Given that the outcome in terms in functional terms was better in the children who underwent modern techniques as they had a mean activity score of 7.8, compared to the traditional bracing group in which mean activity score was 5.4 ($p < 0.001$) and statistically significant. These results were clinically advantageous because they allow faster return of normal activity as well as a more effective alleviation of pain.

This agreed with a recent study by Widnall et al. (2020) [20] of pediatric torus fractures showing improved pain scores long term among children treated with more dynamic intervention particularly late in follow up. Consistent with those results, the study indicated that pain decreased dramatically by day 42 post injury, as did the results found in the present study for the modern treatment group. This shows that nowadays techniques that bring mobilization

earlier are more able to manage the pain and facilitate recovery than the traditional techniques, which often result in a long pain and slow functional recovery. Like Soumekh et al. (2021) [17], children treated with functional bracing after initial cast immobilization for both bone forearm fractures were examined by the same group. This showed that prolonged functional bracing decreased pain and permitted improved performance of daily activities when compared with traditional casting alone. The results from current study thus support the finding that the modern treatment group scored lower in terms of pain scores and better activity performance.

In a review of the cast wedging experience in pediatric forearm fractures, Freisleder et al. (2020) [7] reported minimal pain was shown with the procedure. The intervention is different however, it stresses that just as modified techniques of immobilization in which there is some movement or adjustment will provide better pain control. Thus, such an explanation can be made for the fact that the modern treatment methods in the current study, by means of more active management strategies like functional bracing or intramedullary nailing, led to lower pain scores compared with traditional bracing type where immobilization is rigid.

Furthermore, this result is further supported by the Bauer and Albanese (2022) study [1] on the present study regarding the role of functional braces in enhancing daily function. As in the present study, their research found that bracing did not reduce refracture rates, however, their bracing provided better pain relief and quicker return to function as compared to casting alone.

Finally, Knight et al. (2020) [10] in FORCE trial found that pain management of distal radius fracture in children with softer immobilization, such as bandages healed faster and had lower pain level. The present study agrees with the conclusion of Knight et al. (2020) [10] that less restrictive immobilization techniques, like modern bracing, are correlated with better pain scores and quicker return to baseline daily activities.

Finally, the results of the present study are in good agreement with other recent studies and strongly support that modern techniques of management of pediatric forearm fracture provide significant clinical benefit in terms of pain relief and enhanced functionality. The findings are in keeping with broader teachings of pediatric orthopedic care including early mobilization and less restrictive forms of immobilization.

Conclusions

The treatment techniques that are commonly available today, functional bracing, and elastic intramedullary nail, compared favorably with traditional bracing for the treatment of pediatric forearm fracture. Both modern methods and quicker healing times, better grip strength, better range of motion, and less pain helped to enhance functional recovery. The results provide support for the practice of modern techniques, in particular for those who are children, who require rapid recovery to regain normal activities and minimize any subsequent long term functional limitations.

They may ultimately contribute towards the development of treatment protocols for pediatric forearm fractures in situations where modern methods are available. These findings warrant further study in broader populations and the long-term effect.

References

1. Bauer M, Albanese S. Prescribing braces after forearm fractures does not decrease refracture rate. *Journal of Pediatric Orthopaedics B*. 2022;32:152-156.
2. Bergman E, Lempesis V, Jephsson L, Rosengren B, Karlsson M. Childhood distal forearm fracture incidence in Malmö, Sweden 1950 to 2016. *Journal of Wrist Surgery*. 2020;10(2):129-135.
3. Bernstein R. *Pediatric Forearm and Distal Radius Fractures*. Hamden, CT: Connecticut Orthopaedics; 2020. 11 p.
4. Caruso G, Caldari E, Sturla FD, Caldaria A, Re DL, et al. Management of pediatric forearm fractures: What is the best therapeutic choice? A narrative review of the literature. *Musculoskelet Surg*. 2021;105(3):225-234.
5. Dávid ÁL, Mucsina F, Antal E, Lamberti AG, Józsa G. Comparison of titanium versus resorbable intramedullary nailing in pediatric forearm fractures. *Children*. 2024;11(8):942.
6. Di Giacinto S, Pica G, Stasi A, Scialpi L, Tomarchio A, et al. The challenge of the surgical treatment of paediatric distal radius/forearm fracture: K wire vs plate fixation — outcomes assessment. *Med Glas (Zenica)*. 2021;18(1):208-215.
7. Freisleder F, Berberich T, Erb TO, Mayr J. Pain during cast wedging of forearm shaft and distal forearm fractures in children aged 3 to 12 years: A prospective, observational study. *Children (Basel)*. 2020;7(11):229.
8. Hepping A, Barvelink B, Ploegmakers J, van der Palen J, Geertzen J, et al. Functional recovery after reduced pediatric fractures of the forearm with respect to perceived limitations, common post-traumatic symptoms, range of motion, and dexterity: A prospective study. *Disabil Rehabil*. 2022;45:3560-3566.
9. Cukierman B, Gołaszewka K, Matuszczak E, Guszczyn T, Frankowski P, et al. Epidemiology of forearm fractures in the population of children and adolescents: Current data from Podlaskie Voivodeship, Poland. *Journal of Education, Health and Sport*. 2018;8(12):777-784. doi: 10.5281/zenodo.2529684.
10. Knight R, Dritsaki M, Mason J, Perry D, Dutton S. The Forearm Fracture Recovery in Children Evaluation (FORCE) trial: Statistical and health economic analysis plan for an equivalence randomized controlled trial of treatment for torus fractures of the distal radius in children. *Bone Joint Open*. 2020;1:205-213.
11. Ngissah R, Daleku J, Gakpotor D. Epidemiology and treatment outcome of paediatric forearm fractures at the Greater Accra Regional Hospital. *Postgrad Med J Ghana*. 2022.
12. Patel D, O'Hara N, Giampaolo G, Abzug J, Cruz A Jr. Variations in the preferred treatment of pediatric forearm fractures among practicing orthopedic surgeons. *J Pediatr Orthop Soc North Am*. 2022;5(2):78-85.
13. Poulblon AR, van der Windt AE, Ploegmakers JJW, Colaris JW. Ch. 25. Pediatric distal radius fractures. In: Jupiter J, Chammas M, eds. *Distal radius fractures: evidence-based management*. Amsterdam: Elsevier; 2021. 277-290. doi: 10.1016/B978-0-323-75764-5.00014-7.

14. Spahn K, Pring M, Collier M. Flexible nail treatment of pediatric both-bone forearm fractures. *J Orthop Trauma*. 2022;36(Suppl 3):S11-S12.

15. Somisetty TK, Seenappa H, Kumar KV, Shanthappa AH. Evaluation of the functional outcome of both bone forearm fractures in the pediatric population with the titanium elastic nailing system in a tertiary care center. *Cureus*. 2023;15(5):e38747.

16. Soudy E, Attia M, Mohamed H, Abdelwahab M, Lagha A. Surgical management of fracture both bone forearm in pediatric using elastic stable intramedullary nail. *The Egyptian Journal of Hospital Medicine*. 2022;86:299-305.

17. Soumekh L, Sylvanus T, Karlen A, Wahl C, Huser A, Truong W. Refracture rate of both bone forearm fractures: A retrospective comparison of casting alone versus casting and extended functional bracing. *J Pediatr Orthop*. 2021;41:267-272.

18. Tabrizi A, Afshar A, Haghmoradi M. Forearm longitudinal discrepancy after forearm fractures' fixation in pediatric: A

case series study. *Arch Trauma Res*. 2023;12:39. doi: 10.4103/atratr_58_22.

19. Talevski J, Sanders KM, Busija L, Beauchamp A, Duque G, et al. Health service use pathways associated with recovery of quality of life at 12-months for individual fracture sites: Analyses of the International Costs and Utilities Related to Osteoporotic fractures Study (ICUROS). *Bone*. 2021;144:115805.

20. Widnall J, Capstick T, Wijesekera M, Messahel S, Perry D. Pain scores in torus fractures. *Bone Joint Open*. 2020;1:3-7.

21. Zavras A, Monahan K, Winek N, Pan T, Altman G, et al. Conservative management with functional brace versus various surgical fixation techniques for humeral shaft fractures. *J Bone Joint Surg Am*. 2023;105:1112-1122.

Received 02.06.2025

Revised 08.07.2025

Accepted 11.07.2025

Information about authors

Hussain J. Alkhatteib, Assistant Professor, Consultant Orthopedic Surgeon, College of Medicine, Kufa University, Najaf, Iraq; e-mail: hussein.alkhatteib@uokufa.edu.iq; <https://orcid.org/0009-0001-5017-2447>
Sarah Mazin Naeem, PhD, Clinical Pharmacologist, Alsader Teaching Hospital, Najaf, Iraq; e-mail: sarahmazinnaeem@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-4676-9866>

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 funded completely by the authors.

Hussain J. Alkhatteib¹, Sarah Mazin Naeem²

¹College of Medicine, Kufa University, Najaf, Iraq

²Alsader Teaching Hospital, Najaf, Iraq

Вплив традиційного бандажування на час загоєння переломів передпліччя в дітей порівняно з сучасними методами

Резюме. Актуальність. Травми опорно-рухового апарату досить поширені серед дітей, причому переломи передпліччя є найпоширенішим типом, на який припадає приблизно 40 % усіх переломів довгих кісток у дитячій популяції. У лікуванні таких переломів дедалі частіше застосовуються сучасні методи, зокрема функціональні ортези, еластичні інтрамедулярні стрижні або інші підходи. Це спрямовано на скорочення часу іммобілізації, сприяння ранній мобілізації та, зрештою, прискорення одужання. **Мета:** оцінити ефективність традиційного бандажування порівняно із сучасними методами щодо часу загоєння, функціонального відновлення та знеболювання в дітей із переломами передпліччя. **Матеріали та методи.** Проведено проспективне порівняльне дослідження за участю 40 дітей віком від 4 до 14 років в одному медичному центрі. Їх було випадково розподілено на дві групи: традиційного бандажування ($n = 20$), у якій використовували гіпсові або скловолоконні пов'язки, а також традиційні інтрамедулярні стрижні, і групу сучасних методів ($n = 20$), у якій фіксацію виконували за допомогою функціональних ортезів або еластичних інтрамедулярних стрижнів. Основними показниками результату були час загоєння (у тижнях), сила стискання (у кілограмах), діапазон рухів у суглобах (у градусах), рівень болю (за шкалою від 0 до 10), здатність виконувати повсякденну діяльність (у відсотках від норми). **Результати.** У пацієнтів групи сучасних методів середній час загоєння був значно коротшим, ніж у групі традиційного бандажування:

4,73 проти 5,93 тижня ($p < 0,001$). Крім того, сила стискання й діапазон рухів були значно більшими в групі сучасних методів: 7,51 проти 5,07 кг ($p = 0,003$) та 135,05 проти 118,20° відповідно ($p < 0,001$). Результати цього дослідження свідчать про те, що сучасні методи прискорюють загоєння та позитивно впливають на функціональне відновлення, зокрема силу та рухливість. Щодо болю, група сучасних методів мала значно менший його рівень (2,15 проти 3,30, $p < 0,001$). Також було виявлено, що пацієнти цієї групи краще виконували повсякденні дії (86,85 проти 67,10 %; $p < 0,001$). Результати регресійного аналізу підтвердили значущість типу фіксації як предиктора всіх результатів, зокрема часу загоєння, сили стискання й діапазону рухів, з перевагою на користь сучасних методів ($p < 0,001$ для всіх показників). **Висновки.** Результати цього дослідження показують перш за все, що сучасні методи, як-от функціональні ортези й остеосинтез еластичними інтрамедулярними стрижнями, мають низку переваг над традиційним бандажуванням при лікуванні переломів передпліччя в дітей. Вони сприяють швидшому загоєнню, кращому функціональному відновленню, зменшенню болю та швидшому поверненню до звичного рівня активності. Отримані дані підтверджують доцільність використання сучасних методів у клінічній практиці, особливо в дітей, для поліпшення якості життя й результатів лікування.

Ключові слова: традиційне бандажування; сучасні методи; перелом; загоєння; передпліччя

Левицький А.Ф., Соболевський Ю.Л., Лиходій В.В., Ковальчук Д.Ю.
Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, м. Київ, Україна

Сучасна тактика лікування надвиросткових переломів плечової кістки у дітей та підлітків II типу за класифікацією Gartland: огляд літератури та метааналіз

Резюме. Актуальність. Переломи дистального епіметафізу плечової кістки в педіатричній практиці становлять від 16 до 50 % серед переломів кісток в цілому та 50–80 % від усіх внутрішньосуглобових пошкоджень верхньої кінцівки. Серед пошкоджень даної локалізації превалюють надвиросткові (3–18 %) та черезвиросткові переломи (57,5–70 %) переважно у дітей віком від 4 до 9 років. Епідеміологія типів надвиросткових переломів плечової кістки за класифікацією Гартленда (Gartland) має такий вигляд: I — 36,7 %; II — 26,2 %; III — 30,9 %; IV — 6,3 %. Якщо у світовій ортопедо-травматологічній практиці щодо лікування надвиросткових переломів типу I (зовнішня іммобілізація), типів III–IV (закрита/відкрита репозиція, внутрішня фіксація, зовнішня іммобілізація) досягнуто певного консенсусу, то щодо типу II активно обговорюється питання про те, чи необхідна внутрішня фіксація після закритої репозиції. **Мета:** визначити сучасну тактику лікування надвиросткових переломів плечової кістки у дітей та підлітків II типу за Gartland. **Матеріали та методи.** Методологія дослідження базується на рекомендаціях «Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analysis (PRISMA) guidelines». Пошук літературних джерел проводився з використанням сучасних вітчизняних та зарубіжних баз, глибина пошуку — за останні 5–7 років за такими термінами: *distal humerus, supracondylar fractures Gartland II, pediatric patients, treatment*. **Результати.** За результатами аналізу літературних джерел не існує консенсусу щодо лікування переломів типу II за Гартлендом. Одні автори характеризують оперативний метод лікування як традиційний, інші на підставі власного клінічного матеріалу говорять про високу ефективність консервативного лікування. Вагомим є точка зору про доцільність і ефективність обох методів. Автори обґрунтовують актуальність удосконалення й об'єктивізації показань до їх застосування, що дасть змогу відпрацювати узгоджену тактику лікування. **Висновки.** Надвиросткові переломи плечової кістки в педіатричній практиці становлять 3–18 %, трапляються переважно у дітей віком від 4 до 9 років. У світовій ортопедо-травматологічній практиці активно обговорюється питання щодо лікування переломів II типу за класифікацією Гартленда, які зустрічаються в 26,2 % випадків. Актуальним питанням сьогодення є визначення факторів ризику, які призводять до ускладнень, а також показань до застосування того чи іншого методу, що потребує подальшого вивчення.

Ключові слова: огляд; дистальний відділ плеча; надвиросткові переломи II типу за Gartland; пацієнти дитячого та підліткового віку; лікування

Вступ

Переломи дистального епіметафізу плечової кістки в педіатричній практиці становлять від 16 до 50 % серед переломів кісток в цілому та 50–80 % від усіх внутрішньосуглобових пошкоджень верхньої кінцівки [1]. Серед пошкоджень даної локалізації превалюють надвиросткові (3–18 %) та черезвиросткові переломи

(57,5–70 %) переважно у дітей віком від 4 до 9 років. З віком частка таких переломів зменшується, а типи переломів змінюються. Існують протиріччя щодо частки ураження домінантної руки [2].

Надвиросткові та черезвиросткові переломи частіше трапляються у хлопчиків під час гри надворі (47 %), вдома (31 %) та в навчальних закладах (7 %). Превалює

непрямий механізм пошкодження — падіння на руку (94 %) [3].

Існує кілька класифікацій для опису переломів даної ділянки, але найбільш вживаною в щоденній клінічній практиці є класифікація Гартленда (J.J. Gartland) [4], яка в подальшому була модифікована і на сьогодні представлена чотирма типами [5, 6].

Додатковою характеристикою надвиросткових переломів плечової кістки (НППК) є їх розподіл на згинальні (95–98 % випадків) та розгинальні (5–2 % випадків), які визначаються за кутом в сагітальній площині, який утворений проксимальним та дистальним відламками: кут, відкритий допереду, характеризує згинальний тип, дозад — розгинальний [7].

Епідеміологія типів надвиросткових переломів за класифікацією Гартленда має такий вигляд: I — 36,7 %; II — 26,2 %; III — 30,9 %; IV — 6,3 % [8].

У світовій ортопедо-травматологічній практиці щодо лікування надвиросткових переломів типу I (зовнішня іммобілізація), типів III–IV (закрита/відкрита репозиція, внутрішня фіксація, зовнішня іммобілізація) досягнуто певного консенсусу, а щодо переломів типу II активно обговорюється питання про те, чи необхідна внутрішня фіксація після закритої репозиції.

Мета: визначити сучасну тактику лікування надвиросткових переломів плечової кістки у дітей та підлітків II типу за Gartland.

Матеріали та методи

Методологія дослідження базується на рекомендаціях «Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analysis (PRISMA) guidelines» [9]. Пошук літературних джерел проводився з використанням сучасних вітчизняних та зарубіжних баз, глибина пошуку становила останні 5–7 років за такими термінами: review, distal humerus, supracondylar fractures Gartland II, pediatric patients, treatment (рис. 1; табл. 1).

Критерії включення: 1) пацієнти дитячого та підліткового віку з надвиростковими переломами II типу за Гартлендом; 2) літературні джерела з достатнім рівнем доказовості (I–IV), у яких подана статистично достатня група пацієнтів за кількістю та терміном спостереження.

Критерії виключення: 1) надвиросткові переломи I, III–IV типів за Гартлендом; 2) публікації (рецензії, тези або статті), які не мають достатньої інформативної доказової бази та представлені окремими клінічними випадками.

Оформлення результатів пошуку включало: першого автора, рік публікації, рівень доказовості, дизайн дослідження, тип перелому, кількість і вік пацієнтів.

У даній роботі було використане програмне забезпечення RStudio (<https://www.rstudio.com/>).

Результати

Отримані результати аналізу відібраних літературних джерел наведені в табл. 2.

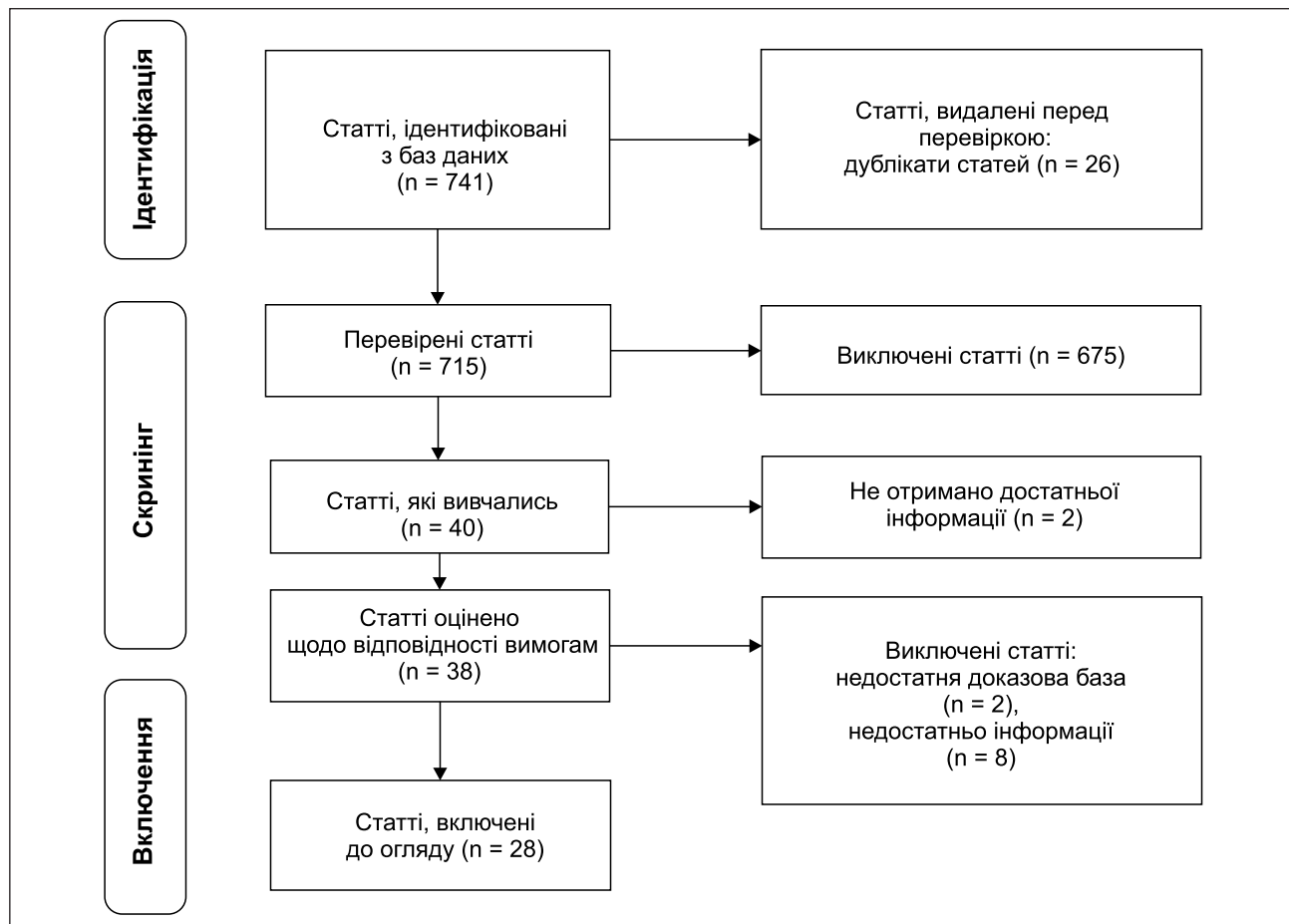


Рисунок 1. Блок-схема відбору літературних джерел PRISMA

Таблиця 1. Характеристика відібраних літературних джерел для подальшого аналізу

Автор, рік, країна	Об'єм дослідження	Дизайн дослідження, рівень доказовості
C.C. McCartney і співавт., 2022, USA [10]	У дослідження було включено 54 пацієнти. Середній загальний вік становив $5,2 \pm 2,5$ року. Після закритої репозиції у відділенні невідкладної допомоги 38 (70 %) пацієнтів були успішно проліковані шляхом закритої репозиції + гіпсова пов'язка, 16 (30 %) пацієнтам знадобилося оперативне втручання	Ретроспективне порівняльне, III
P. Ojeaga і співавт., 2020, USA [11]	До клінічної групи увійшли 77 пацієнтів, яким була проведена закрыта репозиція та гіпсова іммобілізація. У 76,62 % пацієнтів було збережено положення репозиції, вони не потребували хірургічного лікування з перкутанною фіксацією	Проспективне, II
J.Z. Amaral і співавт., 2024, USA [12]	Дослідну групу становили 85 пацієнтів, які були класифіковані як такі, що мають НППК типу IIA. Середній вік когорти становив 4,2 року (діапазон: 1,1–10,2 року), 52 % пацієнтів становили хлопчики. Потреба в оперативному лікуванні була у 7,1 % випадків	Проспективне, IV
T. Liu і співавт., 2024, China [13]	Симуляційне дослідження з використанням нормальних рентгенограм за допомогою Adobe Photoshop 14.0 з подальшою верифікацією за допомогою клінічних випадків. Стандартні бічні зображення були зібрані з січня 2008 року до лютого 2020 року. Adobe Photoshop використовувався для моделювання надвиросткових переломів IIA типу за Gartland з різним ступенем кута нахилу в сагітальній площині	Експериментальне дослідження
Y. Tomori і співавт., 2023, Japan [14]	Наведені результати лікування 102 дітей з надвиростковими переломами типу II за Гартлендом, яким проведено лікування шляхом закритої репозиції та черезшкірної фіксації. Вік на момент травми становив 7–13 років, а тривалість післяопераційного спостереження — 12–16 місяців	Проспективне, III
J.S. Sanders і співавт., 2023, USA [15]	105 пацієнтів віком від 2 до 12 років з переломами типу IIA були розподілені на дві групи, яким проводилось консервативне та хірургічне лікування	Проспективне, II
M. Silva і співавт., 2020, USA [16]	Проаналізовані клінічні дані та рентгенограми 1107 пацієнтів з надвиростковими переломами II типу. 799 (72,2 %) переломів проліковано нехірургічним шляхом, а 308 (27,8 %) — оперативно	Ретроспективне одноцентрове, III
M. Booker і співавт., 2025, USA [17]	Метою даної роботи було проведення комплексного аналізу неоперативного лікування переломів II типу за Гартлендом у дітей	Ретроспективне, когортне, III
Jie Er Janice Soo і співавт., 2024, Singapore [18]	Автори проаналізували результати лікування 142 дітей з переломами II типу за класифікацією Гартленда, серед яких 34 (23,9 %) пацієнти перенесли хірургічну фіксацію, тоді як 108 (76,1 %) пацієнтів отримували консервативне лікування. У семи пацієнтів спочатку планувалося консервативне лікування, але пізніше їх було госпіталізовано для хірургічного втручання	Ретроспективне обсерваційне когортне, III
C. Iorio і співавт., 2018, Italy [19]	Було проаналізовано групу із 41 пацієнта, яким проводили репозицію та іммобілізацію гіпсовою пов'язкою та репозицію з перкутанною фіксацією з приводу переломів типу II за Гартлендом	Ретроспективне порівняльне, III
V. Pavone і співавт., 2022, Italy [20]	Метою цього дослідження була оцінка сучасних тенденцій у лікуванні НППК, а також бажаного протоколу післяопераційного спостереження серед членів Європейського дитячого ортопедичного товариства	Опитування, II
A. Surd і співавт., 2025, Romania [21]	Метою цього дослідження було встановлення оптимальної стратегії лікування НППК II та III типу за класифікацією Гартленда у дітей з акцентом на ефективності та безпеці малоінвазивних методів, особливо різних методів пінінгу за допомогою спиці Кіршнера	Ретроспективне порівняльне, III

Таблиця 2. Результати дослідження літературних джерел

Автор, рік, країна	Результати дослідження	Висновки та рекомендації
1	2	3
C.C. McCartney і співавт., 2022, USA [10]	Кут площини перелому на рентгенограмі становив $13,2 \pm 8,4^\circ$ серед пацієнтів, які лікувались консервативно, $19,8 \pm 7,5^\circ$ серед оперованих ($P = 0,008$), після репозиції — $3,0 \pm 3,4^\circ$ та $10,0 \pm 7,2^\circ$ відповідно ($P < 0,0001$). Середній індекс передньої лінії плечової кістки на рентгенограмі становив 0,34 в неоперованій групі та 0,13 серед оперованих ($P = 0,104$). Вік пацієнтів, кут Баумана до та після репозиції, а також кут згинання шини після репозиції суттєво не відрізнялися між групами	Закрита репозиція під седацією є життєздатним варіантом лікування НППК типу IIA за класифікацією Гартленда. Збільшення поширення перелому на рентгенограмах може допомогти передбачити неефективність консервативного лікування після закритої репозиції
P. Ojeaga і співавт., 2020, USA [11]	Закрита репозиція, яка була проведена у 76,62 % пацієнтів, була без втрати зіставлення, пацієнти не потребували хірургічного лікування. У 23,38 % випадків була проведена повторна репозиція та перкутанна фіксація	У цій серії поліпшені та прийнятні рентгенологічні параметри були досягнуті шляхом закритої репозиції у більшості мінімально зміщених переломів типу IIA, лікованих закритою репозицією та імобілізацією. Це дослідження свідчить про ефективність неоперативної закритої репозиції під седацією з імобілізацією окремих НППК типу IIA
J.Z. Amaral і співавт., 2024, USA [12]	Вторинне зміщення відзначалося у 7,1 % випадків ($n = 6$). З цих шести випадків два були оцінені хірургами як такі, що мають допустиме значення. В чотирьох випадках була проведена повторна закрыта репозиція та перкутанна фіксація. Частота переходу на хірургічне лікування НППК типу IIA становила 4,7 %	Дане дослідження показало, що у 4,7 % випадків пацієнти потребують хірургічного лікування. Необхідні подальші дослідження для визначення специфічних факторів ризику втрати репозиції при переломах типу IIA
T. Liu і співавт., 2024, China [13]	У тих випадках, коли лінія переднього краю плечової кістки була дотичною до голівки, спостерігалася втрата згинання на 19° ($11-30^\circ$), яка збільшувалася з терміном після травми ($r = 0,731$, $P = 0,000$). Різниця в куті нахилу в сагітальній площині також впливала на ступінь втрати згинання ліктьового суглоба ($r = -0,739$, $P = 0,000$). Чим більш горизонтальна лінія перелому в латеральній проекції, тим більша втрата згинання ліктьового суглоба	Миттєва втрата згинання ліктя після надвиросткових переломів типу IIA за Гартлендом збільшується з терміном після травми та зменшується з кутом нахилу в сагітальній площині. Коли передній край плечової кістки розташований дотично до голівки, середня втрата згинання ліктя становить 19° . Ці результати забезпечують кількісний орієнтир для прийняття клінічних рішень щодо лікування даних переломів
Y. Tomori і співавт., 2023, Japan [14]	Пацієнти лікувались шляхом закритої репозиції та черезшкірної фіксації. Не було відмічено таких післяопераційних ускладнень, як інфекція, параліч нерва, варусна або вальгусна деформація	Для збереження анатомічної репозиції закрыта репозиція та перкутанна фіксація є обґрунтованою при лікуванні НППК згинального типу у дітей з переломами II типу за Гартлендом
J.S. Sanders і співавт., 2023, USA [15]	Обстежено 99 пацієнтів, серед яких 45 лікувались консервативно, 54 — оперативно. Група оперованих пацієнтів мала в середньому на 6° більший задній кут нахилу в місці перелому до операції ($P < 0,05$). Ускладнення були подібними між неоперативною та оперативною групами: рефракція (4,4 проти 5,6 %), аваскулярний некроз (2,2 проти 1,9 %) та інфекція (0 проти 1,9 %) ($P > 0,05$)	Всупереч рекомендаціям Американської академії хірургів-ортопедів, близько 90 % пацієнтів з надвиростковими переломами типу IIA можна лікувати консервативно та досягти хороших рентгенологічних та функціональних результатів. Пацієнти, які лікуються консервативно, повинні перебувати під ретельним наглядом для оцінки ранньої втрати репозиції та необхідності хірургічного втручання
M. Silva і співавт., 2020, USA [16]	Загалом 799 (72,2 %) переломів було проліковано консервативно, а 308 (27,8 %) — хірургічним шляхом. Жоден з переломів, які лікували оперативно, не продемонстрував залишкової деформації, при консервативному вона становила 14,1 %	Незважаючи на помірну залишкову деформацію при консервативному лікуванні, кінцеві функціональні результати не мали суттєвих відмінностей в обох групах

Закінчення табл. 2

1	2	3
M. Booker і співавт., 2025, USA [17]	Показаннями до консервативного лікування переломів типу II були: зміщення на 2–15 мм або розгинання на 15–20° у латеральній проекції та частково інтактний задній кортикальний шар, який може підтримувати репозицію без фіксації, а також переломи з мінімальними ротаційними деформаціями, відсутністю коронального зміщення та відсутністю значного розгинання дистального фрагмента	Переломи типу II за Гартлендом традиційно лікуються оперативним шляхом, однак деякі переломи типу IIA можуть лікуватися закритою репозицією та зовнішньою іммобілізацією. Існує ризик повторного зміщення та невдачі при неоперативному лікуванні, а фактори ризику включають значну початкову ротаційну деформацію, зміщення > 15 мм, більш значне розгинання дистального фрагмента плечової кістки. Пацієнтів та їхні родини слід належно проконсультувати щодо ризиків та переваг обох підходів, а рішення щодо лікування слід приймати індивідуально
Jie Er Janice Soo і співавт., 2024, Singapore [18]	Клінічна група включала 142 пацієнти, середній вік яких становив 5,7 року ($SD \pm 2,5$). Значущими параметрами були: порушення передньої кори, наявність медіального розщеплення та порушення конфігурації «пісочного годинника» ($p = 0,001$, $P < 0,001$ та $P = 0,004$ відповідно). Не було виявлено різниці при консервативному та оперативному лікуванні, яка визначалася за допомогою аномальної передньої лінії плечової кістки (11/34, або 32,4 % проти 45/108, або 41,7 %, $P = 0,422$) або кута Баумана (середній кут 75,2° проти 73,9°, $P = 0,244$)	Аналіз дитячого НППК типу II за Гартлендом з використанням додаткових характеристик порушення передньої кортикальної речовини, наявності медіального розщеплення та порушення «пісочного годинника» дозволяє точніше оцінити стабільність перелому, а також уникнути непотрібного хірургічного втручання або мінімізувати його
C. Iorio і співавт., 2018, Italy [19]	У двох пацієнтів у групі А (консервативне лікування) розвинулася деформація кубітуса варус, а в одного пацієнта в групі В (оперативне лікування) спостерігалася поверхнева інфекція в місці проведення фіксуючої конструкції. Кут Баумана (BA) був поза межами норми у двох випадках консервативної групи, а передня плечова лінія (AHL) розділила головку кістки навпіл у 42,1 % пацієнтів у групі А та у 73,2 % у групі В ($P < 0,05$)	Цілком обґрунтовано можна очікувати задовільних результатів як після консервативного, так і після хірургічного лікування переломів II типу, якщо застосовувати основні принципи обох методів лікування. Імовірно, слід зосередитися на двох параметрах — ускладненнях та кращій тенденції в хірургічній групі щодо втрати згинання та гіперекстензії ураженого ліктя
V. Pavone і співавт., 2022, Italy [20]	Проведено опитування серед 184 активних членів Європейського дитячого ортопедичного товариства. Серед респондентів 64,1 % мали досвід лікування понад 10, а 55,4 % — понад 20 випадків НППК. Закрита репозиція, перкутанна фіксація були кращими варіантами лікування переломів типу II та III за класифікацією Гартленда для 79,9; 95,5 та 84,8 % респондентів відповідно	Члени Європейського дитячого ортопедичного товариства вважають, що досвід хірурга, метод лікування та конфігурація штифтів є основними факторами, які потенційно впливають на результат лікування переломів типу II та III за класифікацією Гартленда
A. Surd і співавт., 2025, Romania [21]	Методи лікування НППК різняться залежно від типу перелому (класифікація Гартленда). Вони можуть бути консервативними або хірургічними. Немає чіткого консенсусу або рекомендацій щодо лікування складних НППК (II, III типи за Гартлендом). Переломи II та III типів найчастіше лікуються закритою репозицією та черезшкірною фіксацією дротом Кіршнера або відкритою репозицією з фіксацією залежно від ступеня зміщення та уподобань хірурга-ортопеда	Дослідження показують, що лише латеральна фіксація є безпечною та ефективною, але доведено, що перехресна фіксація забезпечує більшу стабільність. Сучасне лікування даних переломів повинно зосереджуватися на мінімально інвазивних методах та уникати відкритої репозиції, коли це можливо, щоб забезпечити найкращий результат для пацієнтів

НППК в педіатричній практиці є одними з найпоширеніших травматичних пошкоджень. Погляди на лікування переломів II типу за Гартлендом характеризуються протиріччями щодо застосування шляхів реалізації: закрита репозиція та гіпсова пов'язка; закрита репозиція, перкутанна фіксація та гіпсова іммобілізація. Оптимальне лікування даних пошкоджень ще не повністю з'ясоване [17].

Дослідження, які присвячені аналізу результатів неоперативного лікування НППК II типу, вказують на високий рівень невдалих результатів, які становлять близько 20–25 % та проявляються втратою репозиції, деформаціями, які потребують коригувальних остеотомій, ішемічною контрактурою Фолькмана [22, 23].

Однак у багатьох дослідженнях доведено доцільність і ефективність консервативного лікування [24, 25].

Незважаючи на дискусію, найбільш реалістичною є точка зору, що обидва способи лікування (консервативний та хірургічний) є придатними для застосування при НППК II типу за Гартлендом та забезпечують хороші функціональні та радіологічні результати. Немає достатньо наукових доказів, щоб стверджувати, що один із цих методів лікування є кращим за інший при лікуванні даних переломів [26].

Тому актуальним питанням сьогодення є визначення факторів ризику, які призводять до ускладнень, а також показань до застосування того чи іншого методу [27].

Дослідження факторів ризику, які зумовлюють збільшення частоти невдалих випадків при консервативному лікуванні, допомагають стратифікувати пацієнтів щодо вибору оптимального методу лікування. Серед головних негативних чинників виділяють: наявність початкової ротаційної деформації, суттєве зміщення, малий кут плечового виростка при першому зверненні, нездатність відновити дистальний «пісочний годинник» плечової кістки та перпендикулярну відстань від передньої лінії плечової кістки до головки. Зазначені фактори пов'язані зі збільшенням частоти невдалого консервативного лікування і обґрунтовують доцільність внутрішньої фіксації. Також пацієнти, які можуть мати проблеми з іммобілізацією гіпсовою пов'язкою та дотриманням обмежень (проблеми з поведінкою або затримка розвитку), можуть мати ризик невдалого консервативного лікування [28–30].

Висновки

1. Надвиросткові переломи плечової кістки в педіатричній практиці становлять 3–18 %, трапляються переважно у дітей віком від 4 до 9 років. У світовій ортопедо-травматологічній практиці активно обговорюється питання щодо лікування переломів II типу за класифікацією Гартленда, які зустрічаються в 26,2 % випадків.

2. У зв'язку з відсутністю об'єктивної доказової бази про переваги консервативного чи оперативного методу лікування обидва способи є придатними для застосування при даному типі пошкоджень. Тому актуальним питанням сьогодення є визначення факторів ризику, які призводять до ускладнень, показань до застосування того чи іншого методу, що потребує подальшого вивчення.

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. Левицький А.Ф. — розробка та дизайн; Соболевський Ю.Л. — аналіз та корекція матеріалів дослідження; Лиходій В.В., Ковальчук Д.Ю. — аналіз літературних джерел, написання фрагментів роботи.

Список літератури

1. Heffernan MJ, Lucak T, Igboke L, et al. The Reverse Oblique Supracondylar Humerus Fracture: Description of a Novel Fracture Pattern. *J Pediatr Orthop.* 2020;40(2):131–137. doi: 10.1097/BPO.0000000000001395.
2. Bekmez S, Camp MW, Ling R, et al. Supracondylar Humerus Fractures in Older Children: Success of Closed Reduction and Percutaneous Pinning. *J Pediatr Orthop.* 2021;41(4):242–248. doi: 10.1097/BPO.0000000000001732.
3. Бур'янов О.А., Науменко В.О. та інші. Надвиросткові переломи плечової кістки у дітей та підлітків: сучасні погляди на діагностику та лікування. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія «Медицина».* 2024;1(69):5–10. doi: 10.32782/2415-8127.2024.69.1.
4. Gartland JJ. Management of supracondylar fractures of the humerus in children. *Surg Gynecol Obstet.* 1959;109(1):145–54.
5. Heal J, Bould M, Livingstone J. Reproducibility of the Gartland classification for supracondylar humeral fractures in children. *J of Orthop Surg.* 2007;15:12–14. doi: 10.1177/230949900701500104.
6. Calogero V, Aulisa AG, Careri S, et al. Evaluation of Gartland Classification, Baumann Angle and Anterior Humeral Line in Paediatrics Supracondylar Fractures: An Inter and Intra-Observer Reliability Study. *J Clin Med.* 2023;13(1):167. doi: 10.3390/jcm13010167.
7. Teo TL, Schaeffer EK, Habib E, et al. Assessing the reliability of the modified Gartland classification system for extension-type supracondylar humerus fractures. *Journal of Children's Orthopaedics.* 2019;13(6):569–574. doi: 10.1302/1863-2548.13.190005.
8. Santos IA, Cruz MAF, Souza RC, et al. Epidemiology of Supracondylar Fractures of the Humerus in Children. *Archives of health investigation.* 2024;13(1):18–23. doi: 10.21270/archi.v13i1.6324.
9. Liberati A, Altman DG, Tetzlaff J, et al. The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate healthcare interventions: explanation and elaboration. *PLoS Med.* 2009 Jul 21;6(7):1000100. doi: 10.1371/journal.pmed.1000100.
10. McCartney CC, Thompson S, Waller G. Gartland Type IIa Supracondylar Humerus Fractures: Outcomes of Attempted Nonoperative Management. *J Pediatr Orthop.* 2022;42(6):314–320. doi: 10.1097/BPO.0000000000002154.
11. Ojeaga P, Wyatt CW, Wilson P. Pediatric Type II Supracondylar Humerus Fractures: Factors Associated With Successful Closed Reduction and Immobilization. *J Pediatr Orthop.* 2020;40(8):690–696. doi: 10.1097/BPO.0000000000001586.

12. Amaral JZ, Schultz RJ, Martin BM, et al. Evaluating One-Week Post-Casting Alignment Checks and Surgical Intervention Rates in Pediatric Type IIA Supracondylar Humeral Fractures. *Iowa Orthop J.* 2024;44(2):77-82. PMID: 39811178; PMCID: PMC11726482.
13. Liu T, Liu X, Zhang Z, et al. Assessment of Instant Loss of Elbow Flexion in Children with Untreated Gartland IIA Humeral Supracondylar Fractures — A Simulation Study with Lateral Elbow Radiographs. *Orthop Surg.* 2023;15(7):1742-1748. doi: 10.1111/os.13767.
14. Tomori Y, Nanno M, Majima T. Clinical Results of Closed Reduction and Percutaneous Pinning for Gartland Type II Flexion-Type Supracondylar Humeral Fractures in Children: Report of Three Cases. *J Nippon Med Sch.* 2023;90(3):294-300. doi: 10.1272/jnms.JNMS.2023_90-402.
15. Sanders JS, Ouillette RJ, Howard R, et al. Nonoperative Versus Operative Treatment of Type IIA Supracondylar Humerus Fractures: A Prospective Evaluation of 99 Patients. *J Pediatr Orthop.* 2023;43(1):e9-e16. doi: 10.1097/BPO.0000000000002282.
16. Silva M, Day MJ, Aceves-Martin B, et al. Sagittal Plane Residual Deformity in Pediatric Type II Supracondylar Humerus Fractures. *J Pediatr Orthop.* 2020;40(7):e547-e553. doi: 10.1097/BPO.0000000000001512.
17. Booker M, Sumandea F, Pandya N, et al. Nonoperative Management of Gartland Type II Supracondylar Humeral Fractures: A Comprehensive Review. *Curr Rev Musculoskelet Med.* 2025;18:48-53. doi: 10.1007/s12178-024-09937-4.
18. Jie Er Janice Soo, Kenneth Pak Leung Wong, Neeraj Mishra, et al. Subclassification of Gartland extension-type II paediatric humerus supracondylar fracture using additional characteristics of breach of anterior cortex, presence of medial comminution and disruption of the hourglass minimizes unnecessary surgery. *Journal of Orthopaedic Reports.* 2024;3(2):100264. doi: 10.1016/j.jorep.2023.100264.
19. Iorio C, Crostelli M, Mazza O, et al. Conservative versus surgical treatment of Gartland type 2 supracondylar humeral fractures: What can help us choosing? *J Orthop.* 2018 Dec 18;16(1):31-35. doi: 10.1016/j.jor.2018.12.001.
20. Pavone V, Vescio A, Accadbled F. Current trends in the treatment of supracondylar fractures of the humerus in children: Results of a survey of the members of European Paediatric Orthopaedic Society. *J Child Orthop.* 2022;16(3):208-219. doi: 10.1177/18632521221106379.
21. Surd A, Muresan R, Ciongradi CI, et al. Modern Treatment of Supracondylar Humeral Fractures in Children. *Children (Basel).* 2025;12(5):556. doi: 10.3390/children12050556.
22. Salonen A, Niemi ST, Kannus P, et al. Increased incidence of distal humeral fracture surgery and decreased incidence of respective corrective osteotomy among Finns aged 0 to 18 years between 1987 and 2016: a population-based study. *J Child Orthop.* 2019;13(4):399-403. doi: 10.1302/1863-2548.13.190049.
23. Rehm A, Worley RJ, Osman H, et al. Orthopedic or Surgical Treatment in Gartland Type II Supracondylar Humerus Fractures: A Systematic Review. *Indian J Orthop.* 2025;59(3):450-451. doi: 10.1007/s43465-025-01340-6.
24. Sisman A, Avci O, Cepni SK, et al. Is There a Chance to Treat Modified Gartland Type IIB Pediatric Supracondylar Humerus Fractures With Closed Reduction and Casting? *J Pediatr Orthop.* 2022;42(8):e821-e827. doi: 10.1097/BPO.0000000000002210.
25. Zhu D, Wen Y, Wang Q, et al. Conservative versus surgical treatment of Gartland type II supracondylar humeral fractures in children. *J Pediatr Orthop B.* 2024;33(6):568-573. doi: 10.1097/BPB.0000000000001170.
26. Barber-Vidal I, Miranda I, Miranda FJ. Orthopedic or Surgical Treatment in Gartland Type II Supracondylar Humerus Fractures: A Systematic Review. *JOIO.* 2024;58:1768-1776. doi: 10.1007/s43465-024-01227-y.
27. Baumann AN, Anaspure O, Patel S, et al. Examining Outcomes and Complications for Operative Versus Nonoperative Treatment of Pediatric Type II Supracondylar Humerus Fractures: A Systematic Review of Comparative Studies. *J Pediatr Orthop.* 2025;45(1):e1-e9. doi: 10.1097/BPO.0000000000002789.
28. Ross C, Alqubaisi M, Pillai A. A Preliminary Investigation of Cast Anxiety in General Orthopaedic Practice. *Arch Bone Jt Surg.* 2020;8(1):44-49. doi: 10.22038/abjs.2019.35375.1931.
29. Yıldırım T, Kürk MB, Akpınar E, et al. Risk factors related reduction loss in nonoperatively treated Type II supracondylar humerus fractures. *Ulus Travma Acil Cerrahi Derg.* 2022;28(9):1340-1346. doi: 10.14744/ijtes.2021.61350.
30. Samaila EM, Auregli L, Pezzè L, et al. Medium-term clinical results in the treatment of supracondylar humeral fractures in children: does the surgical approach impact outcomes? *J Orthop Traumatol.* 2024;25(1):43. doi: 10.1186/s10195-024-00781-3.

Отримано/Received 05.06.2025

Рецензовано/Revised 19.06.2025

Прийнято до друку/Accepted 17.07.2025

Information about authors

Anatolii F. Levytskyi, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Pediatric Surgery, Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine; e-mail: levytska.f@gmail.com, pedsurg_nmu@yahoo.com; phone: +380 (67) 725-14-74, +380 (44) 236-70-52; <https://orcid.org/0000-0002-4440-2090>

Yurii L. Sobolevskyi, PhD in Medicine, Associate Professor, Department of Traumatology and Orthopedics, Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine; e-mail: soburik@icloud.com; phone: +380 (67) 935-94-15; <https://orcid.org/0000-0002-8690-8620>

Viktor V. Lykhodii, PhD in Medicine, Associate Professor, Department of Traumatology and Orthopedics, Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine; e-mail: kafrtraum@ukr.net; phone: +380 (96) 708-90-60; <https://orcid.org/0000-0002-8125-0225>

Dmytro Yu. Kovalchuk, PhD in Medicine, Associate Professor, Department of Traumatology and Orthopedics, Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine; e-mail: kovadimid@gmail.com; phone: +380 (50) 947-72-83; <https://orcid.org/0000-0003-3106-6048>

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.F. Levytskyi — development and design; Yu.L. Sobolevskyi — analysis and correction of research materials; V.V. Lykhodii, D.Yu. Kovalchuk — analysis of literary sources, writing fragments of work.

A.F. Levytskyi, Yu.L. Sobolevskyi, V.V. Lykhodii, D.Yu. Kovalchuk
Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine

Modern tactics of treatment for Gartland II supracondylar fractures of the humerus in children and adolescents: a literature review and meta-analysis

Abstract. Background. Fractures of the distal epimetaphysis of the humerus account for 16 to 50 % of all bone fractures and 50–80 % of all intra-articular injuries of the upper limb in pediatric practice. Among the injuries of this location, supracondylar (3–18 %) and transcondylar fractures (57.5–70 %) predominate, mainly in children aged 4 to 9 years. The epidemiology of supracondylar fracture types according to the Gartland classification is as follows: I – 36.7 %; II – 26.2 %; III – 30.9 %; IV – 6.3 %. In the global orthopedic and traumatology practice, a certain consensus has been reached regarding the treatment of supracondylar fractures type I (external immobilization), type III–IV (closed/open reduction, internal fixation, external immobilization), but regarding type II, the question is actively discussed: is internal fixation necessary after closed reduction? The purpose was to determine the current treatment for Gartland II supracondylar fractures of the humerus in children and adolescents. **Material and methods.** The research methodology is based on the recommendations of the Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analysis guidelines. The search for literature sources was carried out using modern domestic and foreign databases,

the depth of the search was the last 5–7 years using the following terms: distal humerus, supracondylar fractures Gartland II, pediatric patients, treatment. **Results.** According to the results of the analysis of literary sources, there is no consensus on the treatment of Gartland II fractures. Some authors characterize the surgical method of treatment as traditional; others claim the high effectiveness of conservative treatment based on their own clinical material. The point of view on the feasibility and effectiveness of both methods is significant. The authors justify the relevance of improving and objectifying the indications for their use, which will allow for the development of a coordinated treatment strategy. **Conclusions.** Supracondylar fractures of the humerus in pediatric practice account for 3–18 %, mainly in children aged 4 to 9 years. In the global orthopedic and traumatology practice, the issue of treating Gartland II fractures, which occur in 26.2 % of cases, is actively discussed. A pressing issue today is the identification of risk factors that lead to complications, and indications for the use of a particular method, which requires further study.

Keywords: review; distal humerus; Gartland II supracondylar fractures; pediatric and adolescent patients; treatment

Суворов В.Л.¹, Кулик Ю.А.¹, Дем'ян Ю.Ю.¹, Полулях Д.М.¹, Євлантьєва Т.А.¹,
Ларкевич О.Г.¹, Козік Є.В.¹, Карпінська О.Д.²

¹ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», м. Київ, Україна

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

Ефективність і ризику зовнішньої фіксації при переломах великогомілкової кістки: метааналіз методів Ілізарова і Тейлора

Резюме. Актуальність. Переломи великогомілкової кістки залишаються однією з найпоширеніших і водночас найскладніших травм опорно-рухового апарату. Їх лікування часто ускладнюється значним пошкодженням м'яких тканин, відкритими ранами, нестабільністю відламків та ризиком інфекційних ускладнень. У таких випадках методи зовнішньої фіксації є важливим інструментом стабілізації, що дозволяє забезпечити контроль над положенням відламків при мінімальній інвазивності. Серед основних методів зовнішньої фіксації при лікуванні переломів великогомілкової кістки найбільш широке застосування отримали класичний апарат Ілізарова та сучасні гексаподні системи, як-от просторова рамка Тейлора (Taylor Spatial Frame, TSF). **Мета:** провести систематичне порівняння ефективності та безпечності методу Ілізарова та просторової рамки Тейлора у лікуванні переломів великогомілкової кістки з урахуванням часу консолідації перелому, частоти ускладнень, часу зрощення та ступеня корекції деформацій. **Матеріали та методи.** Пошук джерел проводився в базах даних PubMed, Semantic Scholar та Scopus за період з 2014 до 2025 року. За всіма базами було виявлено 105 робіт. Усі включені дослідження мали ретроспективний когортний дизайн. Рандомізованих контрольованих досліджень, що відповідали критеріям PICO, виявлено не було. **Результати.** Загальна кількість спостережень становила 723 пацієнти (338 осіб — метод Ілізарова, 385 — Тейлора). Не визначено доказів суттєвої різниці в кількості відкритих і закритих переломів. Незважаючи на високу гетерогенність ($I^2 = 92\%$) досліджень, не визначено значущої різниці між системами щодо термінів консолідації переломів. Терміни загоєння сильно варіювалися залежно від місця перелому, його складності, первинного стану. Група Ілізарова мала трохи вищий, але не значущий індекс фіксації. Різниця в ризику інфекцій між методами не є статистично значущою. Про величину залишкової деформації повідомлено у двох дослідженнях. Кут залишкової деформації великогомілкової кістки в групі Ілізарова був на $0,7^\circ$ більшим, ніж у групі TSF, різниця статистично значуща. **Висновки.** За даними проведеного метааналізу, при порівнянні ефективності та безпечності методу Ілізарова та просторової рамки Тейлора у лікуванні переломів великогомілкової кістки не було виявлено статистично значущої різниці між цими системами ані за термінами зрощення перелому, ані за кількістю ускладнень. Водночас рамка Тейлора показала вірогідно кращі результати щодо остаточної деформації кінцівки. Слід відзначити, що накопичений клінічний досвід і вдосконалення рекомендацій щодо застосування обох методів фіксації залежно від типу, локалізації та складності перелому майже знівельовали відмінності в частоті ускладнень. Варто зауважити, що хоча деякі автори наводили дані про типи та складність переломів великогомілкової кістки, узагальнюючі результати публікувались без конкретної прив'язки до цих характеристик. Тому неможливо зробити остаточні висновки про перевагу тієї чи іншої системи в окремих клінічних випадках. З огляду на значну індивідуальну варіативність переломів питання ефективності та безпечності методів лікування можуть бути остаточно вирішені лише за умов наявності достатньо великого обсягу клінічних даних.

Ключові слова: перелом великогомілкової кістки; просторова рамка Тейлора; система Ілізарова; метааналіз

Вступ

Переломи великогомілкової кістки залишаються однією з найпоширеніших і водночас найскладніших травм опорно-рухового апарату. Їх лікування часто ускладнюється значним пошкодженням м'яких тканин, відкритими ранами, нестабільністю відламків та ризиком інфекційних ускладнень. У таких випадках методи зовнішньої фіксації є важливим інструментом стабілізації, що дозволяє забезпечити контроль над положенням відламків при мінімальній інвазивності. Серед основних методів зовнішньої фіксації при лікуванні переломів великогомілкової кістки найбільш широко застосування отримали класичний апарат Ілізарова та сучасні гексаподні системи, такі як просторова рамка Тейлора (Taylor Spatial Frame, TSF). Обидві технології дозволяють проводити поступову корекцію положення кісткових відламків, регулювати довжину та вісь кінцівки, а також успішно лікувати ускладнені та багатоосколкові переломи.

Попри те, що кожен з методів має свої переваги та обмеження, вибір системи фіксації у клінічній практиці часто залежить від типу перелому, ступеня ушкодження м'яких тканин, досвіду хірурга та доступності обладнання. Систематичне вивчення ефективності й безпечності різних підходів до зовнішньої фіксації є важливим кроком до вдосконалення лікування та зменшення ризику ускладнень у цієї складної категорії пацієнтів.

Метод дистракційного остеогенезу Ілізарова виник у середині минулого століття та включає низку методів реконструкції кісток, що виконуються за допомогою кільцевого апарату зовнішньої фіксації. Цей метод був розроблений Г.А. Ілізаровим у 1951 році. Ще задовго до Ілізарова було розуміння біології кісткової тканини, однак саме Гаврило Абрамович дослідив та фундаментально описав принципи дистракційного гістеогенезу та застосував ці принципи для лікування широкого спектра патологічних станів кісток та суглобів (як-от переломи та їх незрощення, наслідки остеомієліту, вроджені та набуті деформації, новоутворення та дефекти кісток).

Сучасні принципи корекції деформацій довгих кісток за допомогою апарату Ілізарова впливають із загального біологічного закону натягу-напруження. Поступова тракція живих тканин створює напруження, що стимулює та підтримує активний ріст певних тканин. За умов адекватного кровопостачання та стабільної фіксації поступова тракція кісткової тканини також призводить до її проліферації. Під час періоду дистракції нові кровоносні судини розвиваються в поперечному або поздовжньому напрямку відповідно до вектора натягу; таким чином, важливим є темп дистракції, оптимальним вважається темп близько 1 мм на добу. Така неоваскуляризація відбувається не тільки в кістці, але й у м'яких тканинах [1].

Починаючи з 80-х років минулого століття метод Ілізарова використовувався в різних європейських країнах. Водночас із оригінальною методикою проходились різні варіанти модифікацій та удосконалень

фіксуєючих пристроїв та методів їх застосування [2]. Протягом останніх 30 років широкої популярності набули гексаподальні комп'ютеризовані кругові рамки, такі як просторова рамка Тейлора. TSF була розроблена у середині 1990-х років. Її авторами є доктор Джек Тейлор та доктор Джером Крупчак — американські хірурги-ортопеди. Система TSF має певні переваги над класично описаним апаратом Ілізарова, що і призвело до її широкого застосування. Основною перевагою TSF є комп'ютер-асистована оцінка ступеня деформації та автоматичний розрахунок корекції цієї деформації з урахуванням терміну лікування та локалізації м'якотканинних структур, які є в зоні ризику під час надмірно швидкої дистракції. Тоді як апарат Ілізарова використовує фізичні шарніри та штанги для послідовної корекції багатоплощинних деформацій, в основу TSF покладено математичну модель гексапода — шестиногого механізму, який використовується в інженерії для точного позиціонування. Таким чином, при застосуванні TSF немає необхідності в ручному застосуванні шарнірів на верхівці деформації; програмне забезпечення розпізнає віртуальний шарнір, навколо якого і відбувається об'ємне тривимірне коригування деформацій.

На сьогодні обидві системи (класичні апарати Ілізарова та просторові рамки Тейлора) широко застосовуються у лікуванні травм та різноманітних патологій кінцівок. Однак, попри їхнє активне використання та значну кількість публікацій, присвячених кожному з методів окремо, порівняльних досліджень вкрай мало. Основні роботи, які порівнювали ці методи, відносяться до періоду активного TSF, тобто до 2010 року. Підсумком порівняння методів можна вважати роботу D. Dammerer з колегами [3], в якій оцінювались результати лікування 135 пацієнтів з переломами великогомілкової кістки системами Ілізарова, TSF та Ортофікс. Висновком роботи стали такі рекомендації щодо використання цих методів: застосовувати апарат Ілізарова для ізолюваного подовження довгих кісток та лікування незрощень; застосовувати TSF для корекції складних деформацій. Принципової різниці між зазначеними системами встановлено не було.

Також відомо, що високоенергетичні переломи великогомілкової кістки становлять одну з найскладніших категорій травматичних ушкоджень опорно-рухового апарату, часто супроводжуються тяжкими ураженнями м'яких тканин та інфекційними ускладненнями. Все це робить застосування різних апаратів зовнішньої фіксації оптимальною опцією для лікування таких переломів. Оскільки більшість таких переломів є багатоуламковими, відновлення анатомічної осі великогомілкової кістки стає наріжним каменем успіху лікування таких переломів. Таким чином, для травматолога-ортопеда важливим є не лише загоєння перелому, а й одночасне усунення осьових деформацій та вкорочення пошкодженої кістки. Це висуває особливі вимоги до вибору методів фіксації та індивідуалізації лікувальної тактики. Відповідно, важливим є розуміння того, яка з систем апаратів зовнішньої фіксації,

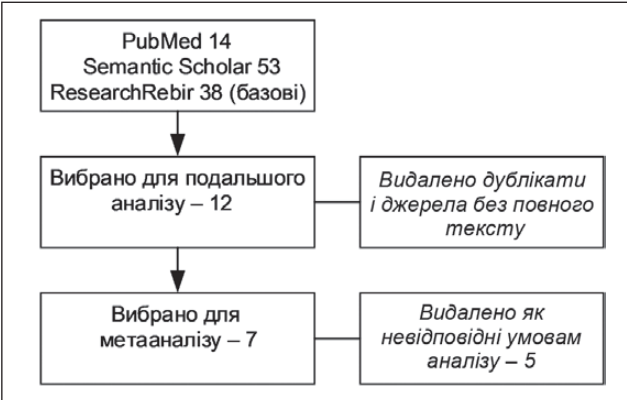


Рисунок 1. Блок-схема відбору джерел

що широко застосовуються у світі, може забезпечити оптимальні результати лікування переломів кісток голімки із меншою кількістю ускладнень та незадовільних результатів.

Мета: провести систематичне порівняння ефективності та безпечності методу Ілізарова та просторової рамки Тейлора у лікуванні переломів великогомілкової кістки з урахуванням часу консолідації перелому, частоти ускладнень, часу зрощення та ступеня корекції деформацій.

Матеріали та методи

Пошук джерел проводився в базах даних PubMed, Semantic Scholar та Scopus за період з 2014 до 2025 року. Для поширення пошуку було використано пакет ResearchRabbit на основі штучного інтелекту, який дозволяє проводити поглиблений крос-пошук літератури в малопоширених базах світу.

У межах даного метааналізу застосовано структуру PICO для формалізації критеріїв добору досліджень:

- P (Population): пацієнти віком понад 18 років з переломами великогомілкової кістки;
- I (Intervention): лікування із застосуванням TSF;
- C (Comparison): лікування із застосуванням класичного апарата Ілізарова;
- O (Outcomes): основні результати включають час зрощення, частоту інфекційних ускладнень, залишко-ву деформацію, функціональні результати.

За всіма базами було виявлено 105 робіт. Пошук проводився за такими ключовими словами: Taylor Spatial Frame, TSF, Ilizarov fixator, tibia deformed, fractures.

Алгоритм пошуку і відбору джерел для аналізу наведено на рис. 1.

Усі включені дослідження мали ретроспективний когортний дизайн. Рандомізованих контрольованих досліджень, що відповідали критеріям PICO, виявлено не було. Це зумовлює певні обмеження щодо рівня доказовості отриманих результатів, але дозволяє провести узагальнений аналіз клінічної практики у порівнянні методів фіксації.

Зібрані дані включали обсяг вибірки, характеристики пацієнтів, тип втручання, показники зрощення перелому, кількість ускладнень тощо. У випадках, коли в дослідженнях результати подавалися як медіана та міжквартильний розмах (IQR), замість середнього та стандартного відхилення (SD) ми використовували таку формулу для оцінки SD:

SD ≈ IQR / 1,35.

Цей підхід припускає приблизно симетричний розподіл і рекомендований для метааналізів, що включають непараметричні дані [4].

Терміни в днях і тижнях були переведені в місяці. Метааналіз було виконано в середовищі R (версія 2025.05.0 Build 496) із застосуванням пакета Meta для розрахунку показників метааналізу (різниці середніх із випадковими ефектами, REML) та функції forest для побудови лісових діаграм у стилі RevMan 5. Модель випадкових ефектів обирали через comb.random = TRUE із оцінкою τ² методом REML, а гетерогенність оцінювали за допомогою статистик Q-тесту, I² та τ².

Результати

Вибрані для метааналізу роботи та дані, які в них наведені, подані в табл. 1.

Оцінка демографічних показників

Загальна кількість вибірки становила 723 пацієнти, серед них було 338 осіб, яких лікували методом Ілізарова, 385 — Тейлора (рис. 2).

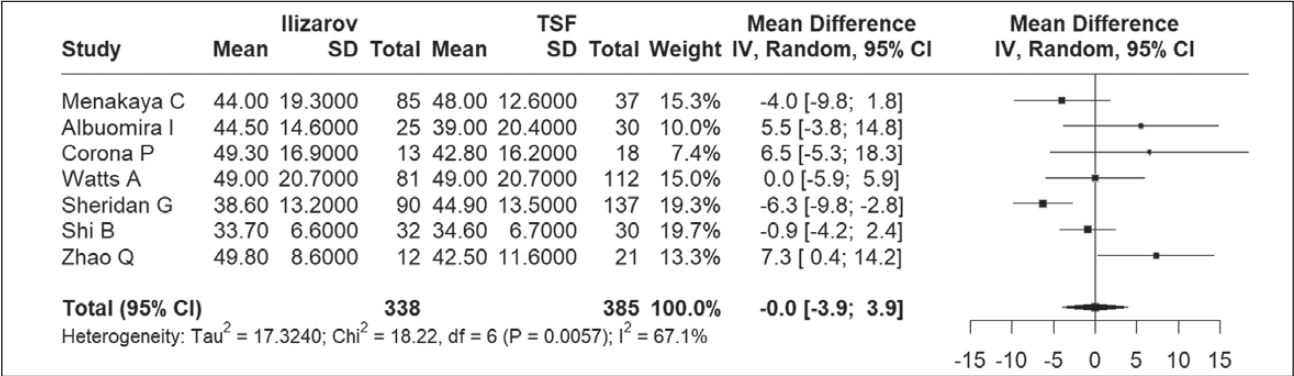


Рисунок 2. Лісова діаграма розподілу віку

Таблиця 1. Дані, які наведені в роботах, відібраних для метааналізу

Дослідження	Термін	Відкриті/ закриті переломи	Інфекція до	Система	Пацієнти		Показник				
					N	Вік	Час кон- солідації, міс.	Індекс зо- внішньої фіксації, міс/см	Затрим- ка зро- щення	Інфекції	Залишкова дефор- мація
Menakaу C. U. (2014) [5]		65/20	Не вказано	Ілізаров	85	44,0 ± 19,3	5,4 ± 4,1			17	
		30/7		Тейлор	37	48 ± 12,6	5,1 ± 2,7			9	
Abuomira I.E. (2016) [6]	2015– 2019	Не вказано	18/7 20/10	Ілізаров	25	44,5 ± 14,6	11,9 ± 4,4	2,1 ± 0,9		4	
				Тейлор	30	39 ± 20,4	13,9 ± 4,8	1,97 ± 0,7		7	
Corona P.S. (2022) [7]	2015– 2020	10	Не вказано	Ілізаров	13	49,31 ± 16,91	5,5 ± 2,2		1	6	2,85 ± 2,31
		15		Тейлор	18	42,78 ± 16,22	9,3 ± 6,04			6	2,48 ± 2,45
Watts A. (2023) [8]	2011– 2018	19/62	Не вказано	Ілізаров	81	49 ± 20,7	5,8 ± 3,2				
		37/75		Тейлор	112		6,4 ± 3,5				
Sheridan G.A. (2023) [9]		Не вказано	Не вказано	Ілізаров	90	38,6 ± 13,2	15,0 ± 7,3	3,2 ± 1,7			
				Тейлор	137	44,9 ± 13,5	8,4 ± 4,1	2,4 ± 1,2			
Shi B. (2024) [10]	2011– 2021	17/15	15/17 14/16	Ілізаров	32	33,7 ± 6,6	10,2 ± 2,0	1,5 ± 0,1	3	11	5 випадків
		16/14		Тейлор	30	34,6 ± 6,7	9,7 ± 1,8	1,4 ± 0,2	2	9	
Zhao Q.J. (2024) [11]	2016– 2020	6/6	Не вказано	Ілізаров	12	49,8 ± 8,6	42,0 ± 9,8			5	2,37 ± 1,00
		11/10		Тейлор	21	42,5 ± 11,6	33,3 ± 8,2			12	1,58 ± 0,84

Оцінка різниці середніх (MD) становить 0,0 при 95% CI [–3,9; +3,9]. Інтервал містить 0, що свідчить про відсутність статистичної значущості різниці віку між групами, тобто середній вік пацієнтів у двох групах практично однорідний. Гетерогенність між дослідженнями $I^2 = 67,1\%$ (95% CI [26,7%; 85,2%]), що свідчить про середню варіабельність між дослідженнями. Q-тест на гетерогенність ($\chi^2 = 18,22$, $p = 0,0057$) підтверджує, що розбіжності між результатами досліджень перевищують випадкові різниці. Незважаючи на помірно високу гетерогенність між окремими роботами, в середньому різниця віку між групами не виявилася значущою.

У дослідженнях G.A. Sheridan і B. Shi пацієнти були помітно молодше (в середньому 38,6 і 33,7 року), на відміну від пацієнтів в інших дослідженнях, у яких вік в середньому був понад 40 років.

Оцінка кількості відкритих і закритих переломів

Кількість пацієнтів з відкритими та закритими переломи повідомлено в 5 дослідженнях. Всього обстежено 441 пацієнта, у яких 117 відкритих переломів великогомілкової кістки лікували методом Ілізарова і 109 — TSF (рис. 3).

За даними аналізу не виявлено суттєвої різниці у співвідношенні відкритих і закритих переломів, пролікованих обома методами як у межах досліджень (стандартне відхилення відношення шансів у всіх групах містить 1, тому різниця статистично не значуща), так і між дослідженнями (загальне відношення шансів OR = 0,74 означає, що вірогідність відкритого перелому була приблизно на 26 % нижча, ніж закритого, виходячи з 95% CI [0,48; 1,14], вірогідної різниці між методами лікування не виявлено. Гетерогенність між дослідженнями не виявлена, $I^2 = 0\%$ (95% CI [0; 79,2]), усі відмінності між результатами пояснюються лише випадковими коливаннями.

Незважаючи на тенденцію до зниження шансу відкритого перелому (OR < 1), різниця не є вірогідною ($p > 0,05$). Також дослідження виявили надзвичайно низьку гетерогенність, тобто результати окремих робіт досить однорідні. Отже, немає доказів суттєвої різниці в ризику відкритих проти закритих переломів за узагальненими даними цих 5 досліджень.

Термін консолідації перелому

Порівнювали час зрощення перелому при лікуванні апаратом Ілізарова та TSF на основі даних із семи досліджень (всього 723 спостереження: 338 — Ілізаров, 385 — TSF) (рис. 4).

За даними аналізу не виявлено суттєвої різниці між термінами загоєння переломів: MD = 1,0; 95% CI [-1,9; 4,0], містить нуль, тому різниця між методами статистично не значуща. Гетерогенність між дослідженнями істотна: $\tau^2 = 13,96$ (95% CI [4,88; 95,53]). $I^2 = 92,0\%$ (95% CI [86,0; 95,4]) — надзвичайно висока гетерогенність, тобто 92 % всієї варіабельності результатів пояснюється відмінностями між дослідженнями, а не випадковою похибкою.

Отже, незважаючи на невелику (1-денну) тенденцію до довшого часу зрощення при використанні апарата Ілізарова, ця різниця не є статистично значущою (CI охоплює нуль, $p \approx 0,5$). Проте дуже висока гетерогенність ($I^2 = 92\%$) свідчить про те, що результати різних досліджень суттєво відрізняються, можливо, через різні протоколи лікування, критерії включення пацієнтів або різні характеристики переломів.

У публікаціях A. Watts та P.S. Corona докладно розглянуто терміни лікування переломів різного ступеня складності, зокрема переломи, які потребували корекції травматичного вкорочення. Складні переломи зі зміщенням і втратою кісткової маси лікували переважно рамками Тейлора, що призводило до більш тривалого терміну лікування порівняно з переломами, які лікували фіксаторами Ілізарова. У дослідженнях G.A. Sheridan і Q.J. Zhao описано лікування посттравматичних деформацій і вкорочень, тобто після планових остеотомій. Такі ускладнення лікували переважно методом Ілізарова, тривалість дистракції в деяких випадках сягала 3 і більше років. Як відмічають G.A. Sheridan зі співавт., розмір дефекту у па-

цієнтів групи Ілізарова був більшим, що і зумовило більшій термін зрощення. Саме терміни загоєння перелому цих досліджень в метааналізі дали відносно збільшення терміну лікування для апарата Ілізарова.

За загальними спостереженнями, терміни загоєння перелому сильно варіювалися залежно від місця перелому, його складності, первинного стану — відкритий чи закритий перелом, а також індивідуальних показників пацієнта — шкідливих звичок, супутніх захворювань, віку тощо.

У всіх дослідженнях повне видалення каркасів відбувалося через 1–1,5 місяця після зрощення. Оскільки видалення каркаса відбувається поступово, терміни розборки конструкцій залежать від рентгенологічної якості кісткового мозоля. Не всі автори повідомляють саме про терміни видалення каркасів, і терміни варіюються як від початку накладання, так і від часу первинної консолидації. Цей показник ми аналізували.

Індекс зовнішньої фіксації

Індекс зовнішньої фіксації (ІЗФ; External Fixation Index, EFI) — це показник, який вимірює кількість часу (у днях або місяцях), необхідного для подовження або зрощення 1 см кістки при зовнішній фіксації. У дослідженні дані наведені в місяцях/см.

Про оцінку індексу зовнішньої фіксації повідомлено в 3 роботах (рис. 5).

На основі даних із трьох досліджень (усього 344 пацієнти: 147 — Ілізаров, 197 — TSF) було визначено, що

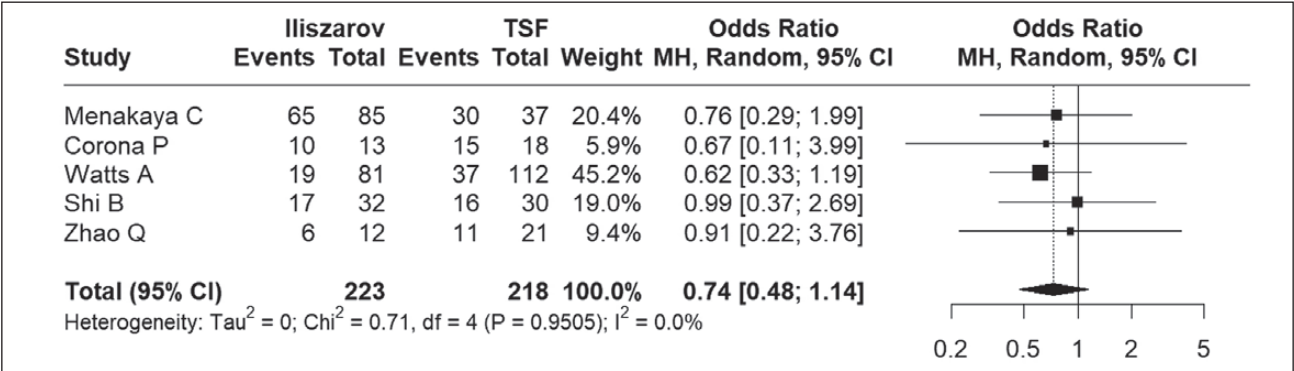


Рисунок 3. Лісова діаграма відношення шансів відкритих/закритих переломів до лікування

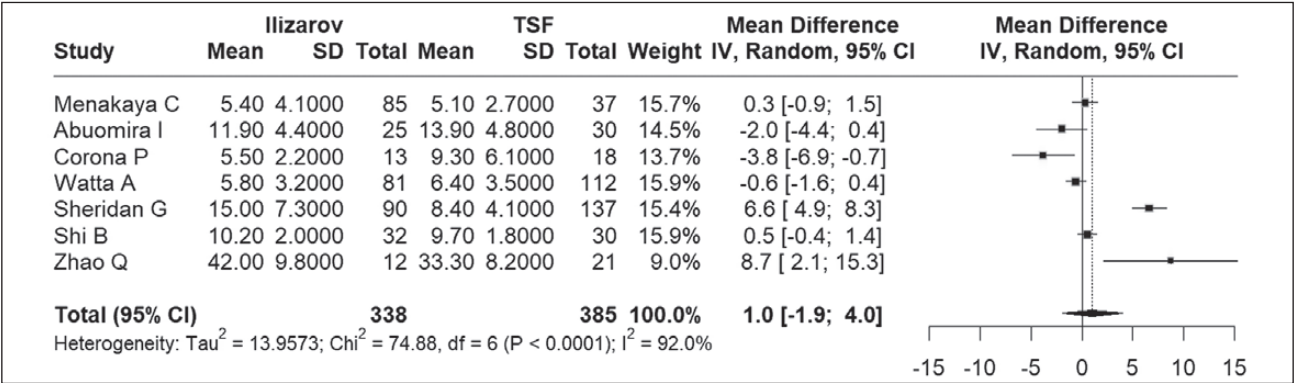


Рисунок 4. Лісова діаграма термінів загоєння переломів

різниця ІЗФ у групі Лізарова була на 0,3 місяця/см більшою, ніж в групі TSF: MD = 0,3 місяця/см, але значення 95% CI [-0,1; +0,8] включає нуль, що свідчить про те, що різниця не значуща. Гетерогенність між дослідженнями $I^2 = 81,9\%$ (95% CI [44,2; 94,2]) висока, розбіжність у результатах пояснюється справжніми відмінностями між дослідженнями.

Незважаючи на тенденцію до трохи вищого індексу фіксації при застосуванні апарата Лізарова, ця різниця не є статистично значущою (CI охоплює нуль, $p = 0,147$). Водночас висока гетерогенність свідчить про те, що умови досліджень (протоколи корекції, методика розрахунку індексу, характеристики пацієнтів) значно відрізнялися.

Високу гетерогенність зумовлюють результати в дослідженні G.A. Sheridan, які майже удвічі перевищують дані інших досліджень. Самі науковці відмічають, що в дослідженні збільшений індекс зовнішньої фіксації зумовлений значною кількістю відкритих та інфікованих переломів, які потребували додаткових маніпуляцій. Однак у дослідженні не вказано кількість відкритих/закритих і інфікованих переломів.

Поверхневі інфекції

Про розвиток поверхневих інфекцій у зоні проведення стрижнів повідомляли всі автори досліджень, але кількість вказана в 5 дослідженнях (рис. 6).

На основі п'яти досліджень оцінювали ризик інфекційних ускладнень при лікуванні апаратом Лізарова та TSF. Загалом було 86 подій інфекцій.

Оцінка співвідношення шансів OR = 0,89 вказує на незначне зниження імовірності інфекції в групі Лізарова порівняно з TSF (-11 %; 95% CI [0,52; 1,51] показує відсутність статистично значущої різниці. Гетерогенність між дослідженнями $I^2 = 0,0\%$ (95% CI [0,0; 79,2]). Незважаючи на те, що OR трохи менше за 1, різниця в ризику інфекцій між методами не є статистично значущою. Гетерогенність надзвичайно низька ($I^2 = 0\%$), отже, результати досліджень виявилися досить однорідними. Таким чином, за наявними даними немає доказів того, що апарат Лізарова зменшує або збільшує ризик інфекцій порівняно з TSF.

Оцінка залишкової деформації

Про величину залишкової деформації повідомлено у двох дослідженнях (рис. 7). Ще в одному (B. Shi) вказано,

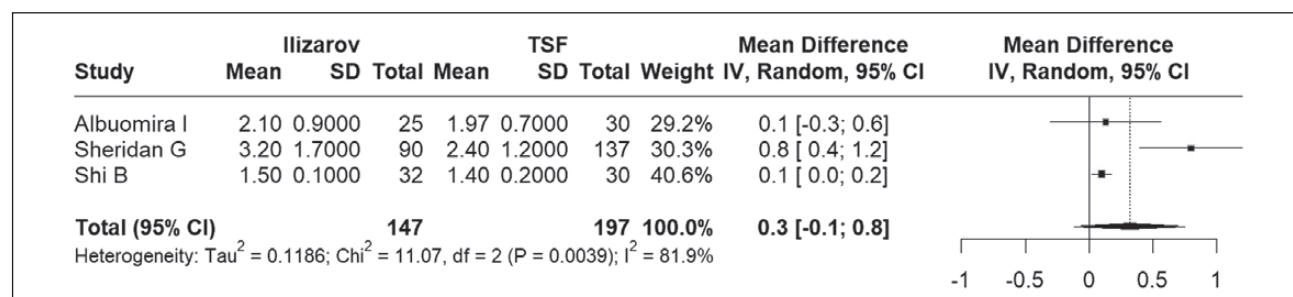


Рисунок 5. Лісова діаграма розподілу ІЗФ

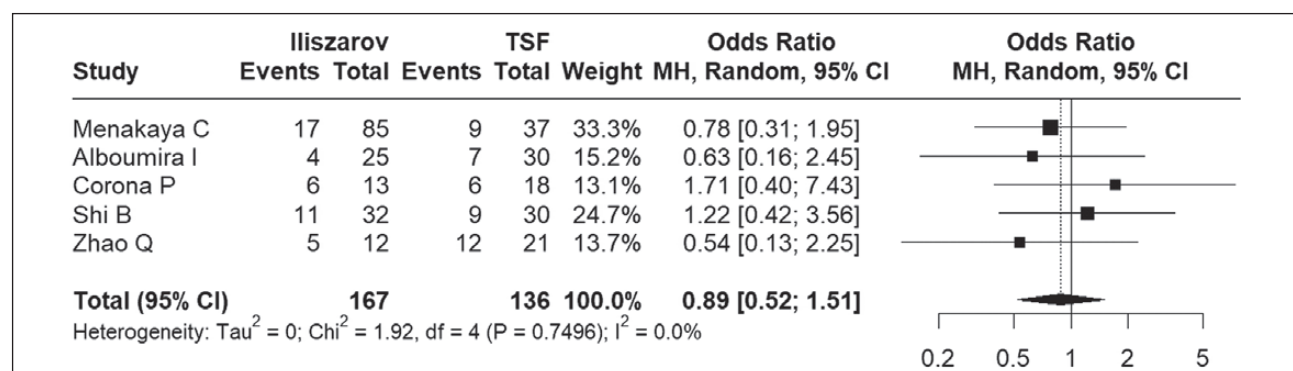


Рисунок 6. Лісова діаграма оцінки імовірності поверхневої інфекції

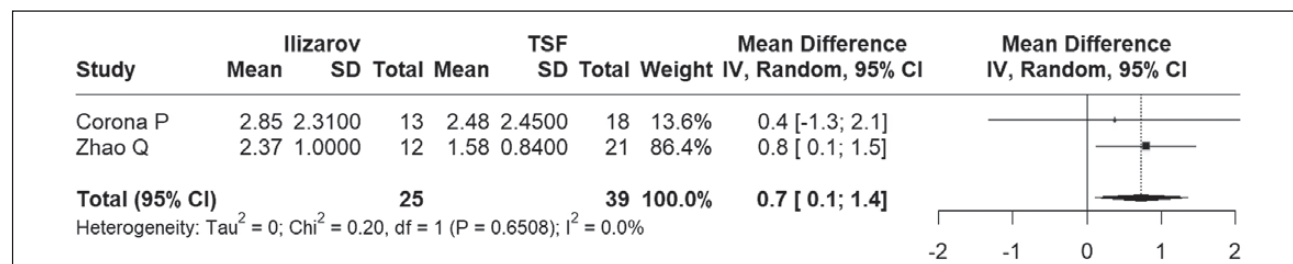


Рисунок 7. Лісова діаграма величини залишкової деформації

що у 5 пацієнтів відмічено незначну залишкову деформацію при лікуванні апаратом Ілізарова без повідомлення її величини.

За даними аналізу 64 випадків (25 в групі Ілізарова і 39 — TSF) виявлено, що кут залишкової деформації великогомілкової кістки в групі Ілізарова на $0,7^\circ$ більше, ніж в групі TSF. 95% CI [0,1; 1,4], різниця статистично значуща. Гомогенність між дослідженнями $I^2 = 0,0\%$, що свідчить про однорідність досліджень.

Обговорення

За даними проведеного метааналізу не було виявлено статистичної різниці між двома методами лікування переломів великогомілкової кістки, крім кута остаточної деформації.

Загальна оцінка проаналізованих досліджень свідчить про те, що оцінювати узагальнені оцінки використання означених систем фіксації переломів не зовсім правильно. Складність переломів (простий, уламковий, відкритий, закритий, інфікований чи ні, ступінь втрати кісткової тканини тощо) помітно впливає як на терміни лікування, так і на результат.

У роботі C.U. Menakaya et al. [5] проаналізовано переломи діафіза, пілона і плато, але не повідомлено про тяжкість переломів, оцінювали лише час загоєння переломів, який виявився статистично не значущим.

У дослідженні P.S. Corona et al. [7] розглянуто та проаналізовано терміни загоєння переломів типів 41, 42, 43 та їх види (А, В, С). Але незначна кількість пацієнтів в означених категоріях не дала можливості зробити повноцінний порівняльний аналіз щодо термінів загоєння перелому та оцінок якості зрощення. Автори роблять узагальнену оцінку між групами Ілізарова і Тейлора, що і наведено в метааналізі.

Більш поширений аналіз результатів лікування переломів гомілки дає A. Watts et al. [8]. Достатня кількість спостережень ($n = 193$) дала можливість проаналізувати різниці в термінах зрощення переломів за їх типом (АО41, АО42, АО43, АО44, відкриті та закриті). Статистичної різниці у часі видалення систем не виявлено (крім переломів типу АО44). Про терміни зрощення повідомлено окремо і узагальнено для груп Ілізарова і TSF. Попри широке дослідження, крім аналізу термінів, інших даних не повідомлено.

У дослідженні G. Sheridan et al. [9] надано результати 227 пацієнтів. Аналізували терміни зрощення та видалення конструкцій, а також рентгенологічні якості кісткового мозоля. Автори не розділяли пацієнтів за типами та складністю переломів, тому оцінки мали велику варіабельність. Різниці між типами рамок не виявлено.

У публікації B. Shi et al. [10] проаналізовано результат лікування 62 пацієнтів. Крім термінів загоєння перелому, проаналізовано величину індексу зовнішньої фіксації та ускладнення. Автори не оцінювали складність переломів. Не було виявлено статистично значущої різниці в клінічних результатах між використанням просторової рамки Тейлора та кругового фіксатора Ілі-

зарова для лікування великих сегментарних дефектів великогомілкової кістки, хоча рамка Тейлора показала дещо кращі результати.

У роботі Q.J. Zhao [11] проаналізована відносно маленька група пацієнтів — 33 особи зі складними високоенергетичними переломами. Дослідження більше присвячене індивідуальному підбору конструкції з докладним описом кожного випадку. Виявлено значуще менші терміни зрощення перелому і видалення системи та залишкову деформацію в групі Тейлора. Треба відмітити, що це остання робота 2024 року, отже, така помітна різниця в результатах може свідчити про удосконалення технології рамки Тейлора.

Висновки

За даними проведеного метааналізу, при порівнянні ефективності та безпечності методу Ілізарова і просторової рамки Тейлора у лікуванні переломів великогомілкової кістки не було виявлено статистично значущої різниці між цими системами ані за термінами зрощення перелому, ані за кількістю ускладнень. Водночас рамка Тейлора показала вірогідно кращі результати щодо остаточної деформації кінцівки.

Слід відзначити, що накопичений клінічний досвід і вдосконалення рекомендацій щодо застосування обох методів фіксації залежно від типу, локалізації та складності перелому майже знівельовали відмінності в частоті ускладнень. Варто зауважити, що, хоча деякі автори наводили дані про типи та складність переломів великогомілкової кістки, узагальнюючі результати публікувались без конкретної прив'язки до цих характеристик. Тому неможливо зробити остаточні висновки про перевагу тієї чи іншої системи в окремих клінічних випадках. З огляду на значну індивідуальну варіативність переломів питання ефективності та безпечності методів лікування можуть бути остаточно вирішені лише за умови наявності достатньо великого обсягу клінічних даних.

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

Внесок авторів. Суворов В.Л. — концепція та дизайн роботи; Кулик Ю.А. — остаточне затвердження статті; Дем'ян Ю.Ю. — написання статті; Полулях Д.М. — критичний огляд; Євлантьєва Т.А., Ларкевич О.Г., Козік Є.В. — збір та аналіз даних; Карпінська О.Д. — статистичний аналіз.

Список літератури

1. Hvid I, Horn J, Huhnstock S, Steen H. The biology of bone lengthening. *J Child Orthop.* 2016 Dec;10(6):487-492. doi: 10.1007/s11832-016-0780-2.
2. Hosny GA. Limb lengthening history, evolution, complications and current concepts. *J Orthop Traumatol.* 2020 Mar 5;21(1):3. doi: 10.1186/s10195-019-0541-3.
3. Dammerer D, Kirschbichler K, Donnan L, Kaufmann G, Krismer M, Biedermann R. Clinical value of the Taylor Spatial Frame: a comparison with the Ilizarov and Orthofix fixators. *J Child Orthop.* 2011 Oct;5(5):343-9. doi: 10.1007/s11832-011-0361-3.

4. Wan X, Wang W, Liu J, Tong T. Estimating the sample mean and standard deviation from the sample size, median, range and/or interquartile range. *BMC Medical Research Methodology*. 2014;14:135. <https://doi.org/10.1186/1471-2288-14-135>.
5. Menakaya CU, Rigby AS, Hadland Y, Barron E, Sharma H. Fracture healing following high energy tibial trauma: Ilizarov versus Taylor Spatial Frame. *Ann R Coll Surg Engl*. 2014 Mar;96(2):106-10. doi: 10.1308/003588414X13824511650335. PMID: 24780666; PMCID: PMC4474236.
6. Abuomira IE, Sala F, Elbatrawy Y, Lovisetti G, Alati S, Capitani D. Distraction osteogenesis for tibial nonunion with bone loss using combined Ilizarov and Taylor spatial frames versus a conventional circular frame. *Strategies Trauma Limb Reconstr*. 2016 Nov;11(3):153-159. doi: 10.1007/s11751-016-0264-4. Epub 2016 Sep 22. PMID: 27660248; PMCID: PMC5069202.
7. Corona PS, Pujol O, Vicente M, Ricou E, de Albert M, Maestre Cano D, Salcedo Cánovas C, Martínez Ros J. Outcomes of two circular external fixation systems in the definitive treatment of acute tibial fracture related infections. *Injury*. 2022 Oct;53(10):3438-3445. doi: 10.1016/j.injury.2022.08.037. Epub 2022 Aug 18. PMID: 36028372.
8. Watts A, Sadekar V, Moulder E, Souroullas P, Hadland Y, Barron E, Muir R, Sharma H. A comparative evaluation of the time to frame removal for tibia fractures treated with hexapod and Ilizarov circular frames. *Injury*. 2023 Mar;54(3):996-1003. doi: 10.1016/j.injury.2022.12.027. Epub 2022 Dec 29. PMID: 36682926.
9. Sheridan GA, Pang A, Page BJ, Greenstein MD, Cardoso GS, Amorim R, Rozbruch SR, Fragomen AT. The Management of Tibial Bone Defects: A Multicenter Experience of Hexapod and Ilizarov Frames. *J Am Acad Orthop Surg Glob Res Rev*. 2023 Aug 3;7(8):e23.00033. doi: 10.5435/JAAOSGlobal-D-23-00033. PMID: 37535816; PMCID: PMC10402980.
10. Shi B, Zhang Z, Ji G, Cai C, Shu H, Ma X. Bone Transport for Large Segmental Tibial Defects Using Taylor Spatial Frame versus the Ilizarov Circular Fixator. *Orthop Surg*. 2024 Sep;16(9):2157-2166. doi: 10.1111/os.14192. Epub 2024 Aug 6. PMID: 39105307; PMCID: PMC11572580.
11. Zhao QJ, Liu Z, Sun X, Zhang NN, Xu WG, Zhang T. The Clinical Application of Double Taylor Spatial Frame in Segmental Tibial Fracture. *Orthop Surg*. 2024 Jun;16(6):1344-1355. doi: 10.1111/os.14045. Epub 2024 Apr 25. PMID: 38664223; PMCID: PMC11144511.

Отримано/Received 03.06.2025

Рецензовано/Revised 17.06.2025

Прийнято до друку/Accepted 17.07.2025

Information about authors

Vasyl Suvorov, PhD in Medicine, Head of the Biomechanics Laboratory, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: vasil_suvorov@ukr.net; phone: +380 (66) 393-72-13; <https://orcid.org/0000-0002-0862-7997>

Yurii Kulyk, PhD in Medicine, Head of the Scientific, Organizational and Methodological Department, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: kulykjura@gmail.com; phone: +380 (67) 983-20-92; <https://orcid.org/0000-0003-4623-6863>

Yurii Demian, PhD in Medicine, Senior Research Fellow, Scientific, Organizational and Methodological Department, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: dr.demyanyura@gmail.com; phone: +380 (50) 800-43-00; <https://orcid.org/0009-0008-2596-1904>

Dmytro Poluliakh, PhD in Medicine, Head of the Department of Joint Diseases in Adults, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: dmpoluliakh@gmail.com; phone: +380 (93) 914-57-63; <https://orcid.org/0000-0002-8895-6917>

Tetiana Yevlantiya, Junior Research Fellow, Department of Foot Pathology and Complex Prosthetic Treatment, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: t.yevlantiya@gmail.com; phone: +380 (97) 494-46-96; <https://orcid.org/0009-0009-6251-2814>

Oleksandr Larkevych, Junior Research Fellow, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: larkevich0304@gmail.com; phone: +380 (96) 597-65-32; <https://orcid.org/0009-0004-8069-3966>

Yevhenii Kozik, Junior Research Fellow, Biomedical Engineering Laboratory, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: yevhenii.kozik@gmail.com; phone: +380 (50) 077-11-58; <https://orcid.org/0000-0002-5839-0334>

Olena Karpinska, Research Fellow, Biomechanics Laboratory, Sytenko Institute of Spine and Joint Pathology of NAMSU, Kharkiv, Ukraine; e-mail: helen.karpinska@gmail.com; phone: +380 (57) 725-14-74, +380 (99) 486-34-63; <https://orcid.org/0000-0002-1482-7733>

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. V.L. Suvorov — concept and design of the work; Yu.A. Kulyk — final approval of the article; Yu.Yu. Demian — writing an article; D.M. Poluliakh — critical review; T.A. Yevlantiya, O.H. Larkevych, Ye.V. Kozik — data collection and analysis; O.D. Karpinska — responsibility for statistical analysis.

V.L. Suvorov¹, Yu.A. Kulyk¹, Yu.Yu. Demian¹, D.M. Poluliakh¹, T.A. Yevlantiya¹, O.H. Larkevych¹, Ye.V. Kozik¹, O.D. Karpinska²

¹Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine

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

Effectiveness and risks of external fixation in fractures of the tibia: a meta-analysis of the Ilizarov and Taylor methods

Abstract. Background. Fractures of the tibia remain one of the most common and at the same time most complex injuries of the musculoskeletal system. Their treatment is often complicated by significant soft tissue damage, open wounds, instability of fragments, and the risk of infectious complications. In such cases, external fixation methods are an important stabilizing tool that allows control over the position of fragments with minimal invasiveness. Among the main methods for external fixation in the treatment of tibial fractures,

the classic Ilizarov apparatus and modern hexapod systems, such as the Taylor spatial frame (TSF), are most widely used. The purpose was to conduct a systematic comparison of the efficacy and safety of the Ilizarov method and the TSF in the treatment of tibial fractures, taking into account the time of fracture consolidation, the frequency of complications, the time of union, and the degree of deformity correction. **Materials and methods.** The search was conducted in the PubMed, Semantic Scholar, and Scopus databases from 2014

to 2025. A total of 105 studies were identified in all databases. All included studies had a retrospective cohort design. No randomized controlled trials meeting the PICO criteria were found. **Results.** The total number of observations was 723 patients (338 individuals using the Ilizarov method, 385 using the Taylor method). There was no evidence of a significant difference in the number of open and closed fractures. Despite the high heterogeneity ($I^2 = 92\%$) of the studies, no significant difference was found between the systems in terms of fracture consolidation times. Healing times varied greatly depending on the location of the fracture, its complexity, and the initial condition. The Ilizarov group had a slightly higher, but not significant, fixation index. The difference in the risk of infection between the methods is not statistically significant. The magnitude of residual deformity was reported in two studies. The angle of residual deformity of the tibia in the Ilizarov group was 0.7° greater than in the TSF group, the difference is statistically significant. **Conclusions.** According to the meta-analysis, when comparing the efficacy and safety of the Ilizarov method and the TSF in the treatment of tibial fractures,

no statistically significant differences were found between these systems in terms of fracture healing time or the number of complications. At the same time, the Taylor frame showed significantly better results in terms of final limb deformity. It should be noted that the accumulated clinical experience and improvement of recommendations for the use of both fixation methods, depending on the type, location, and complexity of the fracture, have almost eliminated the differences in the frequency of complications. It should be noted that although some authors provided data on the types and complexity of tibial fractures, the summary results were published without specific reference to these characteristics. Therefore, it is impossible to draw definitive conclusions about the superiority of one system or another in individual clinical cases. Given the significant variability of fractures, the effectiveness and safety of treatment methods can only be reliably determined if a sufficiently large amount of clinical data is available.

Keywords: tibial fracture; Taylor spatial frame; Ilizarov system; meta-analysis

DOI: <https://doi.org/10.22141/1608-1706.4.26.2025.1028>

S.V. Konovalenko¹, V.V. Protsenko², V.H. Tykhonov¹, Ye.O. Solonitsyn², Yu.K. Hrebennikov³, V.F. Konovalenko¹, M.K. Ternovyi¹

¹R.E. Kavetsky Institute of Experimental Pathology, Oncology and Radiobiology of NASU, Kyiv, Ukraine

²Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine

³Kyiv City Clinical Hospital 12, Kyiv, Ukraine

Study of the modulating factors combined action on reparative osteogenesis

Abstract. Background. At the present stage, experimental studies and clinical observations are continuing to develop new treatment methods for improvement of bone fracture healing. In the era of increasing incidence of primary malignant and metastatic bone tumors, as well as in times of traumatic epidemics during the war, studying the possibilities of influencing the course of bone repair in order to accelerate or improve it is a justified direction of experimental research. Objective: to study the influence of modulating factors — infrared laser radiation, calcitonin and probiotic based on *Bifidobacterium animalis* — on the healing of a bone defect in an in vivo experiment.

Materials and methods. Reparative osteogenesis was studied in 32 animals (Wistar rats) whose tibia were injured with a dental drill using ketamine anesthesia. The influence of modulating factors on the formation of bone callus was assessed by studying the injured limbs of animals using the Toshiba Radrex X-ray diagnostic system, with a power of 80 kW, a radiation dose during digital radiography of 0.03 mSv, ventrodorsal positioning (on the stomach, back up), as well as right lateral (side views). **Results.** The study showed that the formation of bone callus under the influence of the laser is active, but nonlinear and not always symmetrical, which is in line with the results obtained in other studies. Instead, this work for the first time paid attention to the study of the combined effect of several modulating factors on reparative osteogenesis, namely laser irradiation, calcitonin and probiotic. It should be noted that we observed the maximum stimulating effect on the formation of bone callus in experimental animals in the laser + calcitonin group, which can even be characterized as excessive reparative activity of bone tissue. On the other hand, in the groups where a probiotic was present, reparative osteogenesis in rats proceeded more harmoniously, demonstrating better radiological results, such as in the calcitonin + probiotic group and especially in the group where the *B. animalis* preparation was combined with laser and calcitonin administration. It can be reasonably assumed that the inherent ability of *B. animalis* to normalize calcium metabolism creates conditions for reparative osteogenesis, as close as possible to the physiological scenario. **Conclusions.** The combination of calcitonin with a probiotic, as well as laser irradiation with calcitonin and a probiotic promoted harmonious reparative osteogenesis, which is confirmed by the corresponding radiological picture. The ability of *B. animalis* to reduce the intensity of systemic inflammation, to modulate calcium absorption from the intestine and influence its metabolic pathways may be a prerequisite for achieving complete bone repair.

Keywords: traumatic and oncolytic bone injuries; fractures; reparative osteogenesis; bone callus; infrared laser radiation; calcitonin; *Bifidobacterium animalis*; calcium; radiograph

Introduction

Current challenges of modern oncology and onco-orthopedics — bone damage due to the development of primary malignant and metastatic tumors — are the focus of attention of researchers and clinicians from different countries [1, 2, 6, 7]. Bone neoplasms inevitably reduce the quality

of life. Unfortunately, this occurs not only when the underlying disease manifests itself, but also at different stages of the treatment process [1, 2, 7]. Analysis of the experience of domestic and foreign clinics shows that primary malignant and metastatic bone tumors are one of the least studied groups of human neoplasms, in the diagnosis and treatment

© «Травма» / «Trauma» («Травма»), 2025

© Видавель Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2025

Для кореспонденції: Коноваленко Сергій Володимирович, доктор філософії з медицини, науковий співробітник, відділ моніторингу пухлинного процесу і дизайну терапії, Інститут експериментальної патології, онкології та радіобіології імені Р.Є. Кавецького НАН України, вул. Васильківська, 45, м. Київ, 03022, Україна; e-mail: servlakon@ukr.net; тел.: +380 (67) 733-77-44

For correspondence: Serhii V. Konovalenko, PhD in Medicine, Research Fellow, Department of Tumor Process Monitoring and Therapy Design, R.E. Kavetsky Institute of Experimental Pathology, Oncology and Radiobiology of NASU, Vasilkivska st., 45, Kyiv, 03022, Ukraine; e-mail: servlakon@ukr.net; phone: +380 (67) 733-77-44

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

of which significant difficulties arise and a large number of errors are made [3–5].

Since bone defects caused by tumors, as well as injuries, surgical interventions, congenital diseases and other pathological factors disrupt both the structure and function of the skeleton, seriously affecting the quality of life, physical and mental health of patients, studying the possibilities of improving the processes of reparative osteogenesis is a reasonable task from the theoretical, experimental and clinical points of view.

Fracture healing is a complex process and includes the following stages: the appearance of hematoma, the formation of granulation tissue, the formation of bone callus and bone remodeling [8, 11, 12]. During fracture, the integrity of the blood vessels that nourish the bone and periosteum is disrupted; as a result of it, hematoma forms at the fracture site, which slowly clots and forms a temporary framework for further healing.

Hematoma appears immediately after the fracture and is a key stage in the beginning of healing [9, 10, 12].

Macrophages, neutrophils, and platelets release proinflammatory cytokines such as tumor necrosis factor alpha, bone morphogenetic proteins (BMPs), platelet-derived growth factors (PDGFs), transforming growth factor beta (TGF- β), vascular endothelial growth factor (VEGF), and interleukins (1, 6, 10, 11, 12, 23). These cytokines further stimulate important cell biology at the fracture site [11–13].

Low-energy laser therapy (LELT), also known as photobiomodulation, has been shown to be effective in initiating and maintaining bone repair in many experimental and clinical studies [14, 15, 16, 18]. LELT has a positive effect on stem cell recruitment and osteoblast differentiation, which occurs with the participation of regulatory peptides [17, 19, 20, 22] (Fig. 1). Various studies, both *in vivo* and

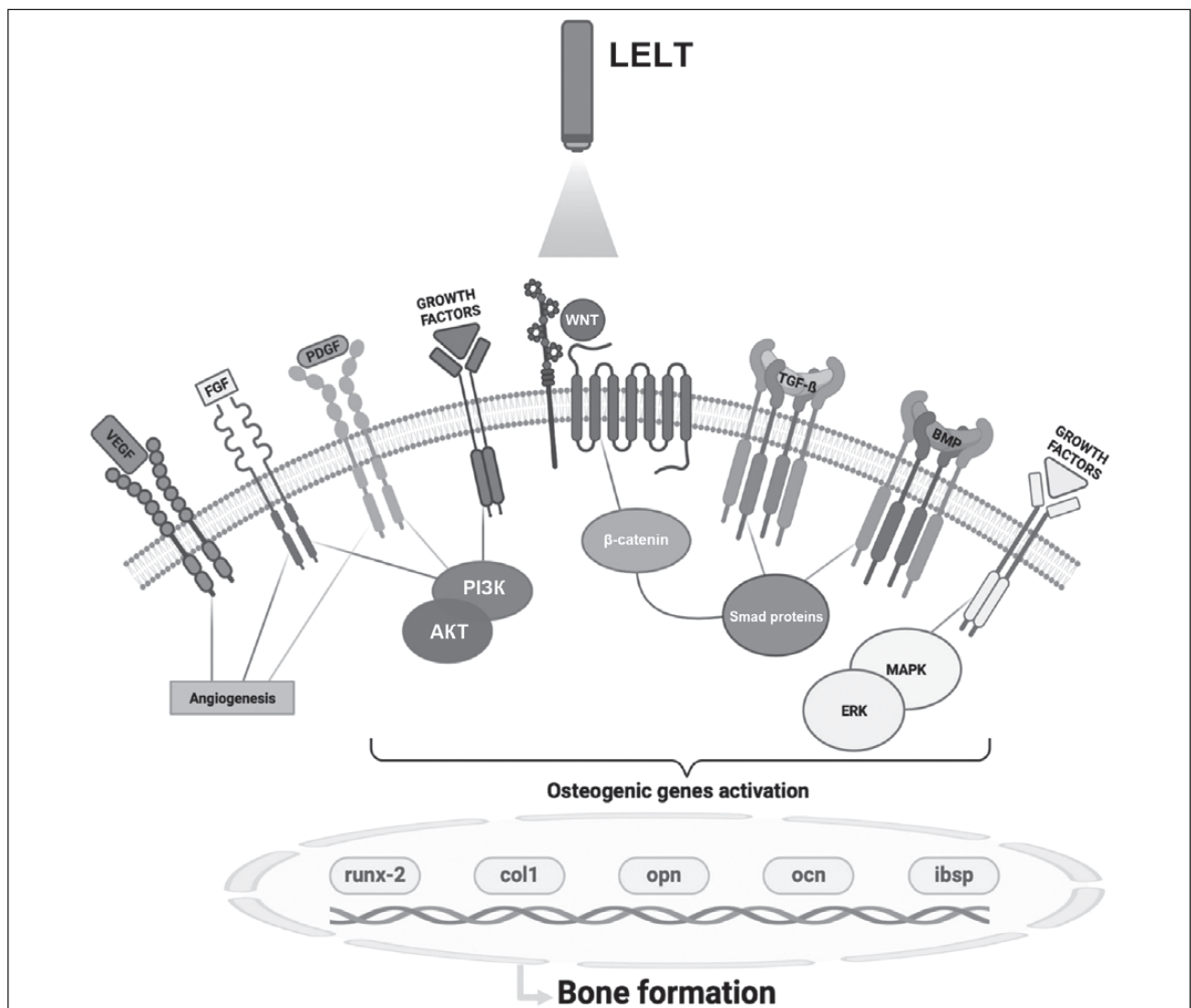


Figure 1. Schematic representation of molecular pathways activated by low-energy laser therapy [22]

Notes: FGF – fibroblast growth factors; AKT – AKT serine/threonine kinase 1; PI3K – phosphatidylinositol-4,5-bisphosphate 3-kinase catalytic subunit delta; MAPK – mitogen-activated protein kinase; ERK – extracellular signal-regulated kinase 1/2; SMAD – small mothers against decapentaplegic; runx-2 – runt-related transcription factor 2 gene; col1 – collagen type 1 gene; ocn – osteocalcin gene; opn – osteopontin gene; ibsp – bone sialoprotein gene.

in vitro, have shown that the effect of laser treatment enhanced the bone regeneration only in the first weeks after the fracture (2–4 weeks), while after approximately 60 days, no advantage over the control was observed [21], indicating that the LET method is effective only in the early stages of the process.

It is known that hormones play a key role in the regulation of bone tissue repair, and one of them is calcitonin [22–24]. *In vivo* studies have shown that if calcitonin is administered at the initial stages of the formation of the repair locus, then, due to the stimulation of cartilage proliferation and bone precursor cells, reparative osteogenesis proceeds more harmoniously and fully [24]. Bone tissue repair was better in animals administered the hormone at the stages of cell proliferation and differentiation, that is, before the formation of tissue structures began. And already on the 28th day, lamellar bone tissue with a higher density of cellular components compared to the control group was observed in the traumatic zone [25].

Some research works [26, 27, 29] have shown the ability of probiotics to influence calcium metabolism and create conditions for harmonious healing of bone injuries. For example, various species of *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* are the main strains studied that significantly affect bone health by regulating calcium absorption, enriching the diversity of the gut microbiota, and activating various metabolic pathways related to osteoblast activity and bone formation [28]. Probiotic supplements can both increase bone density in healthy individuals and protect against primary (estrogen deficiency) and secondary osteoporosis [30]; their inclusion in the diet of postmenopausal women can increase bone mineral density and prevent osteopenia [31]. In addition, probiotics have been shown to induce M2 polarization of macrophages and promote osteogenic differentiation in bone marrow mesenchymal stem cells, thereby improving the dynamics of bone regeneration [32, 33].

In an era of increasing incidence of primary malignant and metastatic bone tumors, as well as in times of traumatic epidemics during war, studying the possibilities of influencing the course of bone repair in order to accelerate or improve it is a justified direction of experimental research.

Aim. To study the effect of modulating factors — infrared laser radiation, calcitonin, and a probiotic based on *Bifidobacterium animalis* — on bone defect healing in an *in vivo* experiment.

Materials and methods

In an *in vivo* experiment, reparative osteogenesis was studied in 32 animals (Wistar rats) whose tibia was injured with a dental drill using ketamine anesthesia. They were divided into 8 groups of 4 rats: group 1 — control; in group 2, the site of bone damage was irradiated with an infrared laser (Lika-Therapevt M, manufacturer Fotonika Plus, Ukraine, wavelength 810 nm, power density 50 mW/cm²) for 3 minutes immediately after the injury; in group 3, the animals were injected with calcitonin (60 mg/0.1 ml subcutaneously, 2 days after the injury); in group 4, the animals were orally administered probiotic *B.animalis* (1 drop per day, corresponding to at least $0.25 \cdot 10^9$ live lyophilized bacteria

Bifidobacterium animalis subsp. *lactis* BB-12®, for 2 weeks); in group 5, probiotic *B.animalis* was orally administered and the injury site was irradiated with a laser; in group 6, rats were orally administered probiotic *B.animalis* and calcitonin; in group 7, rats were administered calcitonin and the injury site was irradiated with a laser; in group 8, animals were irradiated with a laser, they received calcitonin, and probiotic was administered orally. Animals were removed from the experiment under general ketamine anesthesia.

All manipulations on animals were performed in accordance with the requirements of bioethics and international principles of humane treatment of laboratory animals (Strasbourg, 1986), as well as the Law of Ukraine No. 3447-IV of February 21, 2006 “On the protection of animals from cruelty”.

The study of animal limbs was performed on day 28 after tibia injury using a Toshiba Radrex X-ray diagnostic system, with a power of 80 kW, a radiation dose during digital radiography of 0.03 mSv, ventrodorsal positioning (on the stomach, back up), as well as right lateral (side views).

Results

In the control group, as well as in the second and third groups, the results of the tibia regeneration were very similar: there was a transverse fracture of the right tibia diaphysis in the stage of reparative healing; the formation of a bone callus with smooth, clear external contours was determined without signs of angular deformation. The fracture line at the time of examination is not clearly marked. The contours of the bone are clear, smooth; the axis of the bone is preserved; no signs of infection or pathological periostitis were detected (Fig. 2–4).

In group 4, we observed transverse fractures in the middle third of the right tibia diaphysis, mainly with displacement of fragments and the formation of an immature bone callus around the injury zone (Fig. 5). The bone callus was pronounced and had a rough, massive structure, with uneven and indistinct contours, which indicates the phase of immature osteogenesis. There is a change in the anatomical axis of the bone due to angular deformation (the angle is open dorsally), the contours of the bone fragments were only partially visualized due to the dense layering of newly formed tissue. The callus covers both the medial and lateral surfaces of the tibia with partial fusion with the fibula. The articular surfaces are preserved, no pathological changes in the foot and knee joint have been detected, the process of fracture consolidation is ongoing.

In study group 5, there was a transverse fracture of the right tibia with the entry of fragments at an angle, displacement (in width and length) and formation of a bone callus. The contours of the callus are clear, with an even density, corresponding to the phase of mature bone formation. No signs of infection or pathological periostitis were detected (Fig. 6).

Animals in group 6 demonstrated reparative osteogenesis with the formation of a bone callus, the contours of which are unclear, with an uneven density, corresponding to the phase of immature bone formation (partly fibrous, partly osteoid tissue) (Fig. 7).



Figure 2. Transverse fracture of the right tibia diaphysis without displacement of fragments, the stage of reparative healing (group 1). The formation of a bone callus with smooth, clear external contours is determined, without signs of angular deformation. The axis of the bone is preserved. Partial fusion of fragments in the fracture area is visualized, but the fracture lines are preserved. No signs of infection or pathological periostitis were detected. The process of consolidation of the fracture continues

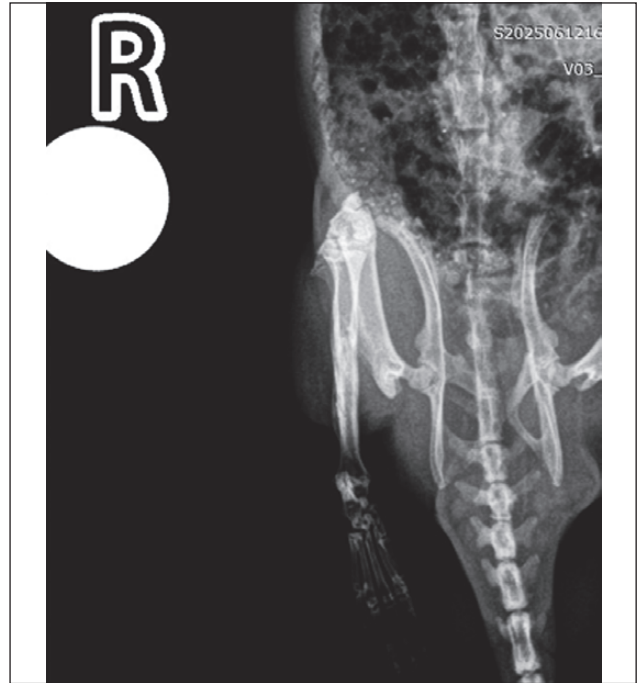


Figure 3. Consolidated fracture of the right tibia diaphysis (group 2). The radiograph visualizes a consolidated fracture without the formation of an excessive bone callus. The fracture line is not clearly contoured at the time of examination. The contours of the bone are clear and even, the axis of the bone is preserved. No signs of infection or pathological periostitis were detected. The fracture line is not clearly contoured at the time of examination

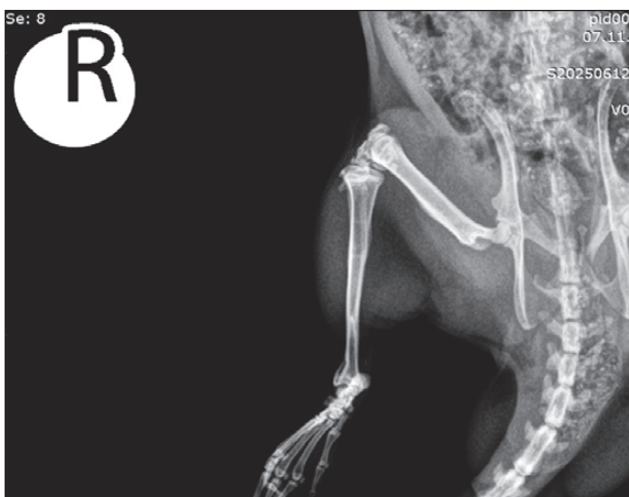


Figure 4. Consolidated fracture of the right tibia diaphysis (group 3). The radiograph visualizes a consolidated fracture without the formation of an excessive bone callus. The fracture line is not clearly contoured at the time of examination. The contours of the bone are clear and even. The axis of the bone is preserved, no signs of infection or pathological periostitis were detected



Figure 5. Transverse fracture of the right tibia diaphysis with displacement of fragments, formation of an immature bone callus in the repair phase (group 4)

In study group 7, we identified transverse fractures of the middle third of the right tibia diaphysis with displacement of fragments. In the fracture zone, the initial formation of a bone callus was visualized, which had a heterogeneous structure with unclear boundaries. It is noteworthy that in these rats, the contours of the bone fragments were clearly differentiated, but complete fusion was not detected (Fig. 8).

The course of reparative osteogenesis in study group 8 can be characterized as interesting and promising. After all, in these animals, the formation of a bone callus with smooth, clear external contours was noted without signs of angular deformation, with preservation of the anatomical axis of the bone. Partial fusion of fragments in the fracture area was visualized, with no signs of infection or pathological periostitis (Fig. 9).

Discussion

Currently, experimental studies and clinical observations are ongoing to develop new treatments for improvement of bone fracture healing [10, 12, 34, 36].

The fracture healing process begins after vascular disruption, which causes hematoma and activates thrombotic factors in the blood coagulation cascade. This leads to an inflammatory response, during which cytokines and growth factors recruit osteoprogenitor and mesenchymal cells, which generate granulation tissue at the edges of the fractured bone [34, 35, 37]. Granulation tissue is then replaced by matrix-based bone tissue, formed either by intramembranous (direct) bone formation [36, 37] or initially by hyaline cartilage, which sub-



Figure 6. Transverse fracture of the right tibia diaphysis with displacement of fragments, formation of a mature bone callus (group 5)

sequently mineralizes into bone tissue by endochondral (indirect) formation [35–37]. In *in vivo* bone fracture models, after 4 weeks of recovery in rats, the final phase of fracture healing is initiated — the transformation of hard callus/woven bone into cortical bone [37, 38]. The formation of hard callus indicates the final phase of fracture healing, and then the bone will undergo a remodeling phase [39, 40].

The positive effect of infrared laser radiation on reparative osteogenesis is due to the reduction in the severity of

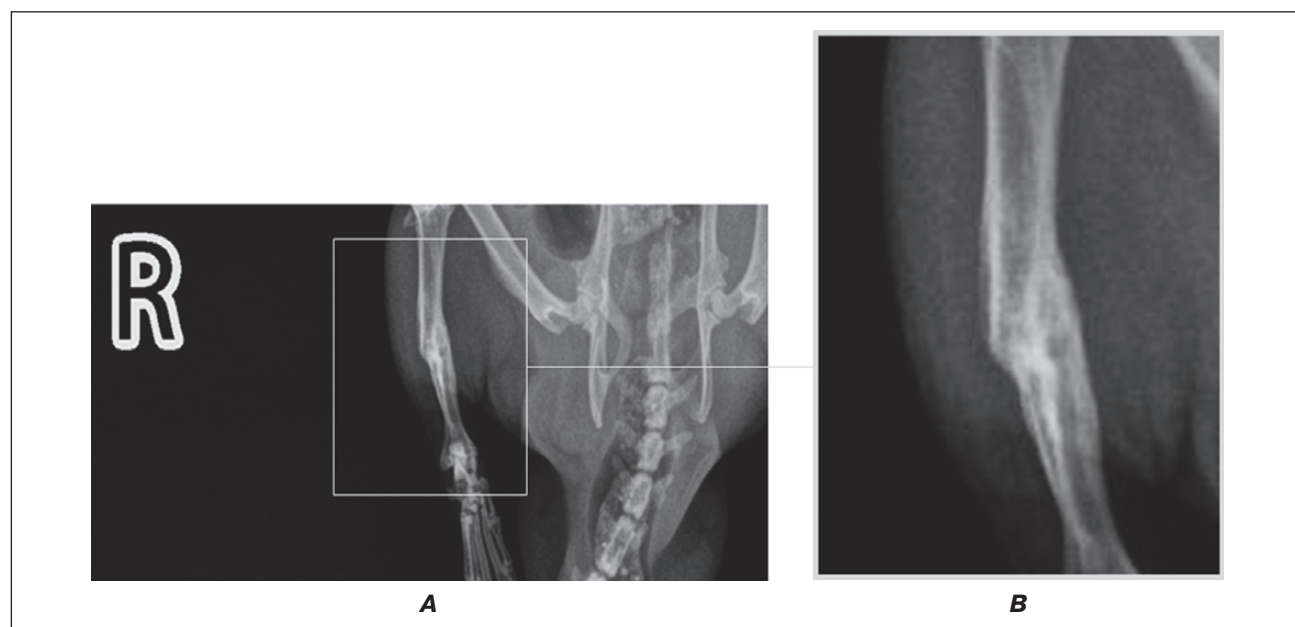


Figure 7. Transverse fracture of the right tibia diaphysis with displacement of fragments, formation of an immature bone callus in the repair phase (group 6). A transverse fracture with the entry of fragments at an angle is determined (A). In the area of the diaphysis of the right tibia, the formation of a bone callus is noted. The contours of the callus are unclear, with uneven density, which corresponds to the phase of immature bone tissue formation (partly fibrous, partly osteoid) (B). No signs of infection or pathological periostitis were detected; the process of fracture consolidation continues

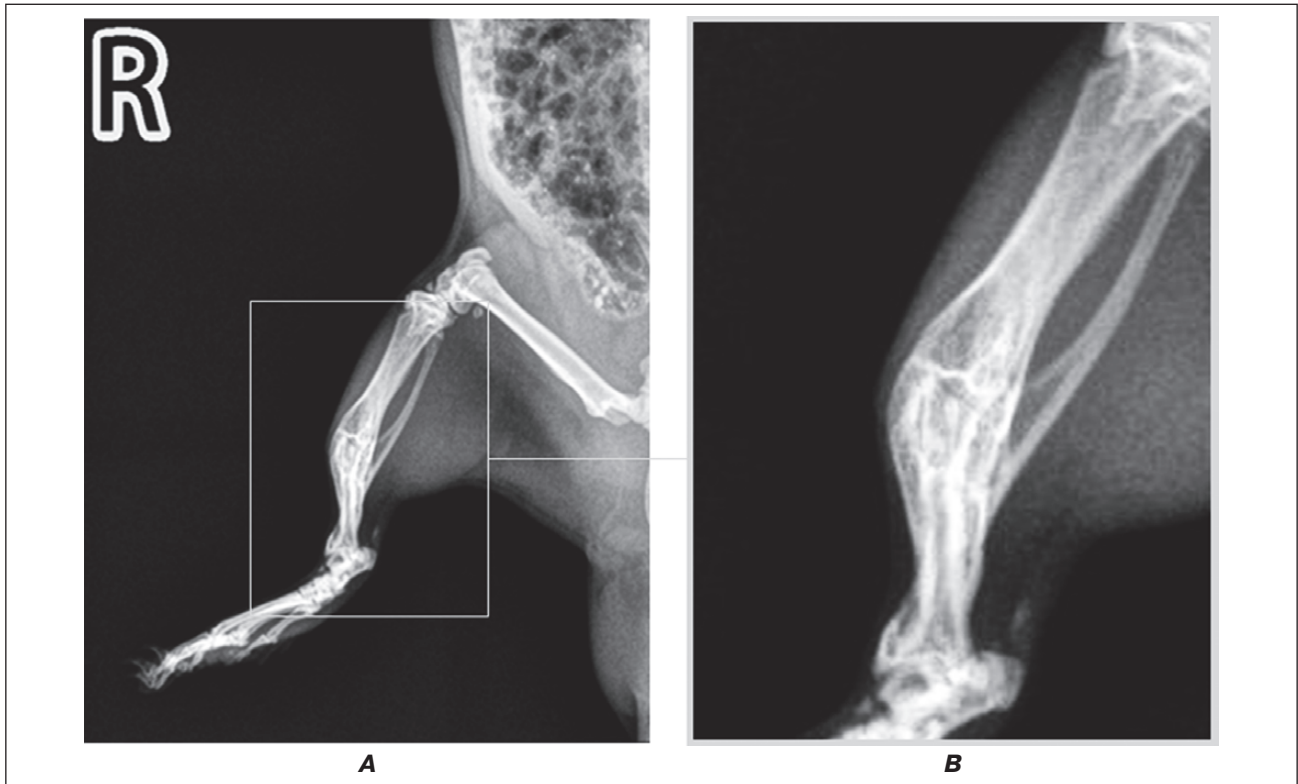


Figure 8. Transverse fracture of the right tibia diaphysis with displacement of fragments, formation of an immature bone callus in the early repair phase (group 7). The initial formation of a bone callus is visualized in the fracture zone, which has a heterogeneous structure with unclear boundaries (A). There is a deformation of the bone anatomical axis due to angular deformation (the angle is open dorsally). The contours of the fragments are clearly differentiated (B), complete fusion is not detected. No signs of infection or pathological periostitis are detected, the process of consolidation of the fracture is ongoing

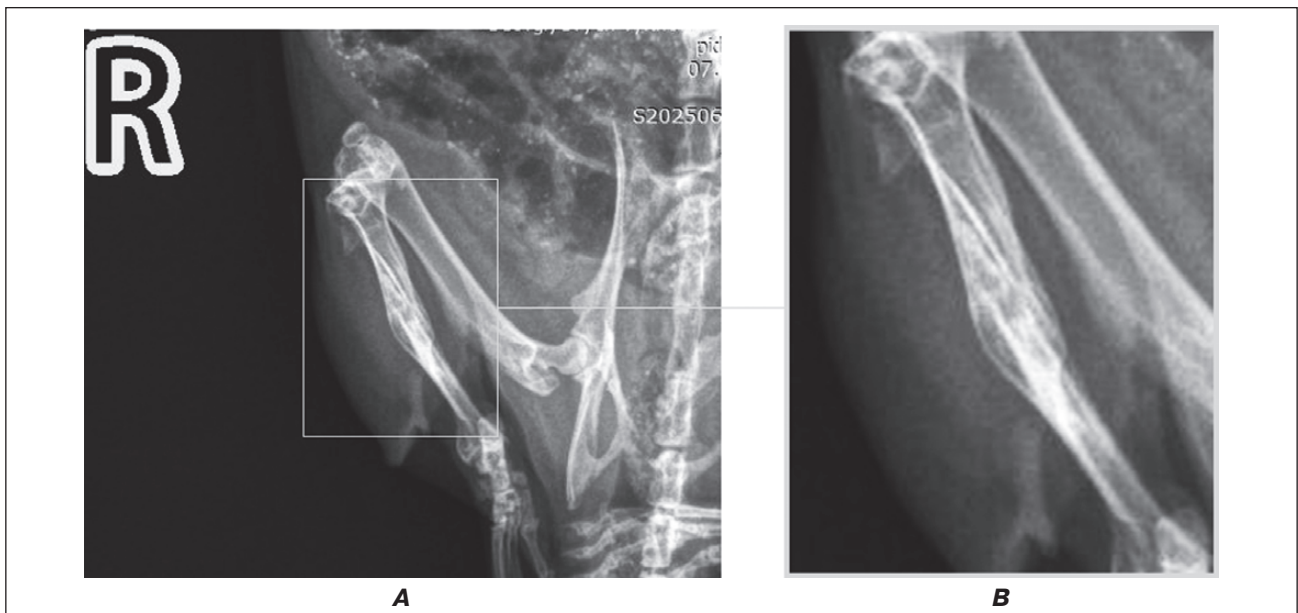


Figure 9. Transverse fracture of the right tibia diaphysis without displacement of fragments, the stage of reparative healing (group 8). The formation of a bone callus with smooth, clear external contours is determined, without signs of angular deformation (A). The axis of the bone is preserved. Partial fusion of fragments in the fracture area is visualized (B), but the fracture lines are preserved. No signs of infection or pathological periostitis were detected, the process of the fracture consolidation continues

hemodynamic disturbances, the activation of angiogenesis in granulation tissue, which is one of the components of the regenerate that filled the bone defect, matured and turned into connective tissue; stimulation of the proliferative potential of fibroblastic cells and cells with osteoblastic activity in granulation tissue; increased proliferative potential of osteoblastic elements of bone tissue, as well as stimulation of macrophage cells [21, 41, 42].

Such effects of the laser probably led to satisfactory results of osteogenesis modulation in study groups 2 and 5, in which laser in monomode and laser with probiotic were used. In these groups, osteogenesis proceeded more harmoniously than in the control group and the probiotic group. Also, our study showed that the formation of bone callus under the influence of the laser is active, but nonlinear and not always symmetrical, which is in line with the results obtained in other studies [43–45].

Instead, this work for the first time paid attention to the study of the combined effect of several modulating factors on reparative osteogenesis, namely laser irradiation, calcitonin and probiotic. It should be noted that the maximum stimulating effect on the formation of bone callus in experimental animals was observed in the laser + calcitonin group, which can even be characterized as excessive reparative activity of bone tissue.

On the other hand, in the groups where a probiotic was present, reparative osteogenesis in rats proceeded more harmoniously, demonstrating better radiological results, such as in the calcitonin + probiotic group and especially in the group where the *B.animalis* preparation was combined with laser and calcitonin administration. It can be reasonably assumed that the inherent ability of *B.animalis* to normalize calcium metabolism [32, 46, 47] creates conditions for reparative osteogenesis, as close as possible to the physiological scenario.

Conclusions

In vivo studies have shown that different modulating factors create different radiological patterns of healing of damaged bones. In this case, the combination of laser with calcitonin leads to the most pronounced radiological signs of bone callus formation in experimental animals. However, this effect is not optimal due to the involvement of an excessive amount of granulation tissue in the regeneration zone, asymmetry and heterogeneity in the structures of the regenerating bone tissue.

It is important to note that the combination of calcitonin with a probiotic, as well as laser irradiation with calcitonin and a probiotic promoted harmonious reparative osteogenesis, which is confirmed by the corresponding radiological pattern. The ability of *B.animalis* to reduce the intensity of systemic inflammation, to modulate the absorption of calcium from the intestine and influence its metabolic pathways may be a prerequisite for achieving full bone repair.

Prospects for further research. In the future, research on the influence of modulating factors on the cellular and molecular mechanisms of reparative osteogenesis is of interest.

References

1. Chekhun V. *Modern Landscape of Innovative Technologies in Optimizing the Quality of Life of Cancer Patients. Experimental Oncology.* 2025;46(4):281–288.
2. Drobotun O, Protsenko V, Ternovyy N. *Improving Patients' Quality of Life After Surgical Treatment of Primary Malignant Bone Tumors Using a Training 3D Model. Experimental Oncology.* 2025;46(4):341–344.
3. Panez-Toro I, Muñoz-García J, Vargas-Franco JW, et al. *Advances in Osteosarcoma. Curr Osteoporos Rep.* 2023;21(4):330–343. doi: 10.1007/s11914-023-00803-9.
4. Hosseini H, Heydari S, Hushmandi K, Daneshi S, Rasi R. *Bone tumors: a systematic review of prevalence, risk determinants, and survival patterns. BMC Cancer.* 2025;25(1):321.
5. Cini C, Asunis E, Griffoni C, Evangelisti G, Tedesco G, et al. *Surgical Management of Sacral Bone Tumors: A Retrospective Analysis of Outcomes, Complications, and Survival. Diagnostics (Basel).* 2025;15(7):917.
6. Lukianova N, Zadovnyi T, Kashuba E, Borikun T, Mushii O, Chekhun V. *Expression of markers of bone tissue remodeling in breast cancer and prostate cancer cells in vitro. Exp Oncol.* 2022;44(1):39–46. doi: 10.32471/exp-oncology.2312-8852.vol-44-no-1.17354.
7. Chekhun VF. *MicroRNAs are a key factor in the globalization of tumor-host relationships. Exp Oncol.* 2019;41(3):188–194. doi: 10.32471/exp-oncology.2312-8852.vol-41-no-3.13431.
8. Seibel MJ. *Biochemical markers of bone turnover: part I: biochemistry and variability. Clin Biochem Rev.* 2005;26(4):97–122.
9. Garnero P. *The Utility of Biomarkers in Osteoporosis Management. Mol Diagn Ther.* 2017;21(4):401–418.
10. Gewartowska O, et al. *Cytoplasmic polyadenylation by TENT5A is required for proper bone formation. Cell Rep.* 2021;35:109015. doi: 10.1016/j.celrep.2021.109015.
11. Tanaka S, Matsumoto T. *Sclerostin: from bench to bedside. J Bone Miner Metab.* 2021;39:332–340. doi: 10.1007/s00774-020-01176-0.
12. De Pace R, Iaquina MR, Benkhalqui A, et al. *Revolutions in bone healing: the role of 3D models. Cell Regen.* 2025;14:7. doi: 10.1186/s13619-025-00225-1.
13. Noda S, et al. *Effect of cell culture density on dental pulp-derived mesenchymal stem cells with reference to osteogenic differentiation. Sci Rep.* 2019;9:5430. doi: 10.1038/s41598-019-41741-w.
14. De Freitas LC, Kawamoto EL, et al. *Use of Phototherapy and Er-YAG Laser in the Management of Mandible Osteoradionecrosis: a Case Report. J Lasers Med Sci.* 2023;14:e58.
15. El Mobadder M, Grzech-Lesniak Z, El Mobadder W, Rifai M, Ghandour M, Nammour S. *Management of Medication-Related Osteonecrosis of the Jaw with Photobiomodulation and Minimal Surgical Intervention. Dent J.* 2023;11:127.
16. Chen AC, Arany PR, Huang YY, Tomkinson EM, Sharma SK, Kharkwal GB, et al. *Low-level laser therapy activates NF-κB via generation of reactive oxygen species in mouse embryonic fibroblasts. PLoS One.* 2011;6:e22453.
17. Rola P, et al. *Changes in Cell Biology under the Influence of Low-Level Laser Therapy. Photonics.* 2022;9:502.
18. Wan Z, Zhang P, Lv L, Zhou Y. *NIR light-assisted phototherapies for bone-related diseases and bone tissue regenera-*

tion: a systematic review. *Theranostics*. 2020;10(25):11837-11861.

19. Fu J, Liu X, Tan L, Cui Z, Zheng Y, Liang Y, et al. Photoelectric-responsive extracellular matrix for bone engineering. *ACS Nano*. 2019;13:13581-13594. doi: 10.1021/acsnano.9b08115.

20. Sanchez-Casanova S, Martin-Saavedra FM, Escudero-Duch C, Falguera Uceda MI, Prieto M, Arruebo M, et al. Local delivery of bone morphogenetic protein-2 from near infrared-responsive hydrogels for bone tissue regeneration. *Biomaterials*. 2020;241:119909.

21. Berni M, Brancato AM, Torriani C, Bina V, Annunziata S, Cornella E, et al. The Role of Low-Level Laser Therapy in Bone Healing: systematic review. *Int J Mol Sci*. 2023;24(8):7094.

22. Mehreen A, Faisal M, Zulfiqar B, Hays D, Dhananjaya K, Yaseen F, Liang Y. Connecting bone remodeling and regeneration: unraveling hormones and signaling pathways. *Biology (Basel)*. 2025;14(3):274.

23. Bonura A, Brunelli N, Marcosano M, Iaccarino G, Fofi L, Vernieri F, Altamura C. Calcitonin gene-related peptide systemic effects: embracing the complexity of its biological roles — a narrative review. *Int J Mol Sci*. 2023;24(18):13979.

24. Keller J, et al. Calcitonin controls bone formation by inhibiting the release of sphingosine 1-phosphate from osteoclasts. *Nat Commun*. 2014;5:5215. doi: 10.1038/ncomms6215.

25. Weiss RE, Singer FR, Gorn AH, Hofer DP, Nimni ME. Calcitonin stimulates bone formation when administered prior to initiation of osteogenesis. *J Clin Invest*. 1981;68(3):815-818. doi: 10.1172/jci110319.

26. Harahap IA, Moszak M, Czapka-Matysik M, Skrypnik K, Bogdański P, Suliburska J. Effects of daily probiotic supplementation with *Lactobacillus acidophilus* on calcium status, bone metabolism biomarkers, and bone mineral density in postmenopausal women: a controlled and randomized clinical study. *Front Nutr*. 2024;11:1401920. doi: 10.3389/fnut.2024.1401920.

27. Suliburska J, Harahap IA, Skrypnik K, Bogdański P. The Impact of Multispecies Probiotics on Calcium and Magnesium Status in Healthy Male Rats. *Nutrients*. 2021;13(10):3513. doi: 10.3390/nu13103513.

28. Harahap IA, Suliburska J. Probiotics and isoflavones as a promising therapeutic for calcium status and bone health: a narrative review. *Foods*. 2021;10(11):2685. doi: 10.3390/foods10112685.

29. Liu Y, Zhao Y, Yang Y, Wang Z. Effects of probiotics, prebiotics, and synbiotics on calcium homeostasis and bone health with aging: a systematic review. *Worldviews Evid Based Nurs*. 2019;16(6):478-484. doi: 10.1111/wvn.12405.

30. Collins FL, Rios-Arce ND, Schepper JD, Parameswaran N, McCabe LR. The Potential of Probiotics as a Therapy for Osteoporosis. *Microbiol Spectr*. 2017;5(4): 10.1128/microbiolspec.bad-0015-2016. doi: 10.1128/microbiolspec.BAD-0015-2016.

31. Wang F, Wei W, Liu PJ. Effects of probiotic supplementation on bone health in postmenopausal women: a systematic review and meta-analysis. *Front Endocrinol (Lausanne)*. 2024;15:1487998. doi: 10.3389/fendo.2024.1487998.

32. Yumol JL, Gittings W, de Souza RJ, Ward WE. A systematic review and meta-analysis of the effects of probiotics on bone

outcomes in rodent models. *J Bone Miner Res*. 2025;40(1):100-113. doi: 10.1093/jbmr/zjae187.

33. Fu FS, Chen HH, Chen Y, Yuan Y, Zhao Y, Yu A, Zhang XZ. Engineered *Bacillus subtilis* enhances bone regeneration via immunoregulation and anti-infection. *Bioact Mater*. 2025;46:503-515. doi: 10.1016/j.bioactmat.2025.01.003.

34. Handool KO, Ibrahim SM, Kaka U, et al. Optimization of a closed rat tibial fracture model. *J Exp Orthop*. 2018;5:13. doi: 10.1186/s40634-018-0128-6.

35. Anggita M, Nugroho WS, Fibrianto YH, Budhi S, Budipitojo T. Callus formation in fractured femur of rats treated with injection of human umbilical cord mesenchymal stem cell-conditioned medium. *Vet Med Int*. 2021;2021:8410175. doi: 10.1155/2021/8410175.

36. Stetsiv M, Abdulsalam S, Dauphinee D, Sanjay A, Guzzo RM. Epigenetic control of osteogenesis: pathways toward improved bone regeneration. *Curr Osteoporos Rep*. 2025;23(1):27. doi: 10.1007/s11914-025-00923-4.

37. Villafan-Bernal JR, Franco-De La Torre L, Sandoval-Rodriguez AS, Armendariz-Borunda J, Alcala-Zermeno JL, Cruz-Ramos JA, et al. Molecular profiling of a simple rat model of open tibial fractures with hematoma and periosteum disruption. *Exp Ther Med*. 2016;12(5):3261-3267. doi: 10.3892/etm.2016.3758.

38. Ciobanu P, Danciu M, Pascu A, Gardikiotis I, Forna N, Sirbu MT, et al. Experimental Study on Rats with Critical-Size Bone Defects Comparing Effects of Autologous Bone Graft, Equine Bone Substitute Bio-Gen® Alone or in Association with Platelet-Rich Fibrin (PRF). *Polymers*. 2024;16(11):1502. doi: 10.3390/polym16111502.

39. Dalle Carbonare L, Cominacini M, Trabetti E, Bombieri C, Pessoa J, Romanelli MG, Valenti MT. The bone microenvironment: new insights into the role of stem cells and cell communication in bone regeneration. *Stem Cell Res Ther*. 2025;16(1):169. doi: 10.1186/s13287-025-04288-4.

40. Kanjilal D, Grieg C, Culbertson MD, Lin SS, Vives M, Benevenia J, O'Connor JP. Improved osteogenesis in rat femur segmental defects treated with human allograft and zinc adjuvants. *Exp Biol Med (Maywood)*. 2021;246(16):1857-1868. doi: 10.1177/15353702211019008.

41. Amaroli A, Colombo E, Zeki A, Aicardi S, Benedicenti S, de Angelis N. Interaction between laser light and osteoblasts: photobiomodulation as a trend in the management of socket bone preservation — a review. *Biology*. 2020;9(11):409. doi: 10.3390/biology9110409.

42. Dos Santos CPC, Cruel PTE, Buchaim DV, da Cunha MR, Ervolino E, Issa JPM, et al. Calcium hydroxyapatite combined with photobiomodulation for bone tissue repair: a systematic review. *Materials*. 2025;18(5):1120. doi: 10.3390/ma18051120.

43. De Lima Luna CA, do Couto MFN, Alves MSA, de Andrade Hage C, de Figueiredo Chaves RH, Guimaraes DM. Photobiomodulation of alveolar bone healing in rats with low-level laser and light emitting diode therapy. *Lasers Med Sci*. 2025;40(1):26. doi: 10.1007/s10103-025-04281-6.

44. Hazrati P, Azadi A, Fekrazad S, Wang HL, Fekrazad R. The effect of photobiomodulation therapy on fracture healing: a systematic review and meta-analysis of animal studies. *Lasers Med Sci*. 2025;40(1):121. doi: 10.1007/s10103-025-04376-0.

45. Sasso Stuani MB, Sasso Stuani A, Leite Pedrosa G, da Silva Mira PC, Gollino S, Dastra M, Melsen B. The effect of low-level laser therapy after rapid maxillary expansion: Micro-CT analysis. *Lasers Med Sci.* 2025;40(1):245. doi: 10.1007/s10103-025-04497-6.

46. McCabe LR, Parameswaran N. Advances in Probiotic Regulation of Bone and Mineral Metabolism. *Calcif Tissue Int.* 2018;102(4):480-488. doi: 10.1007/s00223-018-0403-7.

47. Malmir H, Ejtahed HS, Soroush AR, Mortazavian AM, Fahimfar N, Ostovar A, et al. Probiotics as a New Regulator for Bone Health: a systematic review and meta-analysis. *Evid Based Complement Alternat Med.* 2021;2021:3582989. doi: 10.1155/2021/3582989.

Received 01.06.2025

Revised 15.06.2025

Accepted 17.07.2025

Information about authors

Serhii V. Konovalenko, PhD in Medicine, Research Fellow, Department of Tumor Process Monitoring and Therapy Design, R.E. Kavetsky Institute of Experimental Pathology, Oncology and Radiobiology of NASU, Kyiv, Ukraine; e-mail: servlakon@ukr.net; phone: +380 (67) 733-77-44; <https://orcid.org/0000-0001-9212-9255>

Volodymyr V. Protsenko, MD, DSc, PhD, Professor, Leading Research Fellow, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: ip15@ukr.net; phone: +380 (67) 476-81-20, +380 (50) 380-37-81; <https://orcid.org/0000-0001-8896-8371>

Volodymyr H. Tykhonov, PhD-student, Oncologist, Department of Tumor Process Monitoring and Therapy Design, R.E. Kavetsky Institute of Experimental Pathology, Oncology and Radiobiology of NASU, Kyiv, Ukraine; e-mail: rad40044@gmail.com; phone: +380 (93) 000-30-31; <https://orcid.org/0009-0003-0567-4477>

Yevhen O. Solonitsyn, PhD in Medicine, Orthopedist-Traumatologist, Department of Foot Pathology and Complex Prosthetic Treatment, Institute of Traumatology and Orthopedics of NAMSU, Kyiv, Ukraine; e-mail: g_solo@ukr.net; phone: +380 (50) 934-28-81; <https://orcid.org/0000-0001-7057-1405>

Yurii K. Hrebennikov, Orthopedic-Traumatologist, Kyiv City Clinical Hospital 12, Kyiv, Ukraine; e-mail: bospor12@gmail.com; phone: +380 (93) 898-64-77; <https://orcid.org/0009-0009-9778-561X>

Volodymyr F. Konovalenko, MD, DSc, PhD, Professor, Leading Research Fellow, Department of Tumor Process Monitoring and Therapy Design, R.E. Kavetsky Institute of Experimental Pathology, Oncology and Radiobiology of NASU, Kyiv, Ukraine; e-mail: vfkonovalenko@i.ua; phone: +380 (97) 966-99-31; <https://orcid.org/0000-0001-7486-3835>

Mykola K. Ternovyi, MD, DSc, PhD, Professor, Leading Research Fellow, Department of Tumor Process Monitoring and Therapy Design, R.E. Kavetsky Institute of Experimental Pathology, Oncology and Radiobiology of NASU, Kyiv, Ukraine; e-mail: prterno@ukr.net; phone: +380 (50) 468-39-41; <https://orcid.org/0000-0001-8769-0451>

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 publication was prepared with state funding as part of the research work in accordance with the research plan of the R.E. Kavetsky Institute of Experimental Pathology, Oncology and Radiobiology of NASU and is a fragment of the research project "Development of an algorithm for stimulating reparative osteogenesis after oncolytic and traumatic bone damage" (2025–2027), state registration number of the research project: 0125U000049.

Ethical norms. The study was conducted in compliance with the international principles of humane treatment of laboratory animals (Strasbourg, 1986), as well as the Law of Ukraine No. 3447-IV of February 21, 2006 "On the protection of animals from cruelty".

Authors' contribution. S.V. Konovalenko — concept and design, collection and processing, analysis of the obtained data, writing the text; V.V. Protsenko — analysis of the obtained data, editing the text; V.H. Tykhonov — implementation of experimental studies, collection and processing, analysis of the obtained data; Ye.O. Solonitsyn — implementation of experimental studies, collection and processing of obtained data; Yu.K. Hrebennikov — collection and processing of materials, analysis of the obtained data; V.F. Konovalenko — editing the text, approval for publication; M.K. Ternovyi — concept and design, text editing, approval for publication.

Коноваленко С.В.¹, Проценко В.В.², Тихонов В.Г.¹, Солоніцин Є.О.², Гребенніков Ю.К.³, Коноваленко В.Ф.¹, Терновий М.К.¹

¹Інститут експериментальної патології, онкології та радіобіології імені Р.Є. Кавецького НАН України, м. Київ, Україна

²ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України», м. Київ, Україна

³Київська міська клінічна лікарня № 12, м. Київ, Україна

Вивчення комбінованої дії модулюючих факторів на репаративний остеогенез

Резюме. Актуальність. На сучасному етапі продовжуються експериментальні дослідження та клінічні спостереження з метою розробки нових методів лікування для покращення загоєння переломів кісток. В епоху зростання захворюваності на первинні злоякісні й метастатичні пухлини кісток, а також у часи травматичної епідемії під час війни вивчення можливостей впливу на перебіг кісткової репарації з метою її прискорення або покращення є обґрунтованим напрямом експериментальних досліджень. **Мета:** вивчити вплив модулюючих факторів — інфрачервоного лазерного випромінювання, кальцитоніну та пробіотика на основі *Bifidobacterium animalis* — на загоєння кісткового дефекту в експерименті *in vivo*. **Матеріали та методи.** В експерименті *in vivo* вивчено репаративний остеогенез у 32 тварин (щурів Wistar), великогомілку кістку яких травмували стоматологічним буром, використовуючи кетаміновий наркоз. Вплив модулюючих факторів на формування кісткової мозолі оцінювали за допомогою дослідження ушкодження кінцівок тварин з використанням рентген-діагностичної системи Toshiba Radrex потужністю 80 кВт із дозою випромінювання при цифровій рентгенографії 0,03 мЗв; укладка вентродорсальна (на животі, спиною наверх), а також права латеральна (бокові зйомки). **Результати.** Дослідження показало, що формування кісткової мозолі під впливом лазера йде активно, але нелінійно і не завжди симетрично, що перекликається з результатами, отриманими в інших дослідженнях. У цій роботі вперше приділено увагу вивченню поєднаного впливу одразу

декількох модулюючих факторів на репаративний остеогенез, а саме лазерного випромінювання, гормону кальцитоніну й пробіотика. Слід зазначити, що максимальний стимулюючий вплив на формування кісткової мозолі в експериментальних тварин спостерігався в групі «лазер + кальцитонін», що можна охарактеризувати навіть як надмірну репаративну активність кісткової тканини. Натомість у групах, де був присутній пробіотик, репаративний остеогенез у щурів проходив більш гармонійно, демонструючи кращі рентгенологічні результати, як, наприклад, у групі «кальцитонін + пробіотик» і особливо в групі, де препарат *B.animalis* був поєднаний із лазером та введенням кальцитоніну. Можна обґрунтовано припустити, що здатність *B.animalis* нормалізувати кальцієвий метаболізм створює умови для репаративного остеогенезу, максимально наближеного до фізіологічного сценарію. **Висновки.** Поєднання кальцитоніну з пробіотиком, а також лазерного випромінювання з кальцитоніном і пробіотиком сприяло гармонійному репаративному остеогенезу, що підтверджується відповідною рентгенологічною картиною. Здатність *B.animalis* зменшувати інтенсивність системного запалення, а також модулювати всмоктування кальцію з кишечника і впливати на його метаболічні шляхи може бути передумовою досягнення повноцінної кісткової репарації.

Ключові слова: травматичні та онкологічні ушкодження кісток; переломи; репаративний остеогенез; кісткова мозоль; інфрачервоне лазерне випромінювання; кальцитонін; *Bifidobacterium animalis*; кальцій; рентгенограма

V.V. Chorna¹, A.M. Hrynzovskyi², S.I. Kalashchenko², S.Yu. Nesterova³,
L.B. Lototska⁴, A.M. Hubar⁵

¹Vinnitsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnitsia, Ukraine

²Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine

³Vinnitsia Mykhailo Kotsiubynskyi State Pedagogical University, Vinnitsia, Ukraine

⁴Danylo Halytsky Lviv National Medical University, Lviv, Ukraine

⁵Ukrainian Military Medical Academy, Kyiv, Ukraine

Assessment of the effectiveness and risks of using tourniquets in the Armed Forces of Ukraine during hostilities in Ukraine

Abstract. Background. Massive bleeding remains one of the leading causes of death among military personnel in armed conflicts, which leads to a constant need to improve the means of temporary bleeding control. The combat application tourniquet continues to be the standard in tactical medicine due to its proven clinical effectiveness, high speed of application and reliability during hostilities. Its use significantly reduces mortality in injuries with critical bleeding from the extremities, especially at the pre-hospital stage of medical care. The purpose was to analyze the impact of using tourniquets by military personnel in cases of massive/critical bleedings, traumatic amputations of limbs, and to assess the timeliness of the conversion in the world and in Ukraine. Particular attention is paid to the rationale for the expediency and in expediency of using tourniquets, the duration of application, as well as the study of possible complications associated with their excessive or untimely use during intense hostilities and delays in evacuating the wounded. **Materials and methods.** The work was carried out through a systematic review, meta-analysis, content analysis of articles in the scientometric databases Scopus, PubMed, ResearchGate. The literature search was carried out using the following keywords: "tourniquet", "stop the bleeding". The study included descriptions of clinical cases of applying tourniquets by the servicemen of the Armed Forces of Ukraine, retrospective analyses and literature reviews. After reviewing the articles and reading their full texts, 8 sources were selected. The search covered the period from 2012 to 2025. The study was conducted based on one surgical hospital (Role 2) in April-May 2024 and April-May 2025. The use of means to temporary stop critical bleeding, its appropriateness, duration and risks of complications were analyzed in 135 servicemen who were in the combat zone. **Results and conclusions.** The duration of hemostasis in most cases (60.0 in 2025 %, an increase by 10 % vs. 2024) exceeds 2 hours, and the duration of tourniquet use exceeding 3 hours (compared to 2024, the frequency has increased by 5.0 % in 2025) indicates a prolonged evacuation of the wounded as a result of intense hostilities, which, in turn, increases the risk of ischemic complications and requires careful clinical monitoring. In 70.0 % of cases, one tourniquet is enough to stop the bleeding, while in 30.0 %, two or more tourniquets are required, which indicates the more severe nature of the wounds caused by the modernization and increased destructive power of modern weapons. Ischemic complications are recorded in almost half of the cases, the main reason for which is the prolonged application of a tourniquet.

Keywords: tourniquet; massive/critical bleeding; ischemic complications; military personnel of the Armed Forces of Ukraine

Introduction

Bleeding is one of the most noticeable and dangerous manifestations of trauma, which can lead to rapid critical blood loss and death if timely assistance is not provided. Methods of stopping bleeding have been known to mankind since ancient times. One of the first written sources describing methods to control bleeding is the surgical papyri of Ancient Egypt. In particular, the Edwin Smith Papyrus, dated approximately 1600 BC, contains detailed descriptions of wounds and methods of treating them, including direct pressure on the wound, applying ligatures (bandages), and sutures to close damaged tissues [1].

These early techniques laid the foundation for the further development of surgery and medicine in general. Over time, humanity has improved methods to control bleeding, adding new tools and techniques, such as tourniquets, hemostatic agents, and modern surgical technologies. However, the basic principles established in ancient times remain relevant today: timely detection of the source of bleeding and its effective cessation during combat operations are key to saving the life of a soldier [2, 3].

These methods have become particularly relevant in the context of military conflicts, disasters, and full-scale war in Ukraine, where the speed and accuracy of applying bleeding control measures can determine the fate of both civilians and military personnel [4].

The loss of personnel due to massive bleeding in military conflicts has always called for major improvements. A revolutionary breakthrough in this area was the creation in 2004 of the combat application tourniquet (CAT) for the US Special Operations Forces, designed by Ted Westmoreland. By 2005, this tourniquet had been adapted for the needs of regular armed forces units. Since its introduction, the CAT has undergone a number of design modifications reflecting the evolution of requirements for its functionality, ergonomics, and safety of use. Today, the eighth generation of the device (Generation 8) is in use, which meets modern tactical and medical standards [5].

Between 2001 and 2010, J.F. Kragh Jr conducted research on the use of tourniquets in the US Armed Forces. The author found that during this period, its frequency increased from 4.0 to 40.0 %, which was due to the modernization of weapons and changes in the nature of combat operations [6].

During military operations, the IDF Medical Corps applied tourniquets in cases of critical bleeding, resulting in a survival rate of 87.8 % due to the rapid use of tourniquets for any injury and type of weapon used, provided that the soldier has the skills to apply a tourniquet to the wounded limb to stop critical bleeding in combat conditions. During evacuation, 25.7 % of military personnel underwent conversion, of which 2.2 % failed to stop massive bleeding and a new tourniquet/tourniquet was applied, and 8.8 % of military personnel underwent fasciotomy. The overall complication rate (neurological, with or without vascular damage) was 11.7 % of all wounded soldiers [7].

One of the key factors contributing to improved survival rates was a significant reduction in the average evacuation time from combat zones — from 4.6 hours in 2014 to 2.6 hours in 2023 [8].

The timely and correct use of tourniquets, timely evacuation, and conversion of tourniquets are relevant and directly affect the survival rate among the Armed Forces of Ukraine personnel due to Russia's long-term war against Ukraine.

The purpose was to analyze the effectiveness of the use of tourniquets by military personnel in cases of massive/critical bleeding, traumatic limb amputations, and to assess the timeliness of conversion in the world and Ukraine. Particular attention is paid to justifying the advisability and inadvisability of using a tourniquet, the duration of its application, and studying possible complications associated with its excessive or untimely use during intense combat operations and delays in the evacuation of the wounded.

Materials and methods

The work was performed by systematic review, meta-analysis, and content analysis of articles from the scientometric databases Scopus, PubMed, and ResearchGate. The literature search was conducted using the keywords: “tourniquet”, “stop the bleeding”. The work included descriptions of clinical cases of tourniquet application by the Armed Forces of Ukraine personnel, retrospective analyses, and literature reviews. This review included eight articles. The search covered the period from 2012 to 2025. The study was conducted at a single surgical hospital (Role 2) during April-May 2024 and April-May 2025. The total number of military personnel included in the study was 135. The following methods were used in the work: bibliosemantic method and content analysis, comparative analysis, systematization of the researched material, and statistical analysis.

Results

In April-May 2024 and April-May 2025, the study was conducted on the use of temporary hemostatic agents in 135 military personnel who were in the combat zone. It analyzed the effectiveness of tourniquets, taking into account the duration of their application, the anatomical location of gunshot wounds, the methods of applying hemostatic agents, and the frequency of conversion. Particular attention was paid to assessing the risk of developing ischemic complications, which made it possible to comprehensively evaluate not only the effectiveness but also the safety of modern approaches to temporarily stopping massive bleeding. Separately, cases of unjustified use of tourniquets or untimely conversion in combat conditions and tactical medicine were analyzed.

The results of the study indicate the predominant use of the CAT as the primary means of temporarily stopping critical bleeding, which was used in 92.0 % of cases (90.0 % in 2024). Such a high frequency is due to the clinically proven effectiveness of this device in massive bleeding, especially in conditions of limited time, resources, and high stress. The design features of the CAT ensure its quick and effective application in the field, with reliable fixation and the ability to accurately dose the compression pressure on the affected area. This allows not only to achieve hemostasis in a timely manner, but also to maintain it until qualified medical care is provided, which significantly reduces the risk of developing severe forms of hemorrhagic shock and increases the overall survival rate of victims.

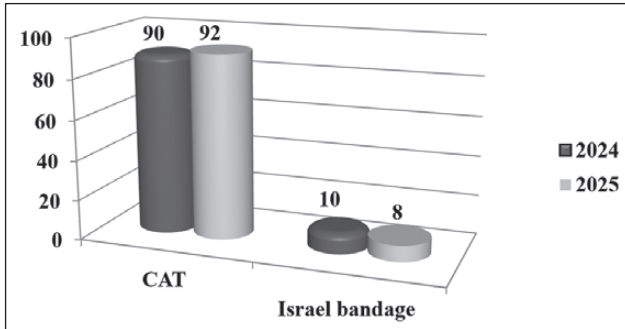


Figure 1. Distribution of temporary bleeding control measures among military personnel in the combat zone during April-May 2024/2025, %

The Israel tourniquet was used in 8.0 % of cases (10.0 % in 2024), mainly for wounds with moderate bleeding that did not pose an immediate threat of severe hemorrhagic shock. In such cases, the compression pressure of the bandage was sufficient to reliably stop the bleeding (Fig. 1).

An analysis of the duration of using temporary measures to stop massive bleeding showed that in 40.0 % of cases (50.0 % in 2024), they were used for 1–2 hours; in 45.0 % of cases (40.0 % in 2024), for 2 to 3 hours; in 15.0 % of cases (10.0 % in 2024), the duration exceeded 3 hours. Concurrent compression times, especially those exceeding three hours, are associated with an increased risk of ischemic complications and require careful monitoring of the affected limb at all stages of medical evacuation.

Regarding the conditions for applying tourniquets, in 45.0 % of cases (40.0 % in 2024), fixation was performed as part of self-help, indicating a sufficient level of training of personnel to independently provide tactical pre-hospital care in combat conditions. In the remaining 55.0 % of cases (60.0 % in 2024), tourniquets were applied by comrades or combat medics, which emphasizes the importance of teamwork and quality medical care on the battlefield.

The research showed that most bleedings were localized in the lower extremities — 70.0 % of cases (75.0 % in 2024), while upper extremity injuries were treated in 30.0 % of cases (25.0 % in 2024). The technique for applying tourniquets varied depending on the clinical situation: in 55.0 % of cases (40.0 % in 2024), it was fixed as close as possible to the source of bleeding with complete compression, while in 45.0 % of cases (60.0 % in 2024), the hemostatic device was placed 5–8 cm above the injury site.

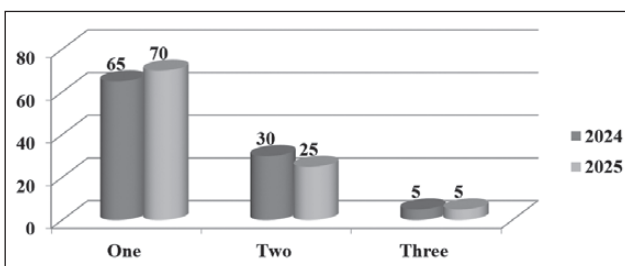


Figure 3. Distribution of the number of tourniquets applied among military personnel who were in the combat zone during April-May 2024/2025, %

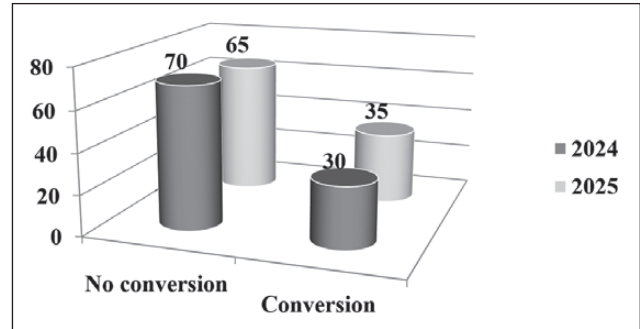


Figure 2. Distribution of conversions among military personnel who were in the combat zone during April-May 2024/2025, %

The choice of application technique was essential for assessing the risk of vascular and neurological complications and directly influenced further treatment, both conservative and surgical. In 35.0 % of cases (30.0 % in 2024), the tourniquet was converted — replaced with tamponade (alternative methods) to partially or completely restore peripheral blood flow. This approach helped reduce the risk of ischemic complications, in particular tissue necrosis or prolonged compression syndrome. At the same time, in 65.0 % of cases (70.0 % in 2024), conversion was not performed, which was probably due to the severity of the traumatic injury, the risk of recurrent bleeding, or the instability of the general condition of patients, or tactical conditions did not allow it to be performed (Fig. 2).

An analysis of the tourniquet effectiveness for temporarily stopping massive bleeding showed that in the vast majority of clinical cases — 70.0 % (65.0 % in 2024) — applying a single tourniquet was sufficient to achieve adequate hemostasis. In 25.0 % (30.0 % in 2024) of cases, two tourniquets were required, which may indicate a larger area of injury or insufficient effectiveness of a single bleeding control device. In 5.0 % (similar to 5.0 % in 2024) of cases, three tourniquets were required, indicating the exceptional severity of the blast injury and the extremely critical condition of the patients (Fig. 3).

Irreversible limb ischemia caused by critical regional blood supply disruption, the development of necrotic changes in soft tissues, and the need for subsequent amputation are among the most serious complications associated with the use of tourniquets. The main factors associated

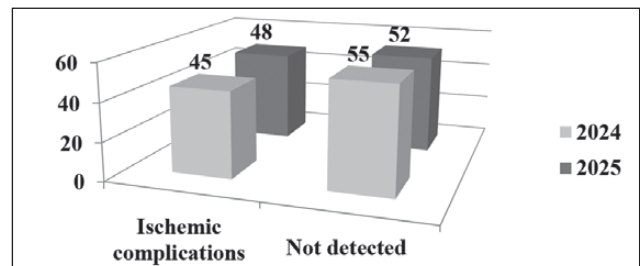


Figure 4. Distribution of complications associated with the use of tourniquets among military personnel in the combat zone during April-May 2024/2025, %

with their development were duration of ischemia and excessive compression pressure caused by incorrect application of the tourniquet.

Ischemic complications were found in 48.0 % of cases (45.0 % in 2024), indicating a high risk of irreversible changes if tourniquet application protocols are not followed. At the same time, in 52.0 % (55.0 % in 2024) of cases, such complications weren't observed in the victims, which indicates the potential effectiveness of the chosen application technique, rational choice of temporary hemostasis tactics, and proper clinical monitoring of the condition of the ischemic limb (Fig. 4).

One of the pressing issues in modern pre-hospital tactical care is the inappropriate use of tourniquets, which was recorded in 35.0 % of cases (30.0 % in 2024). Applying a tourniquet without clear clinical indications can lead to serious complications, including ischemic damage to limb tissues, and complicate further treatment of the victim.

The data obtained underscore the relevance of improving the system of training military personnel in the field of tactical pre-hospital care. In particular, deepening theoretical knowledge and regularly practicing skills regarding the indications, techniques, and rationale for using tourniquets are necessary measures to reduce the frequency of their unjustified use, which, in turn, will help reduce the frequency of complications (Table 1).

The research analyzed clinical cases of tactical pre-hospital care provided to military personnel in combat conditions, including self-help, mutual assistance among comrades, and the actions of combat medics. The effectiveness of stopping critical bleeding was assessed taking into account the operational situation, the nature of combat injuries, and the compliance of the measures taken and the measures

implemented with modern tactical medicine protocols (in particular, TCCC — Tactical Combat Casualty Care). Particular attention was paid to the quality of tourniquet application, the time to achieve hemostasis, and the frequency of complications associated with the use of bleeding control measures.

Clinical case 1

A 40-year-old male soldier of the Ukrainian Army suffered a mine-blast injury to the lower limb as a result of detonation on an anti-personnel mine (Fig. 5). At the stage of self-help/mutual assistance directly on the battlefield, a tourniquet was quickly applied in accordance with TCCC protocols to temporarily stop critical arterial bleeding. Thanks to the rapid evacuation of the victim, the tourniquet was removed 60 minutes after application, which reduced the risk of ischemic complications.

During the Role 2 medical evacuation stage, a set of measures was implemented to stabilize the general condition of the wounded. Infusion therapy was performed to restore and maintain adequate hemodynamics, as well as detoxification therapy to reduce endogenous intoxication. Analgesia was administered to effectively control pain, and antibacterial and anti-inflammatory drugs were prescribed to prevent infectious and inflammatory complications.

In the context of massive blood loss, fresh frozen plasma was transfused as component support for the hemostasis system. Due to severe traumatic injuries to the right lower limb, primary surgical treatment was performed in the form of amputation at the level of the lower third of the tibia. The therapeutic and diagnostic measures taken stabilized vital signs, allowing for further evacuation of the wounded under medical triage conditions.

Table 1. Comparative characteristics of the use of temporary bleeding control measures by military personnel in the combat zone (April-May 2024/2025), %

Parameter		2024	2025
Means of temporarily stopping bleeding, %	CAT	90	92
	Israel bandage	10	8
Time to stop bleeding, hours	1–2	50.0	40.0
	2–3	40.0	45.0
	> 3	10.0	15.0
Who imposed	Self-help	40.0	45.0
	Mutual aid	60.0	55.0
Localization of damage	Lower limbs	75.0	70.0
	Upper limbs	25.0	30.0
Height of tourniquet placement	High/tight	40.0	55.0
	5–8 cm above the wound	60.0	45.0
Conversion	Not conducted	70.0	65.0
	Conducted	30.0	35.0
Number of tourniquets	1	65.0	70.0
	2	30.0	25.0
	3	5.0	5.0
Complications	Irreversible ischemia	45.0	48.0
	No complications	55.0	52.0
Inappropriate use		30.0	35.0



Figure 5. Explosive trauma with avulsion of the right lower limb from the lower third of the tibia. Multiple gunshot shrapnel blind wounds of both tibias. Grade II hemorrhagic shock



Figure 6. Explosive trauma with avulsion of the left lower limb from the middle third of the tibia. Multiple gunshot shrapnel blind wounds of the right popliteal region and thigh with massive soft tissue defect. Grade II hemorrhagic shock

Clinical case 2

A 29-year-old male soldier of the Ukrainian Army suffered a severe injury as a result of artillery fire (Fig. 6). In the field, the victim temporarily stopped critical bleeding by applying a tourniquet as a self-help measure. The first tourniquet was applied to the lower third of the thigh, which provided partial hemostasis. To strengthen control over bleeding, a second tourniquet was applied to the upper third of the thigh. The total time of tourniquet application was 40 minutes, which corresponded to a safe time interval in order to minimize the risk of developing ischemic complications.

At the Role 2 stage, a set of intensive care measures was carried out to stabilize the general condition of the wounded and prevent the development of complications. In order to correct hypovolemia and maintain systemic hemodynamics, infusion therapy with crystalloids was initiated. Effective analgesia was used to adequately control pain. Antibiotic prophylaxis was administered to reduce the risk of infectious complications, and anti-inflammatory therapy was prescribed. In addition, a transfusion of fresh frozen plasma was performed. Subsequently, surgical treatment was conducted for amputation of the left lower limb at the level of the middle third of the tibia, as well as for multiple gunshot and shrapnel wounds. Thanks to timely surgical intervention and adequate stabilization, the patient was prepared for further medical evacuation and successfully transferred to the next stage.

Clinical case 3

A 32-year-old male soldier of the Ukrainian Army suffered a gunshot wound to his right upper limb as a result of artillery fire. A tourniquet was applied to temporarily stop critical bleeding



Figure 7. Firearm shrapnel blind wound of the right forearm in the middle third with a firearm fracture of the ulna. Tourniquet syndrome (12 hours). Irreversible ischemia of the right upper limb

in a mutual aid situation. Due to a delay in medical evacuation, the tourniquet remained on the limb for 12 hours, which significantly exceeded the recommended maximum period of use. As a result of prolonged ischemia, irreversible ischemic damage to the soft tissues of the right upper limb developed (Fig. 7).

At the Role 2 stage, a set of measures was taken to stabilize the patient's hemodynamic status and prepare him for further surgical treatment. Infusion therapy with crystalloid solutions was performed to correct hypovolemia and maintain systemic hemodynamics. Adequate analgesia was used to control severe pain. A course of antibiotic therapy was started to prevent infectious and inflammatory complications. Due to the presence of clinical signs of critical ischemia of the upper limb, fasciotomy was performed to assess the viability of muscle tissue. Subsequently, primary surgical treatment was conducted in the form of amputation of the right upper limb at the level of the upper third of the shoulder. Thanks to the timely implementation of therapeutic measures, the patient's general condition was stabilized, which made it possible to transfer him to the next stage of medical evacuation.

Clinical case 4

A 40-year-old male soldier of the Ukrainian Ground Forces was wounded as a result of artillery fire (Fig. 8). To temporarily stop massive bleeding, a tourniquet was applied within the limits of mutual assistance for 30 minutes, which ensured effective control of bleeding until evacuation without the development of ischemic complications.

At the Role 2 medical evacuation, intensive care was provided to stabilize the general condition of the wounded soldier. Infusion therapy was performed to correct hemodynamic disturbances, detoxification measures were carried out, and adequate analgesia was provided for effective pain control. Prevention of infectious complications was implemented through early administration of antibacterial and anti-inflammatory therapy. Subsequently, surgical treatment was performed for amputation. The therapeutic measures taken stabilized the patient's condition and ensured his further evacuation to the next level of medical care.

Conclusions

1. The CAT remains the primary means of temporarily stopping critical bleeding in military personnel due to its high effectiveness, speed of application, and reliability in combat/field conditions.

2. In most cases (60.0 % in 2025, a 10% increase vs. 2024), the duration of hemostasis exceeds 2 hours; applying tourniquets for more than 3 hours (the frequency has increased by 5.0 % vs. 2024) indicates a prolonged evacuation of the wounded as a result of intense combat operations, which, in turn, increases the risk of ischemic complications and requires careful clinical monitoring.

3. Compared to 2024, the number of cases of tourniquet self-application by military personnel increased by 5.0 % in 2025, indicating an improvement in their first aid training. However, in most cases (55.0 in 2025 vs. 60.0 % in 2024), tourniquets were applied by comrades or combat medics, which also confirms the importance of coordinated teamwork during injuries.

4. Most bleedings are localized in the lower extremities (70.0 in 2025 vs. 75.0 % in 2024). To stop them, tourniquets are most often applied as high as possible on the limb and at a distance of 5–8 cm above the injury site, which affects the



Figure 8. Explosive trauma with avulsion of the right lower limb from the lower third of the thigh. Multiple gunshot shrapnel blind wounds of the left lower limb

risk of developing vascular-neurological complications and amputations.

5. Tourniquet conversion is performed in only one third of cases, indicating the need for a balanced approach to reduce the risk of ischemic complications, including necrosis and prolonged compression syndrome.

6. In most cases (70.0 in 2025 vs. 65.0 % in 2024), one tourniquet was sufficient to stop bleeding. At the same time, in 30.0 % (2025) compared to 35.0 % of cases (2024), two or more tourniquets were used, indicating more severe injuries.

7. In almost half of the cases (48.0 in 2025 vs. 45.0 % in 2024), ischemic complications developed, the main cause of which remain excessive duration of tourniquet application.

8. A significant proportion of cases of unjustified tourniquet use (35.0 % in 2025 compared to 30.0 % in 2024) highlights the need to improve the level of training of military personnel in tactical medicine, especially with regard to indications and application techniques.

Prospects for further research. To continue research into the safety of tourniquet use depending on the correct choice of device, application technique, and regular clinical monitoring, which should become a priority in the training of combat medics and personnel.

References

1. Hess JR. Historic view of hemorrhage management. *J Cardiothorac Vasc Anesth.* 2013;27(4 Suppl):S3-5. doi: 10.1053/j.jvca.2013.05.010.
2. Kragh JF Jr, Swan KG, Smith DC, Mabry RL, Blackburne LH. Historical review of emergency tourniquet use to stop bleeding. *Am J Surg.* 2012;203(2):242-52. doi: 10.1016/j.amjsurg.2011.01.028.
3. Welling DR, McKay PL, Rasmussen TE, Rich NM. A brief history of the tourniquet. *J Vasc Surg.* 2012;55(1):286-90. doi: 10.1016/j.jvs.2011.10.085.
4. Chorna VV, Osyodlo GV, Stadnik SM, Savichan KV, Lypkan VM, et al. Risks and complications of tourniquet syndrome

in blast injuries in the context of contemporary military conflicts. *Ukrainian Journal of Military Medicine*. 2025;6(2):83–93. doi: 10.46847/ujmm.2025.2(6)-083.

5. Kragh JF Jr, Walters TJ, Westmoreland T, Miller RM, Mabry RL, et al. Tragedy into drama: an American history of tourniquet use in the current war. *J Spec Oper Med*. 2013;13(3):5–25. doi: 10.55460/QN66-A9MG.

6. Kragh JF Jr, Dubick MA, Aden JK, McKeague AL, Rasmussen TE, et al. U.S. military use of tourniquets from 2001 to 2010. *Prehosp Emerg Care*. 2015;19(2):184–90. doi: 10.3109/10903127.2014.964892.

7. Shlaifer A, Yitzhak A, Baruch EN, Shina A, Satanovsky A, et al. Point of injury tourniquet application during Operation Protective Edge — what do we learn? *J Trauma Acute Care Surg*. 2017;83(2):278–83. doi: 10.1097/ta.0000000000001403.

8. Tiruneh A, Lipsky AM, Twig G, Givon A, Shapira S, et al.; Israel Trauma Group. Characteristics and survival of hospitalized combat casualties during two major conflicts between Israel and Hamas: 2023 versus 2014. *BMC Emerg Med*. 2024;24(1):231. doi: 10.1186/s12873-024-01149-w.

Received 04.06.2025

Revised 18.06.2025

Accepted 17.07.2025

Information about authors

Valentyna Chorna, MD, DSc, PhD, Captain of the Medical Service of Reserve, Associate Professor, Department of Disaster Medicine and Military Medicine, Vinnytsia National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: valentina.chorna65@gmail.com; phone: +380 (67) 919-40-38; <https://orcid.org/0000-0002-9525-0613>

Anatolii Hrynzovskyi, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Emergency Medicine and Tactical Medicine, Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine; e-mail: grin_am@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-8391-5294>

Svitlana Kalashchenko, PhD in Medicine, Associate Professor, Department of Emergency Medicine and Tactical Medicine, Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine; e-mail: svitlana.kalashchenko@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-9942-7607>

Svitlana Nesterova, PhD in Biological Sciences, Associate Professor, Department of Medical and Biological Fundamentals of Physical Education and Physical Rehabilitation, Vinnytsia Mykhailo Kotsiubynskyi State Pedagogical University, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: svetanest01@gmail.com; phone: +380 (50) 937-45-71; <https://orcid.org/0000-0002-9621-0218>

Lesia Lototska, PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor, Department of Medical Informatics, Postgraduate Education Faculty, Danylo Halytsky Lviv National Medical University, Lviv, Ukraine; e-mail: lototska@gmail.com; phone: +380 (50) 952-34-88; <https://orcid.org/0000-0002-2690-1793>

Anatolii Hubar, PhD in Medicine, Lieutenant Colonel of the Medical Service, Associate Professor, Department of Organization of Medical Support for the Armed Forces, Ukrainian Military Medical Academy, Kyiv, Ukraine; e-mail: hypotolynus@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3433-4722>

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 received no external funding.

Data availability. The datasets used and/or analyzed in the current study are openly available from the corresponding author upon reasonable request.

Authors' contribution. V.V. Chorna — concept and design of the study, data collection and analysis, responsibility for statistical analysis, writing the article, critical review, final approval of the article; A.M. Hrynzovskyi — data collection and analysis, responsibility; S.I. Kalashchenko, S.Yu. Nesterova, L.B. Lototska — concept and design of the study, critical review, final approval of the article; A.M. Hubar — critical review, final approval of the article.

Чорна В.В.¹, Гринзовський А.М.², Калашченко С.І.², Нестерова С.Ю.³, Лотоцька Л.Б.⁴, Губар А.М.⁵

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

²Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, м. Київ, Україна

³Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського, м. Вінниця, Україна

⁴Львівський національний медичний університет імені Данила Галицького, м. Львів, Україна

⁵Українська військово-медична академія, м. Київ, Україна

Оцінка ефективності та ризиків застосування турнікетів у ЗСУ під час бойових дій в Україні

Резюме. Актуальність. Масивні кровотечі залишаються однією з провідних причин смертності військовослужбовців у збройних конфліктах, що зумовлює постійну потребу у вдосконаленні засобів тимчасової зупинки кровотечі. Турнікет типу САТ (combat application tourniquet) продовжує залишатися стандартом тактичної медицини завдяки доведеним клінічній ефективності, високій швидкості накладання та надійності в умовах бойових дій. Його використання суттєво знижує летальність при травмах із критичними кровотечами з кінцівок, особливо на догоспітальному етапі надання медичної допомоги. **Мета:** проаналізувати вплив застосування турнікетів (джгутів) військовослужбовцями у випадках масивної/критичної кровотечі, травматичних ампутацій кінцівок, а також оцінити своєчасність проведення конверсії у світі та Україні. **Матеріали та методи.** Роботу виконано шляхом систематичного огляду, метааналізу, контент-аналізу статей у наукометричних базах Scopus, PubMed, ResearchGate. Пошук літератури здійснювався з використанням ключових слів «tourniquet», «stop the bleeding». У дослідження були включені описи клінічних випадків накладання турнікетів (джгутів) військовослужбовцями ЗСУ, ретроспективні аналізи та огляди літератури. Після проведення огляду статей та ознайомлення з їх повними текстами

відібрано 8 джерел. Пошук даних виконано за період 2012–2025 рр. Дослідження проводили на базі одного хірургічного госпітала (Role 2) у квітні — травні 2024 року та квітні — травні 2025 року. Проаналізовано застосування засобів тимчасової зупинки критичних кровотеч, їх доцільність, тривалість та ризики ускладнень у 135 військовослужбовців, які перебували в зоні бойових дій. **Результати та висновки.** Тривалість накладання засобів гемостазу в більшості випадків (60,0 % у 2025 р., зростання на 10 % порівняно з 2024 р.) перевищує 2 години, а застосування турнікетів понад 3 години (збільшення частоти на 5,0 % у 2025 р. проти 2024 р.) свідчить про тривалу евакуацію поранених унаслідок інтенсивних бойових дій, що, у свою чергу, підвищує ризик ішемічних ускладнень та вимагає ретельного клінічного моніторингу. У 70,0 % випадків для зупинки кровотечі достатньо одного турнікета, тоді як у 30,0 % виникає потреба у застосуванні двох і більше, що свідчить про тяжкий характер поранень, зумовлений модернізацією та підвищеною вражаючою здатністю сучасного озброєння. Ішемічні ускладнення фіксуються майже в половині випадків, головною причиною є тривале накладання турнікета.

Ключові слова: турнікет (джгут); масивна/критична кровотеча; ішемічні ускладнення; військовослужбовці ЗСУ

DOI: <https://doi.org/10.22141/1608-1706.4.26.2025.1036>

Yasser Reda Mohamed, Mohammed Kanal Asal, Ahmed Mohamed Mohasseb, Waleed Elsayd Elshabrawy, Amr Mohamed Nagy, Ayman Fathy Mounir
Faculty of Medicine, Ain Shams University, Cairo, Egypt

Do we really need cement in elderly patient? Efficacy of hydroxyapatite cementless femoral stem in primary hip arthroplasty in elderly patients

Abstract. Background. Bone cement implantation syndrome remains a serious complication in elderly patients undergoing cemented total hip arthroplasty. Cementless femoral stems with hydroxyapatite (HA) coating have been proposed as a viable alternative, offering potential improvements in osteointegration and reduction in bone cement implantation syndrome incidence. This study aimed to evaluate the efficacy and stability of HA-coated cementless femoral stems in elderly patients undergoing primary hip arthroplasty. **Materials and methods.** A prospective case series was conducted on 34 patients aged ≥ 65 years who underwent cementless hip arthroplasty between November 2021 and February 2022. Of these, 30 completed follow-up and were included in the final analysis. Radiographic stem subsidence was measured using Engh and Massin's method at 6 months, 1, and 2 years. Functional outcomes were assessed via the Harris Hip Score (HHS), Hip Disability and Osteoarthritis Outcome Score (HOOS), and Visual Analog Scale (VAS). Subgroup analyses explored associations with anti-osteoporotic therapy and smoking status. **Results.** Mean stem subsidence progressively increased over time, reaching 1.92 ± 0.34 mm at 2 years ($p < 0.001$). Functional outcomes significantly improved across all time points: HHS increased from 54.7 to 87.3 ($p < 0.001$), HOOS from 48.1 to 85.9 ($p < 0.001$), and VAS decreased from 7.2 to 2.1 ($p < 0.001$). Patients receiving anti-osteoporotic therapy had significantly lower subsidence ($p < 0.001$), while smokers demonstrated higher subsidence at all intervals ($p = 0.007$). **Conclusions.** HA-coated cementless femoral stems are a reliable option in elderly patients, demonstrating low subsidence, favorable functional recovery, and minimal complications. Anti-osteoporotic therapy may enhance implant stability, while smoking poses a significant risk to fixation integrity.

Keywords: hip arthroplasty; cementless femoral stem; hydroxyapatite coating; subsidence; elderly patients

Introduction

Total hip arthroplasty (THA) is a highly successful surgical intervention that has significantly improved mobility, pain relief, and quality of life for patients with end-stage hip pathology [1]. With advances in implant technology and surgical technique, THA has achieved impressive long-term survival rates, particularly in younger populations. However, its growing use among elderly patients introduces unique challenges related to bone quality, comorbidities, and perioperative risk [1, 2].

In this demographic, the use of cemented femoral stems has traditionally been favored for achieving immediate fixation. However, this approach carries the risk of bone cement implantation syndrome (BCIS), a potentially fatal compli-

cation characterized by hypoxia, hypotension, and cardiac instability [3, 4]. Reported incidence rates of BCIS vary from 0.8 to 9 % in cemented hip arthroplasty, particularly in frail, elderly individuals. As a result, attention has shifted toward cementless stem designs that avoid cement use while still offering durable fixation [5, 6].

Hydroxyapatite (HA)-coated cementless femoral stems are designed to promote early osteointegration and long-term biological fixation. Their application in elderly patients remains debated due to concerns regarding poor bone stock and potential for early stem migration or periprosthetic fracture. Nonetheless, recent improvements in implant design, tapered geometry, and HA surface coating have shown promise in achieving stable fixation, even in

osteoporotic bone, while mitigating risks associated with cement use [7, 8].

The purpose of this study was to evaluate the clinical efficacy and radiographic stability of hydroxyapatite-coated cementless femoral stems in elderly patients undergoing primary THA, with specific attention to stem subsidence, functional outcomes, and the influence of anti-osteoporotic therapy and smoking.

Materials and methods

Study design and setting

This single-center, prospective case series was conducted at Ain Shams University, Faculty of Medicine, involving elderly patients who underwent primary hip arthroplasty using HA-coated cementless femoral stems. The study was carried out over a four-month period, from November 2021 to February 2022. Ethical approval was obtained from the Institutional Review Board (IRB) prior to study initiation. Written informed consent was obtained from all participants before enrollment.

Eligibility criteria

Patients aged 65 years and older of both sexes were eligible if they required primary hip arthroplasty for indications including femoral neck fractures, intertrochanteric fractures, or osteoarthritis. Exclusion criteria included patients with chronic kidney disease, prior pelvic bone irradiation, or a history of revision hip arthroplasty. Only HA-coated cementless femoral stems were utilized in all cases.

Surgical technique and implantation

All procedures were performed under spinal or general anesthesia, with the posterolateral approach being the standard surgical technique. Intraoperative implant selection

and positioning were guided by preoperative templating and intraoperative assessment. Calcar fractures, when encountered, were managed using cerclage cables to preserve implant stability.

Radiographic assessment of subsidence

Femoral stem subsidence was evaluated using the method described by Engh and Massin. Measurements were taken immediately postoperatively and repeated at the one-year mark, recording the distance between the tip of the greater trochanter and the shoulder of the femoral stem.

Functional outcome evaluation

Patient functional outcomes were assessed using the Harris Hip Score (HHS) [9], Hip Disability and Osteoarthritis Outcome Score (HOOS) [10], and the Visual Analog Scale (VAS) [11] for pain. These scores were recorded at 6 months, 1 year, and 2 years postoperatively. Functional recovery trends were evaluated longitudinally across these time points.

Subgroup analyses

Subgroup analyses were conducted to evaluate the effect of anti-osteoporotic therapy (including bisphosphonates, denosumab, or teriparatide) and smoking status on stem subsidence and functional outcomes. Patients were stratified based on treatment status and smoking history, and outcomes were compared accordingly.

Statistical methods

All data were analyzed using SPSS software version 28 (IBM Corp., Armonk, NY). Quantitative variables were

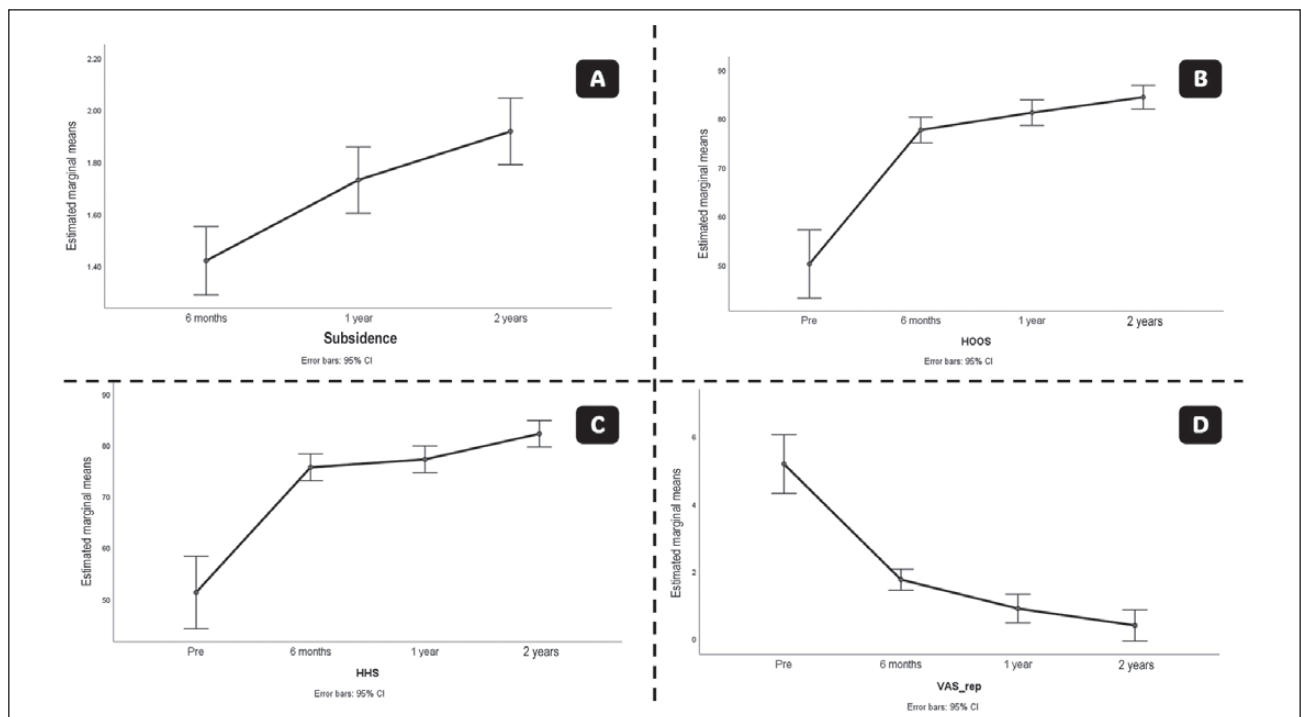


Figure 1. Estimated marginal means of: A) femoral stem subsidence, B) HOOS, C) HHS, and D) VAS pain scores at different follow-up intervals

assessed for normality using the Shapiro-Wilk test and visual inspection. Normally distributed data were reported as means $\pm$ standard deviations and compared using repeated-measures ANOVA and mixed-design ANOVA where appropriate. Non-normally distributed data were summarized as medians with ranges. Categorical data were presented as frequencies and percentages and compared using chi-square or Fisher's exact test. A p-value of < 0.05 was considered statistically significant.

Results

Out of the collectivity of 34 patients primarily enrolled in the study, 4 were subsequently excluded from the final analysis. The exclusion comprised 2 patients who required conversion to cemented stems due to inadequate fixation, 1 patient who needed revision surgery for dislocation, and 1 patient who developed periprosthetic infection necessitating implant removal. The final cohort comprised 30 patients with a mean age of 74.00 ± 7.36 years (20 females, 14 males). 14 of them were diagnosed with osteoporosis, with 13 of them receiving anti-osteoporotic treatment (bisphosphonates, denosumab, or teriparatide). Moreover, 50 % of the study population were active smokers.

Osteoarthritis was the predominant indicator that was determinant of surgical intervention, followed by peri-trochanteric femoral fractures. One patient underwent conver-

sion from a failed dynamic hip screw (DHS) to a cementless long-stem arthroplasty. Periprosthetic fractures in the calcar region occurred in 2 patients (5.88 %), which were managed using cables to maintain implant stability.

During the 2-year follow-up period, one patient reported thigh pain, despite no radiographic indications of implant loosening.

Statistics done using repeated-measures ANOVA demonstrated progressive increase in subsidence ($p < 0.001$), HOOS ($p < 0.001$), HHS ($p < 0.001$), and VAS scores ($p < 0.001$) (Fig. 1).

Mixed-design ANOVA demonstrated a significant main effect of time on subsidence ($p < 0.001$). However, patients receiving anti-osteoporotic treatment exhibited lower subsidence rates ($p < 0.001$), although no significant interaction effect was observed ($p = 0.088$). Similarly, analyses for HOOS, HHS, and VAS scores demonstrated marked improvement over time ($p < 0.001$), but no significant primary effect was observed for anti-osteoporotic treatment (Fig. 2).

There was no significant variation in subsidence among Dorr index groups (A, B, C) at any evaluation time point. However, smokers exhibited significantly higher subsidence than non-smokers at all intervals ($p = 0.007$). No notable correlations were identified between Dorr index classifications and medical complications such as "spot weld" or "stress shielding".

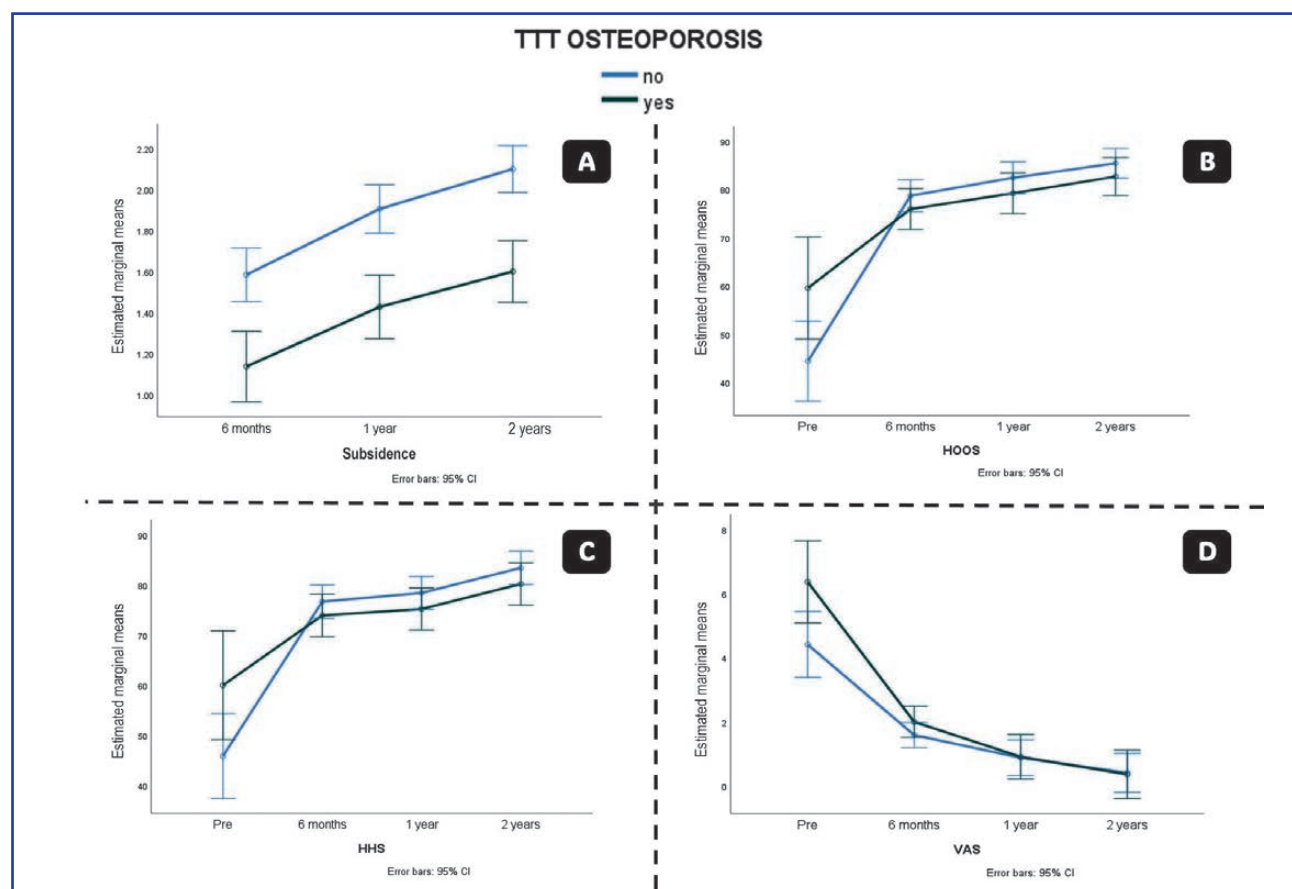


Figure 2. Estimated marginal means comparing patients with and without anti-osteoporotic treatment across: A) femoral stem subsidence, B) HOOS, C) HHS, and D) VAS pain scores over time

Discussion

THA remains one of the most successful orthopedic interventions, particularly in the elderly population. However, the use of cemented stems carries risks such as BCIS, prompting increasing interest in cementless solutions [12]. HA-coated cementless stems have been developed to promote biological fixation and reduce complications, but concerns persist regarding early stem migration and its effect on long-term outcomes [13]. To contextualize our findings, we compare our results with established literature addressing stem subsidence, functional outcomes, and the influence of bone quality and anti-osteoporotic therapy.

Our study demonstrated a progressive increase in stem subsidence, with a final mean of 1.92 ± 0.34 mm at two years. Functional outcomes improved significantly, with HHS rising from 54.7 to 87.3, HOOS from 48.1 to 85.9, and VAS scores decreasing from 7.2 to 2.1. Subsidence did not vary significantly among Dorr index groups, but was notably lower in patients receiving anti-osteoporotic medications and significantly higher in smokers. Despite reduced migration with bone therapy, no differences in functional scores were observed between treated and untreated groups.

Regarding stem subsidence, supporting our findings, Kabelitz et al. [14] reported a higher mean subsidence of 3.9 ± 2.0 mm using HA-coated cementless stems, while Al-Najjim et al. [15] found an average of 2.9 ± 2.7 mm over two years. Both studies indicate that subsidence is a common phenomenon with cementless stems but suggest that values under 3 mm are generally well tolerated. Our results fall well below these reported values, suggesting improved control of early migration.

Regarding femoral morphology (Dorr classification), in contrast to our results, Song et al. [16] found that patients with Dorr type C femora had significantly greater stem subsidence (mean 3.6 ± 1.4 mm), suggesting that wide canals may reduce initial stability. However, we observed no statistically significant differences among Dorr types A, B, or C, indicating that, with appropriate technique and sizing, HA-coated stems can achieve stable fixation regardless of proximal femoral geometry.

Regarding functional outcomes, consistent with our data, functional outcomes improved progressively over time. Gema et al. [17], however, reported that patients with stem migration exceeding 3 mm showed lower HHS values, typically falling below 70, suggesting a decline in performance with excessive subsidence. Likewise, Al-Najjim et al. [15] and Song et al. [16] observed deterioration in hip function when subsidence surpassed 3 mm. Our lower subsidence levels may explain why such declines were not observed in our cohort.

Regarding anti-osteoporotic therapy, in line with our findings, Huang et al. [18] demonstrated that patients receiving teriparatide had significantly reduced stem migration compared to untreated controls (mean subsidence 1.2 vs. 2.3 mm). However, similar to our results, Huang found no significant improvements in HHS or VAS scores between groups. These findings suggest that anti-osteoporotic agents may enhance mechanical stability without directly influencing subjective functional recovery.

Regarding smoking and stem stability, although not quantified in previous cited studies, smoking is a known risk factor for impaired bone healing and osseointegration. Our study demonstrated that smokers had significantly higher subsidence across all time intervals, reinforcing the need to consider smoking cessation as part of preoperative optimization in elderly patients undergoing cementless THA.

Regarding periprosthetic complications, periprosthetic calcar fractures occurred in two patients in our series and were managed successfully with cerclage cables. This rate is consistent with that reported by Song et al. [16], who noted a 7% incidence of calcar fractures, primarily in Dorr type C cases. Importantly, these fractures in our cohort did not lead to adverse outcomes or increased stem migration, suggesting that intraoperative complications can be effectively mitigated with prompt stabilization.

Limitations. This study has several limitations. First, its single-center design and relatively small sample size may limit the generalizability of the findings. Second, the absence of a control group using cemented stems prevents direct comparison of outcomes between fixation methods. Third, the inclusion of patients with varied preoperative diagnoses (e.g., osteoarthritis, femoral neck fractures) may have introduced heterogeneity in baseline functional status. Lastly, although subsidence was radiographically measured and functional scores were assessed, bone mineral density was not quantitatively evaluated, and longer-term follow-up is required to assess implant survival beyond two years.

Conclusions

HA-coated cementless femoral stems are a reliable option in elderly patients, demonstrating low subsidence, favorable functional recovery, and minimal complications. Anti-osteoporotic therapy may enhance implant stability, while smoking poses a significant risk to fixation integrity.

References

1. Garofalo S, Morano C, Bruno L, Pagnotta L. A comprehensive literature review for total hip arthroplasty (THA): Part 2 — material selection criteria and methods. *J Funct Biomater*. 2025;16(5):184.
2. Choudhary A, Pisulkar G, Taywade S, Awasthi AA, Salwan A. A comprehensive review of total hip arthroplasty outcomes in post-traumatic hip arthritis: Insights and perspectives. *Cureus*. 2024;16(3):e56350. doi: 10.7759/cureus.56350.
3. Satalich JR, Lombardo DJ, Newman S, Golladay GJ, Patel NK. Cementation in total hip arthroplasty: History, principles, and technique. *EFORT Open Rev*. 2022;7(11):747-757. doi: 10.1530/eor-22-0002.
4. Barakat N, Browne JA. Is bone cement implantation syndrome actually caused by cement? A systematic review of the literature using the Bradford-Hill criteria. *J Arthroplasty*. 2025;40(8s1):S353-S359. doi: 10.1016/j.arth.2025.01.039.
5. Chulsomlee K, Prukviwat S, Tuntiyatorn P, Vasaruchapong S, Kulachote N, Sirisreetreerux N, et al. Correlation between shape-closed femoral stem design and bone cement implantation syndrome in osteoporotic elderly femoral neck fracture undergoing cemented hip arthroplasty: A retrospective

case-control study in 128 patients. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2023;109(1):103450. doi: 10.1016/j.otsr.2022.103450.

6. Yuenyongviwat V, Janejaturanon J, Hongnaparak T, Iamthanaporn K. Comparative assessment of bone cement implantation syndrome in cemented bipolar hemiarthroplasty: Impact in patients with and without preexisting heart disease. *Orthop Rev (Pavia).* 2024;16:122320. doi: 10.52965/001c.122320.

7. Hashimoto A, Sonohata M, Kii S, Kawano S, Mawatari M. Hydroxyapatite-coated cementless total hip arthroplasty for patients undergoing dialysis: A study of 30 hips with a minimum follow-up period of 5 years. *BMC Musculoskelet Disord.* 2021;22(1):842. doi: 10.1186/s12891-021-04718-3.

8. Rivera F, Leonardi F, Maniscalco P, Caforio M, Capelli R, Molinari G, et al. Uncemented fully hydroxyapatite-coated hip stem for intracapsular femoral neck fractures in osteoporotic elderly patients: A multicenter study. *Arthroplast Today.* 2015;1(3):81-84. doi: 10.1016/j.artd.2015.02.002.

9. Kumar P, Sen R, Aggarwal S, Agarwal S, Rajnish RK. Reliability of Modified Harris Hip Score as a tool for outcome evaluation of total hip replacements in Indian population. *J Clin Orthop Trauma.* 2019;10(1):128-130. doi: 10.1016/j.jcot.2017.11.019.

10. Nilsson AK, Lohmander LS, Klässbo M, Roos EM. Hip disability and osteoarthritis outcome score (HOOS) — validity and responsiveness in total hip replacement. *BMC Musculoskelet Disord.* 2003;4:10. doi: 10.1186/1471-2474-4-10.

11. Sung YT, Wu JS. The visual analogue scale for rating, ranking and paired-comparison (VAS-RRP): A new technique for psychological measurement. *Behav Res Methods.* 2018;50(4):1694-1715. doi: 10.3758/s13428-018-1041-8.

12. Gkagkalis G, Goetti P, Mai S, Meinecke I, Helmy N, Bosson D, et al. Cementless short-stem total hip arthroplasty in the elderly patient — is it a safe option? A prospective multi-

centre observational study. *BMC Geriatr.* 2019;19(1):112. doi: 10.1186/s12877-019-1123-1.

13. Bidar R, Kouyoumdjian P, Munini E, Asencio G. Long-term results of the ABG-1 hydroxyapatite coated total hip arthroplasty: Analysis of 111 cases with a minimum follow-up of 10 years. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2009;95(8):579-587. doi: 10.1016/j.otsr.2009.10.001.

14. Kabelitz M, Fritz Y, Grueninger P, Meier C, Fries P, Dietrich M. Cementless stem for femoral neck fractures in a patient's 10th decade of life: High rate of periprosthetic fractures. *Geriatr Orthop Surg Rehabil.* 2018;9:2151459318765381. doi: 10.1177/2151459318765381.

15. Al-Najjim M, Khattak U, Sim J, Chambers I. Differences in subsidence rate between alternative designs of a commonly used uncemented femoral stem. *J Orthop.* 2016;13(4):322-326. doi: 10.1016/j.jor.2016.06.026.

16. Song JH, Jo WL, Lee KH, Cho YJ, Park J, Oh S. Subsidence and perioperative periprosthetic fractures using collarless hydroxyapatite-coated stem for displaced femoral neck fractures according to Dorr type. *J Orthop Surg (Hong Kong).* 2019;27(3):2309499019877530. doi: 10.1177/2309499019877530.

17. Gema A, Irianto KA, Setiawati R. Femoral stem subsidence and its associated factors after cementless bipolar hemiarthroplasty in geriatric patients. *Malays Orthop J.* 2021;15(1):63-71. doi: 10.5704/moj.2103.010.

18. Huang TW, Huang KC, Lin SJ, Chuang PY, Shih HN, et al. Effects of teriparatide on cementless bipolar hemiarthroplasty in patients with osteoporotic femoral neck fractures. *BMC Musculoskelet Disord.* 2016;17:300. doi: 10.1186/s12891-016-1149-x.

Received 10.06.2025

Revised 25.07.2025

Accepted 21.08.2025

Information about authors

Yasser Reda Mohamed, Orthopedic Surgery Department, Faculty of Medicine, Ain Shams University, Cairo, Egypt
 Mohammed Kanal Asal, Orthopedic Surgery Department, Faculty of Medicine, Ain Shams University, Cairo, Egypt
 Ahmed Mohamed Mohasseb, Orthopedic Surgery Department, Faculty of Medicine, Ain Shams University, Cairo, Egypt
 Waleed Elsayd Elshabrawy, Orthopedic Surgery Department, Faculty of Medicine, Ain Shams University, Cairo, Egypt
 Amr Mohamed Nagy, Orthopedic Surgery Department, Faculty of Medicine, Ain Shams University, Cairo, Egypt
 Ayman Fathy Mounir, Orthopedic Surgery Department, Faculty of Medicine, Ain Shams University, Cairo, Egypt

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

Yasser Reda Mohamed, Mohammed Kanal Asal, Ahmed Mohamed Mohasseb,
 Waleed Elsayd Elshabrawy, Amr Mohamed Nagy, Ayman Fathy Mounir
 Faculty of Medicine, Ain Shams University, Cairo, Egypt

Чи потрібно використовувати цемент у пацієнтів похилого віку? Ефективність безцементної ніжки з гідроксиапатитовим покриттям у первинному ендопротезуванні кульшового суглоба в літніх осіб

Резюме. Актуальність. Синдром імплантації кісткового цементу залишається серйозним ускладненням у пацієнтів похилого віку, які перенесли тотальне ендопротезування кульшового суглоба з цементною фіксацією. Безцементні ніжки з гідроксиапатитовим (ГА) покриттям були запропоновані як життєздатна альтернатива, що може поліпшити остеоінтеграцію та знизити частоту синдрому імплантації кісткового цементу.

Мета: оцінити ефективність та стабільність безцементних ніжок з ГА-покриттям у літніх осіб при первинному ендопротезуванні кульшового суглоба. **Матеріали та методи.** Було проведено проспективне когортне дослідження за участю 34 пацієнтів віком ≥ 65 років, яким у період з листопада 2021 року по лютий 2022 року виконано безцементне ендопротезування кульшового суглоба. Із них 30 осіб завершили спостереження

та були включені у фінальний аналіз. Рентгенологічне осідання стегнової ніжки оцінювали за методом Engh і Massin через 6 місяців, 1 та 2 роки. Функціональні результати визначали за наступними шкалами: Harris Hip Score (HHS), Hip Disability and Osteoarthritis Outcome Score (HOOS) і візуальною аналоговою шкалою (VAS). У підгруповому аналізі досліджували зв'язок між антиостеопоротичною терапією та курінням. **Результати.** Середнє осідання ніжки збільшувалося з часом і становило $1,92 \pm 0,34$ мм через 2 роки ($p < 0,001$). Функціональні результати суттєво поліпшилися в усіх часових точках: показники HHS збільшилися з 54,7 до 87,3 ($p < 0,001$), HOOS — з 48,1 до 85,9 ($p < 0,001$), а VAS — знизилася з 7,2 до 2,1 ($p < 0,001$).

У пацієнтів, які отримували антиостеопоротичну терапію, спостерігалася вірогідно менше осідання ніжки ($p < 0,001$), тоді як у курців — більше на всіх етапах ($p = 0,007$). **Висновки.** Безцементні стегнові ніжки з ГА-покриттям є надійним варіантом в осіб похилого віку, демонструючи низьке осідання імплантата, сприятливе функціональне відновлення та мінімальні ускладнення. Антиостеопоротична терапія може поліпшити стабільність імплантата, тоді як куріння становить значний ризик для цілісності фіксації.

Ключові слова: ендопротезування кульшового суглоба; безцементна ніжка; гідроксиапатитове покриття; осідання; літні пацієнти

O.A. Burianov¹, O.O. Smyk²¹Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine²Military Medical Clinical Treatment and Rehabilitation Center, Irpin, Ukraine

Use of tibialis anterior muscle VDMT flip flap in transtibial amputation to prevent superficial peroneal nerve neuroma formation: a surgical technique description

Abstract. Background. The formation of symptomatic stump neuromas is one of the most common complications after amputation. Symptomatic neuromas cause pain, which, in turn, reduces the quality of life and makes prosthesis use complicated or even impossible. Neuroma development is a result of disorganized axonal growth due to the lack of a target for reinnervation. After transtibial amputation, neuromas most often growth from the superficial peroneal nerve (SPN), due to its anatomical location and function. The purpose was to substantiate and describe the novel surgical technique for prevention of SPN neuroma formation by creation a physiological target for reinnervation in the form of a vascularized denervated muscle target (VDMT) derived from the anterior tibial muscle during transtibial amputation. **Materials and methods.** The technique involves isolation of a vascularized denervated segment from the tibialis anterior muscle, taken from below the level of the planned transtibial amputation, further mobilization of the flap on the anterior tibial vessels, followed by proximal rotation and wrapping of transected SPN. **Results.** This technique creates a target for organized axonal regeneration of SPN and prevents symptomatic neuromas development. Our own clinical experience with this technique indicates a slight increase in the duration of the surgical intervention and the absence of specific complications. The proposed method allows for targeted prevention of the formation of symptomatic neuromas during transtibial amputation, especially for high-risk nerves, such as the SPN. **Conclusions.** The tibialis anterior VDMT flip flap technique during transtibial amputation is a promising method for preventing symptomatic superficial peroneal neuromas. If necessary, this method can be applied to other or multiple nerves. Further clinical studies are needed to evaluate long-term results.

Keywords: vascularized denervated muscle target; symptomatic neuroma; transtibial amputation; peripheral nerve surgery; limb trauma

Introduction

According to the data published in The Wall Street Journal (2024), 20,000–50,000 of Ukrainians have lost their limbs as a result of war-related trauma. Taking into account lack of official reports and time delays in recording clinical cases, the actual number of amputations is likely to be higher [1–3].

Recent systematic reviews and clinical studies indicate, that one of the main causes of residual limb pain (RLP) and phantom limb pain (PLP) in patients after amputation is

the formation of symptomatic neuromas. The affected peripheral nerve after amputation begins to regenerate chaotically, forming disorganized neural tissue without interaction with effector structures. This process leads to the emergence of spontaneous ectopic neuronal activity, which is the basis for chronic neuropathic pain development. According to meta-analyses, symptomatic neuromas may be present in 15–30 % of patients after lower limb amputation (LLA). In particular, according to the study of Örüçü Atar et al. (2022), in patients with RLP, neuroma is detected in almost 47 % of

cases in both upper and LLA, which confirms its significant role in the pathogenesis of residual pain [4, 5, 10].

PLP, although it has a complex mechanism of formation, is also often associated with the presence of symptomatic neuroma. Ectopic activity from the neuroma can trigger pathological activation of the somatosensory cortex and other CNS structures, leading to the phantom perception of pain in a limb that no longer physically exists [11].

In accordance with the meta-analysis performed by Huang et al. (2022), the prevalence of symptomatic neuromas after LLA is about 19 %, and during 3 years follow-up period it increases up to 30 % [9]. Similar results were obtained by List et al. (2021), who found symptomatic neuromas in 15 % of patients after LLA, and RLP in more than 59 % [5].

The available scientific data indicates that the most often involved nerve in symptomatic neuromas formation is SPN after below-the-knee amputation. In a study of Chang et al. (2022), which included 198 patients with below-the-knee amputation, symptomatic neuromas were found in 14.6 % of patients, of which 89.7 % were associated with SPN. These data confirm the predominant involvement of SPN in the pathogenesis of post-amputation neuropathic pain [12].

Similar results are demonstrated by the study of Nigam et al. (2019), where the SPN was also identified as the main source of painful neuromas in patients with lower leg amputation. The authors indicate that 76 % of all reported symptomatic neuromas were associated with this nerve, which significantly exceeds the incidence of neuromas due to damage of other nerve structures: sural (59 %), saphenous (48 %), deep peroneal (41 %) [13].

The superficial anatomical location of the SPN, minimal muscle protection, and sensory function results in a high incidence of symptomatic neuromas formation in the postoperative period. The use of a prosthesis often serves as a mechanical irritant that provokes symptoms of neuroma, which clinically manifests as localized neuropathic pain, allodynia, dysesthesia, or even phantom pain.

The above statistics demonstrate not only the high prevalence but also the clinical significance of symptomatic neuromas, especially in cases where the intensity of pain disrupts sleep, functioning with a prosthesis, and the capacity for self-care. Given that conservative therapy in most cases does not provide a high-quality and sustainable effect, surgical strategies should be considered as important tools in the management of this complex pathology.

The results of scientific research indicate that reinnervation methods can be effectively used to prevent late post-amputation complications, such as symptomatic neuromas, PLP, and RLP [4].

Surgical technique

General or regional anesthesia is used. The patient is placed in a supine position on the operating table. A tourniquet is applied to the mid-thigh during the procedure. Amputation is performed at the level of the middle third of the lower leg. To design skin flaps, marks are made on skin using a medical marker. The skin, subcutaneous fat, and fascia are incised with mobilizing soft tissue flaps for further stump formation. The SPN is identified. The muscles of the anterior compartment are separated from the lateral surface of the tibia, exposing the neurovascular bundle — the anterior tibial artery, accompanying veins, and the deep peroneal nerve, which runs laterally within the bundle. The branches of the anterior tibial vessels supplying the tibia are identified and ligated or coagulated. The distal segment of the lower leg is incised longitudinally for easier handling. Tendons of the anterior compartment muscles are transected (Fig. 1). The anterior tibial vessels are ligated 8–10 cm distal to the site of the planned osteotomy. The deep peroneal nerve at this level may be transected or ligated together with the vessels. Anterior compartment muscles are separated from the interosseous membrane, fibula, and intermuscular septum with coagulation or ligation of small vessels. Segmental vascular branches from the anterior tibial vessels to the tibialis anterior muscle are identified. Depending on anatomical



Figure 1. Mobilized muscle flap from the tibialis anterior muscle

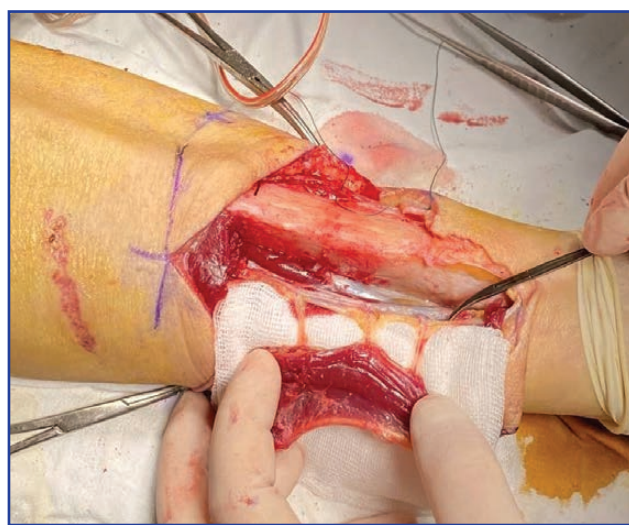


Figure 2. Segmental vessels of the flap from the anterior tibial vessels

variability and required flap size, 1–3 segmental vascular bundles may be included in the flap (Fig. 2). After identifying these segmental vessels, the tibialis anterior muscle is transversely transected above the level of the vessels. Ideally, the flap should measure approximately 35 mm in length, 20 mm in width, and 5 mm in thickness. It is recommended to initially mobilize a flap larger than required for VDMT. Segmental vessels supplying other anterior compartment muscles are ligated or coagulated. Proximally, the deep peroneal nerve is identified in the neurovascular bundle (Fig. 3), and a 1–2 cm nerve segment is resected at this level

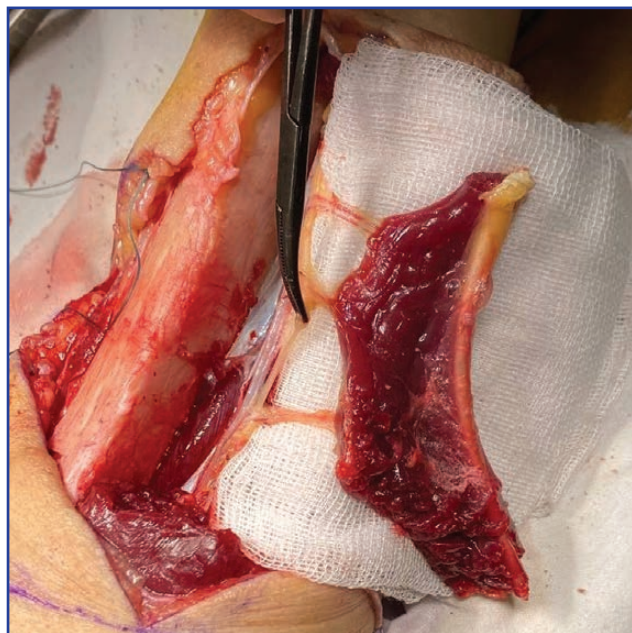


Figure 3. Identification of the deep peroneal nerve

or the distal part of the nerve is removed (Fig. 4). Removing the distal segment of the nerve is not advisable. The muscle flap on its vascular pedicle is brought outside the operative field and placed on a moist gauze. The tourniquet is removed, and flap perfusion and pulsation of the anterior tibial artery are assessed (Fig. 5). The flap is wrapped in a moist gauze while the distal segment of the lower leg is amputated. The SPN is transected 1–2 cm proximal to the tibial cut. The tendon portion is removed from the muscle flap, and the flap is reduced to the required size (Fig. 6). When reducing the flap, preference is given to the best-per-

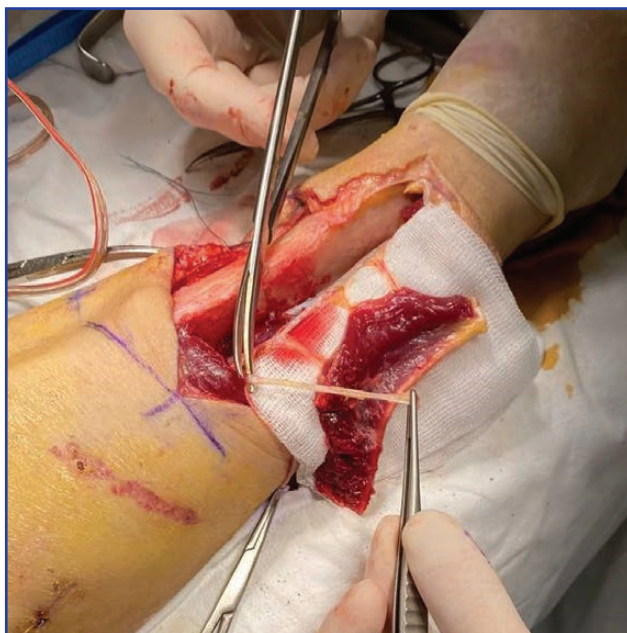


Figure 4. Resection of the distal part of the deep peroneal nerve – complete denervation of the flap

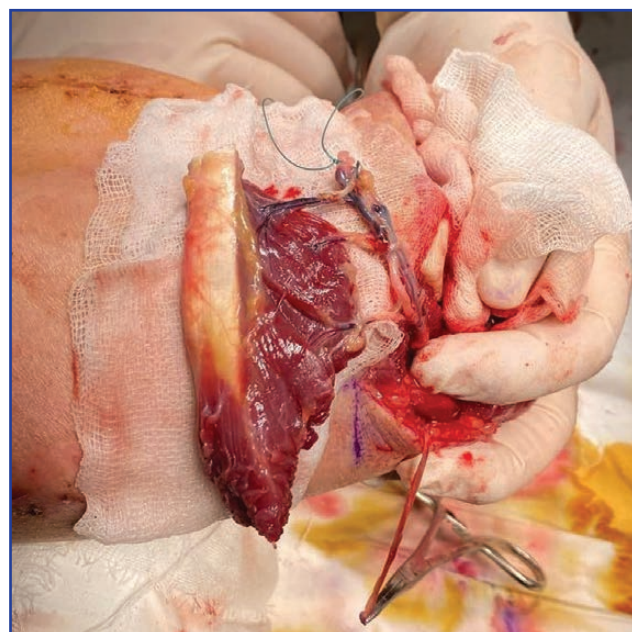


Figure 5. Restoration of blood supply to the flap

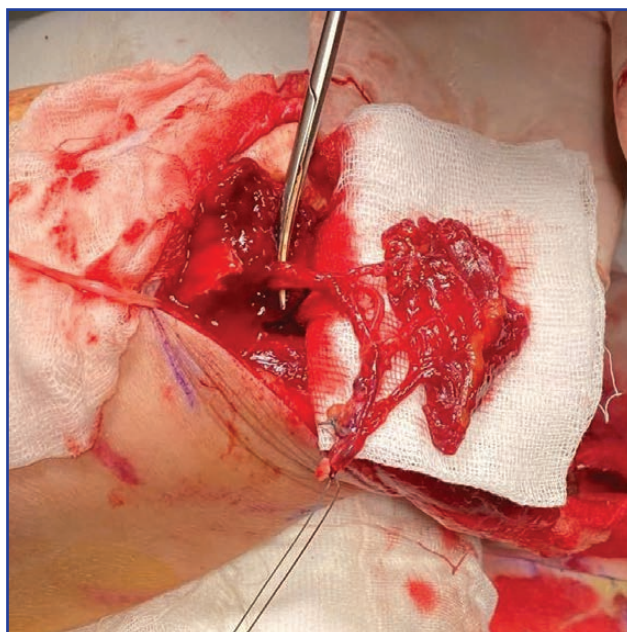


Figure 6. Flap after removal of the tendon part and reduction. On the left in the photo is the SPN

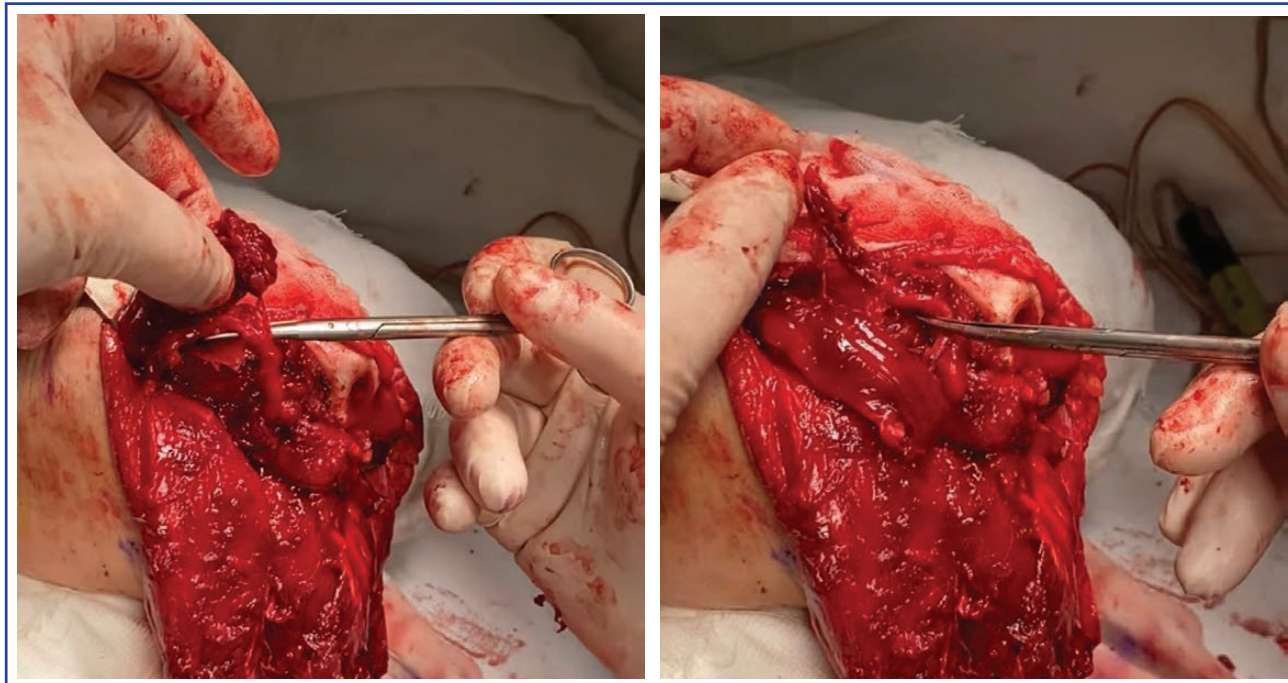


Figure 7. High mobility of VDMT with vessels

fused area (actively bleeding, bright red). The flap is rotated proximally toward the end of the transected SPN, avoiding kinking of the vascular pedicle. The nerve end is fixed in the flap using two epineural stitches with non-absorbable monofilament 6/0 suture. The nerve should be inserted into the flap for a third or half of its length. The muscle flap is then wrapped around the nerve to secure the muscle graft in a cylindrical structure using 2 to 4 more sutures. The created muscle target is mobile (Fig. 7) and later placed deep within the stump on a non-weight-bearing surface. No additional fixation is required, as the flap is covered by other muscles during stump formation (Fig. 8). If necessary, other muscles supplied by the anterior tibial vascular system can be used, or several flaps of the same vascular system or different ones can be mobilized to manage multiple nerves.

Discussion

One of the newest surgical approaches to address the problem of symptomatic neuroma formation is VDMT. This technique, similar to targeted muscle reinnervation (TMR) and regenerative peripheral nerve interface (RPNI), aims to redirect the growing axons of a damaged nerve into a specially prepared target to prevent pathological regeneration as a neuroma. Surgery using VDMT has a number of theoretical advantages over TMR and RPNI [6].

One of the disadvantages of TMR is the frequent mismatch of nerve diameters — when a large proximal nerve anastomoses with a small motor branch, which creates a risk of axonal “escape” and neuroma formation at the site of coaptation. It became a prerequisite for certain modifications of the classical TMR technique, in particular — additional wrapping of the nerve coaptation zone with a free muscle graft.



Figure 8. The VDMT is covered with muscles

The VDMT method overcomes this problem by directly neurotizing the muscle, which completely covers the distal end of the nerve. In addition, unlike TMR, the use of VDMT does not depend on the presence of a local motor branch, which may be especially important in conditions where it is absent or damaged [7].

VDMT has much in common with RPNI, as both involve direct neurotization of a muscle target attached to the distal end of the injured nerve. However, a critical aspect of RPNI is the effect of muscle graft size on its viability.

Since the RPNI has no blood supply of its own, its viability in the initial stages is ensured only by the diffusion of nutrients from the surrounding tissues. During engraftment, the graft undergoes a certain degree of ischemia-induced fibrosis and resorption until neovascularization occurs. Grafts that are too large are at risk of central necrosis [8].

Conclusions

The VDMT method is one of the newest surgical approaches to the prevention and treatment of symptomatic neuromas after amputations. This technique is based on the concept of controlled regeneration of nerve fibers by implanting the proximal end of the damaged nerve into vascularized muscle tissue without innervation, which creates favorable conditions for neurotization without neuroma formation.

Unlike TMR and RPNI, the VDMT method has certain advantages: it does not require a recipient motor branch, has no restrictions related to the size of the graft, and can be performed for amputations at different levels.

Our own clinical experience with this technique indicates a slight increase in the duration of the surgical intervention and the absence of specific complications. The proposed method allows for targeted prevention of the symptomatic neuromas formation during transtibial amputation, especially for high-risk nerves, such as the SPN.

The proposed method of VDMT for the SPN uses the tissues of the limb to be amputated without additional trauma to the remaining tissues.

Despite positive clinical results, VDMT has a limited evidence base. Large-scale prospective studies, using standardized scales of pain, functional recovery, and quality of life, are needed to definitively confirm the effectiveness of this approach.

References

1. Sydorova NM, Kazmirchuk AP, et al. *Therapeutic consequences of limb amputation for a combatant: Justification of the PATRIOT study design and our own data. Current Aspects of Military Medicine.* 2023;30(2):162-182. doi: 10.32751/2310-4910-2023-30-2-16.
2. Yarmoshevykh OS, Nestertchuk NE, Mykhailova IO, Semenchuk OV, Dovnich YA, Serkov OY. *Modern trends in rehabilitation of patients with lower limb amputation. Art of Medicine.* 2023;3(7):275-280. doi: 10.21802/artm.2024.3.31.275.
3. Arestova LI, Manucharian SV. *Methods of physical rehabilitation after lower leg amputation. In: Abstracts of VI All-Ukrainian Youth Scientific and Practical Conference with International Participation "Young Scientist: Current Trends in the Formation and Preservation of Human Health". 2023, March 30–31.*
4. Buryanov O, Smyk O, Salenko M. *Methods of reinnervation after amputations in patients with combat injury consequences (literature review). Orthopaedics, Traumatology, and Prosthetics.* 2025;2:83-91. doi: 10.15674/0030-59872025283-91.
5. List EB, Krijgh DD, Martin E, Coert JH. *Prevalence of residual limb pain and symptomatic neuromas after lower extremity amputation: A systematic review and meta-analysis. Pain.* 2021;162(7):1906-1913. doi: 10.1097/j.pain.0000000000002202.
6. Calotta NA, Hanwright PJ, Giladi AM, Tuffaha SH. *Vascularized, denervated muscle targets for treatment of symptomatic neuromas in the upper extremity: description of operative technique. Tech Hand Up Extrem Surg.* 2022;26(3):141-145. doi: 10.1097/BTH.0000000000000374.
7. Tuffaha SH, Glass C, Rosson G, Shores J, Belzberg A, Wong A. *Vascularized, denervated muscle targets: A novel approach to treat and prevent symptomatic neuromas. Plastic and Reconstructive Surgery Global Open.* 2020;8(4):e2779. doi: 10.1097/GOX.0000000000002779.
8. Hoyt BW, Potter BK, Souza JM. *Nerve interface strategies for neuroma management and prevention: A conceptual approach guided by institutional experience. Hand Clinics.* 2021;37(3):373-382. doi: 10.1016/j.hcl.2021.05.004.
9. Huang YJ, Assi PE, Drolet BC, Al Kassis S, Bastas G, Chaker S, et al. *Incidence of symptomatic neuromata in lower-limb amputees: A systematic review and meta-analysis. Annals of Plastic Surgery.* 2022;88(5):574-580. doi: 10.1097/SAP.0000000000002946.
10. Dahlin E, Gudinge H, Dahlin LB, Nyman E. *Neuromas cause severe residual problems at long-term despite surgery. Scientific Reports.* 2023;13(1):15693. doi: 10.1038/s41598-023-42245-4.
11. Öricü Atar M, Yıldız Şimşek EE, Türker Y. *Neuroma prevalence and associated factors in traumatic lower extremity amputees. Gulhane Medical Journal.* 2022;64(1):54-60. doi: 10.4274/gulhane.galenos.2021.32932.
12. Chang BL, Rudkin B, Zingman A, Mundy LR, Eberlin KR, Ko JH. *Incidence and nerve distribution of symptomatic neuromas and phantom limb pain after below-knee amputation. Plast Reconstr Surg.* 2022;149(4):976-985. doi: 10.1097/PRS.0000000000008953. PMID: 35188944.
13. Nigam N, Christy MR, Marasco PD. *Symptomatic neuromas in lower-extremity amputees: Implications for pre-emptive diagnosis and treatment. Plastic and Reconstructive Surgery Global Open.* 2019;7(8 Suppl):121. doi: 10.1097/01.GOX.0000573277.94096.4b.

Received 06.07.2025
Revised 11.08.2025
Accepted 25.08.2025

Information about authors

Oleksandr Burianov, MD, PhD, Professor, Head of the Department of Traumatology and Orthopedics, Bogomolets National Medical University, Kyiv, Ukraine; e-mail: kafastraum@ukr.net; fax: +380 (44) 288-01-26, phone: +380 (67) 796-68-76; <https://orcid.org/0000-0002-2174-1882>

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>

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.

Бур'янов О.А.¹, Смик О.О.²

¹Національний медичний університет імені О.О. Богомольця, м. Київ, Україна

²Військово-медичний клінічний лікувально-реабілітаційний центр, м. Ірпінь, Україна

Використання клаптя переднього великогомілкового м'яза для створення ВДММ при транстибіальній ампутації для запобігання утворенню невроми поверхневого малогомілкового нерва: опис хірургічної техніки

Резюме. Актуальність. Формування симптоматичних невром кукси є одним із найпоширеніших ускладнень після ампутації. Симптоматичні невроми викликають біль, що, у свою чергу, знижує якість життя та ускладнює або навіть унеможливає використання протеза. Розвиток невроми зумовлений дезорганізованим ростом аксонів через відсутність мішені для реіннервації. Після транстибіальної ампутації невроми найчастіше утворюються з поверхневого малогомілкового нерва (ПМН) через його анатомічне розташування та функцію. **Мета:** обґрунтувати та описати нову хірургічну техніку запобігання утворенню невроми ПМН шляхом створення фізіологічної структури для реіннервації у вигляді васкуляризованої денервованої м'язової мішені (ВДММ), отриманої з переднього великогомілкового м'яза під час транстибіальної ампутації. **Матеріали та методи.** Методика включає виділення васкуляризованого денервованого сегмента переднього великогомілкового м'яза нижче рівня запланованої транстибіальної ампутації, мобілізацію клаптя на передніх великогомілкових судинах з подальшим проксимальним обертанням

та обгортанням перерізаного ПМН. **Результати.** Цей спосіб дозволяє створити мішень для організованої аксональної регенерації ПМН і запобігає розвитку симптоматичних невром. Власний клінічний досвід застосування такої техніки свідчить про незначне збільшення тривалості операції та відсутність специфічних ускладнень. Запропонований метод дозволяє цілеспрямовано запобігати утворенню симптоматичних невром під час транстибіальної ампутації, особливо це стосується нервів «високого ризику», як-от ПМН. **Висновки.** Методика flip flap при створенні ВДММ, отриманої з переднього великогомілкового м'яза під час транстибіальної ампутації, є перспективним методом запобігання симптоматичним невромам ПМН. За потреби цей метод може бути застосований до інших нервів або декількох нервів одночасно. Для оцінки довгострокових результатів необхідні подальші клінічні дослідження.

Ключові слова: васкуляризована денервована м'язова мішень; симптоматична неврома; транстибіальна ампутація; хірургія периферичних нервів; травма кінцівки

Штробля В.В.

ДВНЗ «Ужгородський національний університет», м. Ужгород, Україна

Потенціювальний вплив транскутанного введення вуглекислого газу на протизапальний ефект диклофенаку натрію та хондроїтину сульфату в експериментальній моделі остеоартриту

Резюме. Актуальність. Остеоартрит є хронічним дегенеративно-запальним захворюванням суглобів, яке згідно з сучасними уявленнями може супроводжуватися активацією низькорівневого запалення за участю прозапальних цитокінів, зокрема інтерлейкіну-6 (IL-6). У цьому контексті зростає інтерес до ад'ювантних терапевтичних стратегій, зокрема до застосування транскутанного вуглекислого газу (карбокситерапії) як потенційного модулятора запальної відповіді, з одночасним зниженням фармакологічного навантаження.

Мета: оцінити вплив транскутанного вуглекислого газу в комбінації з диклофенаком натрію або хондроїтину сульфатом на рівень IL-6 у моделі остеоартриту, індукованого моноіодоцтовою кислотою. **Матеріали та методи.** В експерименті використано 80 статевозрілих білих безпородних щурів-самців, у яких моделювали остеоартрит внутрішньосуглобовим введенням моноіодоцтової кислоти. Тварини отримували диклофенак (8 або 4 мг/кг), хондроїтину сульфат (3 мг/кг), CO₂ (0,5 мл підшкірно) або їх комбінації. Концентрацію IL-6 у сироватці визначали на 14-й і 28-й день за допомогою ELISA. Статистичний аналіз проведено з використанням однофакторного дисперсійного аналізу з *post-hoc* тестом Тьюкі. **Результати.** Комбінація CO₂ із половинною дозою диклофенаку знизила рівень IL-6 на 6,77 пг/мл (46,4 %; $p < 0,001$) на 14-й день і на 8,22 пг/мл (57,5 %; $p < 0,001$) на 28-й день, що вірогідно перевищувало ефект повної дози диклофенаку ($p < 0,001$). Подібна тенденція, хоча й менш виражена, спостерігалася для комбінації хондроїтину з CO₂. Монотерапія CO₂ була порівнянною за ефектом із хондроїтину сульфатом ($p = 0,479$). **Висновки.** Транскутанний вуглекислий газ потенційно посилює протизапальний ефект диклофенаку та хондроїтину сульфату, сприяючи зниженню рівня IL-6 у динаміці. Такий підхід може бути корисним для зменшення дози НПЗП у лікуванні остеоартриту.

Ключові слова: остеоартрит; інтерлейкін-6; диклофенак натрію; хондроїтину сульфат; вуглекислий газ; транскутанна терапія; експериментальна модель; запалення

Вступ

Остеоартрит (ОА) є одним із найпоширеніших дегенеративних захворювань суглобів, яке характеризується прогресуючим руйнуванням суглобового хряща, ремоделюванням субхондральної кістки, формуванням остеофітів та розвитком хронічного болю [1]. Цей стан суттєво знижує якість життя пацієнтів, обмежує рухливість і є провідною причиною інвалідності серед осіб літнього віку.

Хоча ОА традиційно розглядали як наслідок механічного зношування, сучасні дослідження підтверджу-

ють участь імунзапальних механізмів, включаючи активацію прозапальних цитокінів (IL-1 β , IL-6, TNF- α), залучення клітин вродженого і набутого імунітету, оксидативний стрес, а також сенесценцію хондроцитів [2–4].

Особливе значення має інтерлейкін-6 (IL-6) — плейотропний цитокін, що бере участь у регуляції імунної відповіді, диференціації Т-лімфоцитів, активації остеокластів та стимуляції продукування гострофазових білків [5, 6]. Рівень IL-6 у синовіальній рідині та сироватці крові пацієнтів з ОА корелює із вираженістю болю,

тяжкістю синовіту та швидкістю прогресування дегенеративних змін [7, 8]. Крім того, активація сигнального шляху JAK/STAT під впливом IL-6 призводить до посиленої експресії матриксних металопротеїназ, що зумовлює деградацію хряща [9]. Сучасні генетико-епідеміологічні дослідження (менделівська рандомізація) також підтвердили причинно-наслідковий зв'язок між підвищеним рівнем IL-6 та розвитком ОА [10].

У зв'язку з цим IL-6 розглядається не лише як біомаркер активності запалення, але й як перспективна терапевтична мішень. Таргетна блокада цього цитокіну або його сигнальних каскадів (JAK/STAT, MAPK, NF- κ B) є напрямом інтенсивних доклінічних та клінічних досліджень [11]. Водночас потребує уваги пошук нових або комбінованих підходів, здатних впливати на системний імунзапальний фон при ОА.

Нестероїдні протизапальні препарати (НПЗП), зокрема диклофенак натрію, широко застосовуються для симптоматичного контролю болю й запалення при ОА. Проте їх використання обмежене побічними ефектами, особливо при тривалому застосуванні [11].

У зв'язку з цим зростає інтерес до комбінованих або ад'ювантних стратегій терапії, здатних підвищити ефективність лікування при зменшенні фармакологічного навантаження.

Одним із перспективних напрямів є використання фізіологічно активних сполук, зокрема вуглекислого газу (CO_2), який у доклінічних моделях продемонстрував здатність покращувати мікроциркуляцію, знижувати локальне запалення та активувати репаративні процеси [12]. Відомо також, що транскутанне введення CO_2 може впливати на локальну гіпоксію, стимулюючи ангіогенез, що є критично важливим у тканинах із обмеженим кровопостачанням, зокрема у хрящі [13].

Іншим напрямом сучасної терапії є використання нутрицевтиків та біоактивних хондропротекторів, зокрема хондроїтину сульфату, який має здатність зменшувати деградацію хряща, поліпшувати його гідратацію та уповільнювати прогресування ОА [14]. Однак ефективність таких препаратів у монотерапії залишається обмеженою, що обґрунтовує необхідність дослідження синергічних комбінацій.

З огляду на викладене перспективним є вивчення комбінованого застосування CO_2 з фармакологічними або хондропротекторними сполуками з метою посилення їх протизапальної та регенеративної дії при ОА.

Мета дослідження: оцінити вплив транскутанного вуглекислого газу в комбінації з диклофенаком натрію або хондроїтину сульфатом на рівень інтерлейкіну-6 у моделі остеоартриту, індукованого моноіодоцтовою кислотою (МЙОК).

Матеріали та методи

У дослідженні було використано 80 статевозрілих білих безпородних щурів-самців (маса тіла 180–220 г), яких утримували в стандартних умовах віварію: температура повітря — 21–23 °C, відносна вологість — 50–60 %, світловий режим — 12 год світла/12 год темряви.

Тварини мали вільний доступ до води та стандартного лабораторного корму. Перед початком експерименту всі щури проходили 7-денну акліматизацію. Усі маніпуляції над тваринами здійснювали відповідно до Міжнародної директиви з етичного використання лабораторних тварин (Directive 2010/63/EU of the European Parliament and of the Council of 22 September 2010 on the protection of animals used for scientific purposes).

Зв'язок публікації з плановими науково-дослідними роботами

Цей фрагмент входить в ініціативну науково-дослідну тему кафедри фармакології, клінічної фармакології та фармації Полтавського державного медичного університету «Дослідження фармакологічних властивостей біологічно активних речовин, лікарських засобів та їх комбінацій для розробки нових показань до їх призначення» (номер державної реєстрації 0125U002468), а також науково-дослідну тему кафедри загальної хірургії Державного вищого навчального закладу «Ужгородський національний університет» «Моніторинг травматичної хвороби на фоні хронічного стресу» (номер державної реєстрації 0124U002167).

Моделювання експериментального остеоартрозу

ОА моделювали внутрішньосуглобовим введенням 0,05 мл 3% розчину МЙОК (MIA; Sigma-Aldrich, Німеччина) в правий колінний суглоб щурів під легким ефірним наркозом, за адаптованими протоколами [15, 16]. Розчин готували ex tempore на основі 0,9% NaCl. Щурам контрольної групи вводили 0,05 мл фізіологічного розчину.

Через 24 години після індукції патології тварини були рандомізовані у 8 груп ($n = 5$ тварин у підгрупі) для оцінки ефектів на 14-й та 28-й день:

- **інтактні (I)** — без втручання;
- **інтактні + NaCl (II)** — внутрішньоочеревинне введення 0,9% NaCl;
- **МЙОК (III)** — група патології (остеоартроз без лікування);
- **МЙОК + диклофенак 8 мг/кг (IV)** — внутрішньоочеревинно;
- **МЙОК + хондроїтину сульфат 3 мг/кг (V)** — внутрішньоочеревинно;
- **МЙОК + CO_2 0,5 мл (VI)** — підшкірно, періартикулярно;
- **МЙОК + диклофенак 4 мг/кг + CO_2 0,5 мл (VII)** — комбінована терапія;
- **МЙОК + хондроїтин 3 мг/кг + CO_2 0,5 мл (VIII)** — комбінована терапія.

Диклофенак натрію та хондроїтину сульфат вводили внутрішньоочеревинно один раз на три доби протягом усього періоду спостереження (14 або 28 діб залежно від експериментальної серії). Вуглекислий газ (CO_2) застосовували шляхом підшкірного введення у ділянку над ураженим суглобом у дозі 0,5 мл з такою ж періодичністю — один раз на три доби протягом відповідного терміну (14 або 28 діб).

На 14-й або 28-й день експерименту тварини підлягали евтаназії під тіопенталовим наркозом (50 мг/кг) згідно з протоколами. Після досягнення глибокої анестезії проводили кардіопункцію для забору крові. Сироватку отримували центрифугуванням при 3000 об/хв протягом 10 хв при +4 °C та зберігали при –20 °C до моменту аналізу.

Концентрацію IL-6 у сироватці крові лабораторних тварин визначали методом сендвіч-імуноферментного аналізу (Sandwich ELISA) із використанням комерційного набору Elabscience® Rat IL-6 ELISA Kit (кат. № E-EL-R0015; виробник Elabscience Biotechnology Inc., США/Китай). Дослідження проводили згідно з інструкцією виробника.

Зразки сироватки вносили у лунки планшета у трикратному повторі та інкубували при температурі 37 °C. Для візуалізації застосовували систему HRP-стрептавідин + ТМВ. Оптичну щільність зчитували за допомогою мікропланшетного фотометра (LabLine-026, Австрія) при довжині хвилі 450 нм.

Концентрацію IL-6 розраховували за калібрувальною кривою, побудованою на основі стандартних розчинів, із використанням програмного забезпечення CurveExpert 1.4.

Статистичну обробку даних проводили з використанням програмного забезпечення Jamovi (версія 2.3.21; www.jamovi.org). Результати подано як середнє значення $\pm$ стандартне відхилення ($M \pm SD$). Нормальність розподілу перевіряли за допомогою критерію Шапіро — Уїлка. У разі нормального розподілу міжгрупові порівняння виконували з використанням

t-критерію Велча або однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA) з наступним post-hoc тестом Тьюкі. За наявності відхилення від нормального розподілу застосовували критерій Крускала — Волліса з поправкою Бонферроні. Різницю вважали статистично значущою при $p < 0,05$.

Результати та їх обговорення

Рівень IL-6 у сироватці крові визначали на 14-й та 28-й день після індукції остеоартриту МЙОК. У групі патології (МЙОК) спостерігалось вірогідне підвищення IL-6 порівняно з групою інтактних тварин ($14,60 \pm 0,27$ пг/мл проти $1,33 \pm 0,09$ пг/мл; $p < 0,001$), що свідчить про активацію запального каскаду (табл. 1).

На 14-й день аналіз ANOVA ($F(7,32) = 5117$; $p < 0,001$) підтвердив значущі міжгрупові відмінності, дані відповідали нормальному розподілу (критерій Шапіро — Уїлка $p > 0,2$). Монотерапія диклофенаком (8 мг/кг) знижувала рівень IL-6 на 2,85 пг/мл (19,5 %; 95% CI: 2,32–3,37; $p < 0,001$); хондроїтину сульфат (3 мг/кг) — на 1,48 пг/мл (10,1 %; 95% CI: 0,99–1,96; $p < 0,001$), а транскутанне введення CO_2 (0,5 мл) (група VI) — на 1,996 пг/мл (13,7 %; 95% CI: 1,49–2,50; $p < 0,001$).

Комбінація хондроїтину сульфату з CO_2 спричиняла зниження рівня IL-6 на 2,79 пг/мл (19,1 %; $p < 0,001$), однак найвираженіший ефект спостерігався у групі диклофенаку (4 мг/кг) + CO_2 : зниження IL-6 становило 6,77 пг/мл (46,4 %; 95% CI: 6,19–7,35; $p < 0,001$), що було вірогідно більшим, ніж при монотерапії диклофенаком (різниця 3,91 пг/мл; $p < 0,001$, post-hoc тест Тьюкі).

Таблиця 1. Вплив диклофенаку натрію, хондроїтину сульфату і транскутанної CO_2 -терапії на рівень IL-6 (пг/мл) у сироватці крові щурів з експериментальним остеоартритом, індукованим МЙОК (14-й і 28-й день)

Група	14 днів	28 днів
I — інтактні тварини	$1,33 \pm 0,09$	$1,33 \pm 0,09$
II — інтактні + фізрозчин	$1,29 \pm 0,07$	$1,29 \pm 0,07$
III — патологія (МЙОК)	$14,58 \pm 0,27$	$14,29 \pm 0,34$
IV — МЙОК + ДН 8 мг/кг	$11,73 \pm 0,26^{***}$	$10,98 \pm 0,25^{***}$
V — МЙОК + ХС 3 мг/кг	$13,10 \pm 0,28^{***}$	$12,47 \pm 0,16^{***}$
VI — МЙОК + CO_2 0,5 мл	$12,58 \pm 0,18^{***}$	$12,06 \pm 0,28^{***}$
VII — МЙОК + ДН 4 мг/кг + CO_2	$7,81 \pm 0,37^{***}$	$6,08 \pm 0,60^{***}$
VIII — МЙОК + ХС 3 мг/кг + CO_2	$11,79 \pm 0,27^{***}$	$10,50 \pm 0,35^{***}$
Статистична значущість міжгрупової відмінності	$F = 5117$ $df1 = 7, df2 = 13,2$ $p < 0,001$	$F = 4347$ $df1 = 7, df2 = 13,2$ $p < 0,001$
Тест Шапіро — Уїлка	$W = 0,976$ $p = 0,552$	$W = 0,964$ $p = 0,225$

Примітки: дані подано як середнє $\pm$ стандартне відхилення ($M \pm SD$); $n = 5$ у кожній підгрупі; усі змінні відповідали нормальному розподілу за критерієм Шапіро — Уїлка ($p > 0,05$), що дозволило застосувати однофакторний дисперсійний аналіз (ANOVA) з post-hoc тестом Тьюкі; *** — $p < 0,001$ — вірогідна відмінність порівняно з групою патології (МЙОК); МЙОК — моноіодоцтова кислота; ДН — диклофенак натрію; ХС — хондроїтину сульфат; CO_2 — транскутанне введення вуглекислого газу.

На 28-й день міжгрупова дисперсія залишалася статистично значущою ($F(7,32) = 4347$; $p < 0,001$) і тенденції ефективності втручань зберігались. Диклофенак (8 мг/кг) знижував рівень ІЛ-6 на 3,31 пг/мл (23,2 %; 95% СІ: 2,71–3,91; $p < 0,001$), хондроїтину сульфат + CO_2 — на 3,80 пг/мл (26,6%; 95% СІ: 3,25–4,34; $p < 0,001$), CO_2 — на 2,23 пг/мл (15,6 %; $p < 0,001$), а комбінація диклофенаку (4 мг/кг) та CO_2 забезпечила найбільше зниження — 8,22 пг/мл (57,5 %; 95% СІ: 7,64–8,80; $p < 0,001$), з вірогідною перевагою над монотерапією (різниця становила 4,91 пг/мл; $p < 0,001$).

У групі CO_2 зниження рівня ІЛ-6 не відрізнялось статистично від ефекту хондроїтину сульфату без CO_2 ($p = 0,479$), що свідчить про обмежену монотерапевтичну ефективність обох втручань у відриві одне від одного.

Усі ефекти підтверджені post-hoc тестом Тьюкі, залишки моделей відповідали нормальному розподілу (за критерієм Шапіро — Уїлка $p > 0,2$), пропущені або аномальні значення відсутні, що засвідчує стабільність і відтворюваність результатів у динаміці.

Таким чином, отримані результати підтверджують значущу роль ІЛ-6-опосередкованих механізмів у патогенезі ОА, що узгоджується з попередніми даними про залучення цього цитокіну до підтримання хронічного запалення, активації експресії MMP-1 та MMP-13, пригнічення синтезу колагену II типу та порушення гомеостазу хондроцитів [17, 18].

Комбіноване застосування транскутанної CO_2 -терапії з диклофенаком натрію або хондроїтину сульфатом супроводжувалося вірогідним зниженням рівня ІЛ-6, що свідчить про потенційний імуномодуючий ефект цього підходу. Дані літератури вказують, що CO_2 здатен модулювати запальні сигнальні каскади через пригнічення активації NF- κ B та MAPK, а також знижувати експресію TNF- α , ІЛ-6, COX-2 та iNOS [19, 20]. Такий механізм дії дозволяє розглядати CO_2 не лише як фізіологічний вазодилатор, але і як сигнальну молекулу, що сприяє регуляції низькорівневого запалення.

У нашій роботі встановлено, що комбінація CO_2 із половинною дозою диклофенаку (4 мг/кг) демонструє ефективність, яка перевищує монотерапію стандартною дозою (8 мг/кг), з більш вираженим зниженням рівня ІЛ-6. Це може бути зумовлено поліпшенням мікроциркуляції та тканинної перфузії, що потенційно сприяє кращому проникненню препарату до ділянки запалення [21]. Така комбінація дозволяє досягти протизапального ефекту при меншому фармакологічному навантаженні. Це особливо важливо з огляду на відомі ризики диклофенаку у високих дозах, зокрема гастроінтестинальні ураження, гіпертензію та серцево-судинні ускладнення [22–24].

Що стосується хондроїтину сульфату, то його хондропротекторні властивості підтверджено як у доклінічних, так і у клінічних дослідженнях: він знижує експресію MMP та ІЛ-1 β , зменшує апоптоз хондроцитів та підтримує стабільність позаклітинного матриксу [14, 25]. Виявлений у дослідженні посилений ефект хон-

дроїтину у комбінації з CO_2 , ймовірно, пояснюється сукупною дією на транскрипційні фактори (наприклад, NF- κ B) та поліпшенням трофіки тканин.

Крім протизапального ефекту, CO_2 -терапія також асоціюється з ангіогенними і репаративними властивостями, включаючи активацію VEGF, Runx2 та Osterix, що сприяє регенерації хряща й субхондральної кістки [26, 27].

Це підкріплює можливість використання CO_2 як ад'юванта не лише для протизапальної, але й для репаративної терапії в контексті остеоартриту.

Отримані результати наближають досліджувану комбіновану терапію до інших біоактивних стратегій, зокрема застосування екстрактів *Boswellia serrata*, *Cissus quadrangularis* або ячної шкаралупи (ESM), які продемонстрували здатність знижувати рівні ІЛ-6 і TNF- α , пригнічувати MMP-13 та активувати експресію COL2A1 і агрекану [28–30].

Таким чином, комбіноване використання транскутанної CO_2 -терапії з протизапальними або хондропротекторними засобами становить перспективний підхід до комплексної модифікації прозапального середовища при ОА. Подальші дослідження, зокрема із залученням клінічних моделей, необхідні для оптимізації режимів застосування CO_2 як складової частини персоналізованої терапії остеоартриту.

Висновки

1. Результати експериментального дослідження підтвердили ключову роль ІЛ-6 як маркера хронічного запалення при остеоартриті, індукованому МЙОК. У групі патології рівень ІЛ-6 у сироватці крові вірогідно перевищував аналогічні показники у інтактних тварин, що відображає активацію прозапального каскаду в умовах ушкодження хряща.

2. Монотерапія диклофенаком натрію (8 мг/кг) сприяла помірному зниженню рівня ІЛ-6, тоді як хондроїтину сульфат (3 мг/кг) та транскутанне введення CO_2 мали менш виражений ефект. Водночас найбільш суттєве зниження ІЛ-6 спостерігалось при застосуванні комбінованої терапії CO_2 з половинною дозою диклофенаку (4 мг/кг), що продемонструвало вірогідну перевагу над монотерапією навіть у повній дозі. Це вказує на можливість зменшення фармакологічного навантаження при збереженні або навіть підвищенні терапевтичної ефективності. Подібна тенденція спостерігалась і для комбінації хондроїтину з CO_2 , яка забезпечила посилене зниження ІЛ-6 порівняно з монотерапією.

3. Встановлений ефект CO_2 , ймовірно, реалізується за рахунок поліпшення мікроциркуляції, зниження локальної гіпоксії та модуляції сигнальних шляхів запалення (зокрема, NF- κ B, MAPK), що дозволяє розглядати його як перспективний ад'ювант у лікуванні остеоартриту.

4. Транскутанне введення CO_2 у комбінації з диклофенаком або хондроїтину сульфатом демонструє потенціал як ефективна і безпечніша альтернатива традиційній протизапальній терапії. З огляду на отримані

дані ця стратегія заслуговує на подальше дослідження, зокрема в напрямку її клінічної апробації, вивчення довготривалих впливів, ангіогенного потенціалу та впливу на структурно-функціональні характеристики суглоба.

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

Інформація про фінансування. Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування.

Список літератури

1. Hunter DJ, Bierma-Zeinstra S. Osteoarthritis. *Lancet*. 2019;393(10182):1745-59. doi: 10.1016/S0140-6736(19)30417-9.
2. Robinson WH, Lepus CM, Wang Q, Raghu H, et al. Low-grade inflammation as a key mediator of the pathogenesis of osteoarthritis. *Nat Rev Rheumatol*. 2016;12(10):580-92. doi: 10.1038/nrrheum.2016.136.
3. Kapoor M, Martel-Pelletier J, Lajeunesse D, Pelletier JP, Fahmi H. Role of proinflammatory cytokines in the pathophysiology of osteoarthritis. *Nat Rev Rheumatol*. 2011;7(1):33-42. doi: 10.1038/nrrheum.2010.196.
4. Wojdasiewicz P, Poniatowski LA, Szukiewicz D. The role of inflammatory and anti-inflammatory cytokines in the pathogenesis of osteoarthritis. *Mediators Inflamm*. 2014;2014:561459. doi: 10.1155/2014/561459.
5. Favalli EG. Understanding the role of interleukin-6 (IL-6) in the joint and beyond: a comprehensive review of IL-6 inhibition for the management of rheumatoid arthritis. *Rheumatol Ther*. 2020;7(3):473-516. doi: 10.1007/s40744-020-00219-2. PMID: 32734482; PMCID: PMC7410942.
6. You Z, Liang C. IL-6 in osteoarthritis: expression and research progress. *Clin Cases Res. BioRes Scientia Publishers*. 2024;7(4):1-7. doi: 10.59657/2837-2565.brs.24.195.
7. Guria A, Chandra V, Bej B, Vimal K, et al. Clinical and radiological evaluation of osteoarthritis in knee pain patients and its association with inflammatory markers at MGM Medical College Hospital, Jamshedpur. *J Family Med Prim Care*. 2025;14(6):2242-50. doi: 10.4103/jfmpc.jfmpc_1452_24.
8. Magomedov S, Polyachenko Y, Hrytsai M. Interleukin-6 and acute phase proteins as biomarkers of septic osteoarthritis. *Orthop Traumatol Prosthetics*. 2025;1:45-50. doi: 10.15674/0030-59872025266-70.
9. Wu Z, Zhou H, Wu Z, Hou Z. Exploring the causal relationship between interleukin levels and osteoarthritis: a two-sample Mendelian randomization analysis. *Medicine (Baltimore)*. 2025;104(23):e42675. doi: 10.1097/MD.00000000000042675.
10. Gu H, Han X, Ding Y, Deng J. Kruppel-like factor 9 may regulate the inflammatory injury of chondrocytes by affecting NF- κ B signaling. *J Orthop Surg Res*. 2025;20(1):599. doi: 10.1186/s13018-025-05974-y.
11. Bannuru RR, Osani MC, Vaysbrot EE, Arden NK, Bennell K, Bierma-Zeinstra SMA, et al. OARSI guidelines for the non-surgical management of knee, hip, and polyarticular osteoarthritis. *Osteoarthritis Cartilage*. 2019;27(11):1578-89. doi: 10.1016/j.joca.2019.06.011.
12. Prazeres J, Lima A, Ribeiro G. Effects of carbon dioxide therapy on skin wound healing. *Biomedicines*. 2025;13(1):228. doi: 10.3390/biomedicines13010228.
13. Xu YJ, Elimban V, Bhullar SK, Dhalla NS. Effects of CO₂ water-bath treatment on blood flow and angiogenesis in ischemic hind limb of diabetic rat. *Can J Physiol Pharmacol*. 2018;96(10):1017-21. doi: 10.1139/cjpp-2018-0160.
14. Henrotin Y, Mathy M, Sanchez C, Lambert C. Chondroitin sulfate in the treatment of osteoarthritis: from in vitro studies to clinical recommendations. *Ther Adv Musculoskelet Dis*. 2010;2(6):335-48. doi: 10.1177/1759720X10383076.
15. Udo M, Muneta T, Tsuji K, Ozeki N, Nakagawa Y, Ohara T, et al. Monoiodoacetic acid induces arthritis and synovitis in rats in a dose- and time-dependent manner. *Osteoarthritis Cartilage*. 2016;24(7):1284-91. doi: 10.1016/j.joca.2016.02.005.
16. Riewruja K, Makarczyk M, Alexander PG, Gao Q, Goodman SB, Bunnell BA, et al. Experimental models to study osteoarthritis pain and develop therapeutics. *Osteoarthritis Cartilage Open*. 2022;4(4):100306. doi: 10.1016/j.ocarto.2022.100306.
17. Mima Z, Wang K, Liang M, Wang Y, Liu C, Wei X, et al. Blockade of JAK2 retards cartilage degeneration and IL-6-induced pain amplification in osteoarthritis. *Int Immunopharmacol*. 2022;113(Pt A):109340. doi: 10.1016/j.intimp.2022.109340.
18. Latourte A, Cherifi C, Maillet J, Ea HK, Bouaziz W, Funk-Brentano T, et al. Systemic inhibition of IL-6/Stat3 signalling protects against experimental osteoarthritis. *Ann Rheum Dis*. 2017;76(4):748-55. doi: 10.1136/annrheumdis-2016-209757.
19. Galganska H, Jarmuszkiewicz W, Galganski L. Carbon dioxide inhibits COVID-19-type proinflammatory responses. *Cell Mol Life Sci*. 2021;78(24):8229-42. doi: 10.1007/s00018-021-04005-3.
20. Rivers RJ, Meininger CJ. The tissue response to hypoxia: how therapeutic carbon dioxide moves the response toward homeostasis. *Int J Mol Sci*. 2023;24(6):5181. doi: 10.3390/ijms24065181.
21. Németh B, Kiss I, Ajtay B, Péter I, Kreska Z, Cziráki A, et al. Transcutaneous carbon dioxide treatment is capable of reducing peripheral vascular resistance in hypertensive patients. *In Vivo*. 2018;32(6):1555-9. doi: 10.21873/in vivo.11414.
22. Lanas A, Carrera-Lasfuentes P, Arguedas Y, García S, Bujanda L, Calvet X, et al. Risk of upper and lower gastrointestinal bleeding in patients taking NSAIDs. *Clin Gastroenterol Hepatol*. 2015;13(5):906-12.e2. doi: 10.1016/j.cgh.2014.11.007.
23. Al-Saeed A. Gastrointestinal and cardiovascular risk of NSAIDs. *Oman Med J*. 2011;26(6):385-91. doi: 10.5001/omj.2011.101.
24. Domper Arnal MJ, Hijos-Mallada G, Lanas A. Gastrointestinal and cardiovascular adverse events associated with NSAIDs. *Expert Opin Drug Saf*. 2022;21(3):373-84. doi: 10.1080/14740338.2021.1965988.
25. Brito R, Costa D, Dias C, Cruz P, Barros P. Chondroitin sulfate supplements for osteoarthritis: a critical review. *Cureus*. 2023;15(6):e40192. doi: 10.7759/cureus.40192.
26. Kuroiwa Y, Fukui T, Takahara S, Lee SY, Oe K, Arakura M, et al. Topical cutaneous application of CO₂ accelerates

bone healing in a rat femoral defect model. *BMC Musculoskeletal Disord.* 2019;20(1):237. doi: 10.1186/s12891-019-2601-5.

27. Hirota J, Hasegawa T, Inui A, Takeda D, Amano-Iga R, Yatagai N, et al. Local application of a transcutaneous CO₂ paste prevents excessive scarring and promotes muscle regeneration. *Int Wound J.* 2023;20(4):1151-9. doi: 10.1111/iwj.13974.

28. Alluri VK, Kundimi S, Sengupta K, Golakoti T, Kilari EK. An anti-inflammatory composition of *Boswellia serrata* resin extracts alleviates pain and protects cartilage. *Evid Based Complement Alternat Med.* 2020;2020:7381625. doi: 10.1155/2020/7381625.

29. Choi YJ, Jung JI, Bae J, Lee JK, Kim EJ. Evaluation of the anti-osteoarthritic effects of *Cissus quadrangularis* extract in a rat model. *Food Nutr Res.* 2025;69:12173. doi: 10.29219/fnr.v69.12173.

30. Yu M, Park C, Son YB, Jo SE, Jeon SH, Kim YJ, et al. Time-dependent effect of eggshell membrane on MIA-induced osteoarthritis. *Nutrients.* 2024;16(12):1885. doi: 10.3390/nu16121885.

Отримано/Received 10.07.2025

Рецензовано/Revised 14.08.2025

Прийнято до друку/Accepted 19.08.2025

Information about author

Viktor Shtroblia, PhD-student, Department of General Surgery, Uzhhorod National University, Narodna sq., 3, Uzhhorod, Transcarpathian Region, 88000, Ukraine; e-mail: viktor.shtroblia@uzhnu.edu.ua; <https://orcid.org/0009-0003-3299-4329>

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

Information about funding. This study receive no external funding.

V.V. Shtroblia

Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine

Potentiating effect of transcutaneous carbon dioxide administration on the anti-inflammatory properties of sodium diclofenac and chondroitin sulfate in a rat model of osteoarthritis

Abstract. Background. Osteoarthritis is a chronic degenerative-inflammatory joint disease that, according to current concepts, may be accompanied by the activation of low-grade inflammation involving pro-inflammatory cytokines, particularly interleukin-6 (IL-6). In this context, there is growing interest in adjuvant therapeutic strategies, especially the use of transcutaneous carbon dioxide (carboxytherapy) as a potential modulator of the inflammatory response while simultaneously reducing the pharmacological burden. The purpose was to evaluate the effect of transcutaneous carbon dioxide in combination with sodium diclofenac or chondroitin sulfate on IL-6 level in a monoiodoacetate-induced model of osteoarthritis.

Materials and methods. The experiment involved 80 sexually mature outbred male white rats in which osteoarthritis was induced by intra-articular injection of monoiodoacetic acid. The animals received diclofenac (8 or 4 mg/kg), chondroitin sulfate (3 mg/kg), CO₂ (0.5 ml subcutaneously), or their combinations. The serum concentration of IL-6 was measured on days 14 and 28 using enzyme-linked

immunosorbent assay. Statistical analysis was performed with one-way analysis of variance followed by Tukey post hoc test. **Results.** The combination of CO₂ with a half-dose of diclofenac reduced IL-6 levels by 6.77 pg/ml (46.4 %; $p < 0.001$) on day 14 and by 8.22 pg/ml (57.5 %; $p < 0.001$) on day 28, which significantly exceeded the effect of the full diclofenac dose ($p < 0.001$). A similar but less pronounced trend was observed for the combination of chondroitin with CO₂. CO₂ alone produced an effect comparable to that of chondroitin sulfate ($p = 0.479$). **Conclusions.** Transcutaneous carbon dioxide potentially enhances the anti-inflammatory effects of diclofenac and chondroitin sulfate by contributing to the reduction in IL-6 levels over time. This approach may be beneficial for decreasing the required dose of nonsteroidal anti-inflammatory drugs in the treatment of osteoarthritis.

Keywords: osteoarthritis; interleukin-6; sodium diclofenac; chondroitin sulfate; carbon dioxide; transcutaneous therapy; experimental model; inflammation