

Гений Ортопедии

Orthopaedic Genius

Том 31
№ 1
2025

Научно-теоретический и практический журнал
Основан в память академика Г.А. Илизарова

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Бурцев А.В. (Россия, Курган) – **главный редактор**
 Аранович А.М. (Россия, Курган) – **заместитель главного редактора**
 Samchukov M.L. (США) – **заместитель главного редактора**
 Баиндурашвили А.Г. (Россия, Санкт-Петербург)
 Борзунов Д.Ю. (Россия, Екатеринбург)
 Волокитина Е.А. (Россия, Екатеринбург)
 Губин А.В. (Россия, Санкт-Петербург)
 Дьячкова Г.В. (Россия, Курган)
 Коновалов Н.А. (Россия, Москва)
 Котельников Г.П. (Россия, Самара)
 Кутепов С.М. (Россия, Екатеринбург)
 Линник С.А. (Россия, Санкт-Петербург)
 Мироманов А.М. (Россия, Чита)
 Попков А.В. (Россия, Курган)
 Попков Д.А. (Россия, Курган)
 Рябых С.О. (Россия, Москва)
 Скрябин Е.Г. (Россия, Тюмень)
 Суфианов А.А. (Россия, Тюмень)
 Тихилов Р.М. (Россия, Санкт-Петербург)
 Birch J.G. (США)
 Catagni M.A. (Италия)
 Chaudhary M.M. (Индия)
 Dubousset J.F. (Франция)
 Glatt V. (США)
 Hosny G.A. (Египет)
 Kirienko A. (Италия)
 Lascombes P. (Швейцария)
 Madan S. (Великобритания)
 Monsell F. (Великобритания)
 Paley D. (США)
 Pinzur M.S. (США)
 Podeszwa D.A. (США)
 Weiss H.-R. (Германия)

Борзунова О.Б. – ответственный секретарь
 Беляева М.А. – технический секретарь

THE EDITORS

A.V. Burtsev (Russia, Kurgan) – **Editor in Chief**
 A.M. Aranovich (Russia, Kurgan) – **Deputy Editor**
 M.L. Samchukov (USA) – **Deputy Editor**
 A.G. Baindurashvili (Russia, St. Petersburg)
 D.Yu. Borzunov (Russia, Ekaterinburg)
 E.A. Volokitina (Russia, Ekaterinburg)
 A.V. Gubin (Russia, St. Petersburg)
 G.V. Diachkova (Russia, Kurgan)
 N.A. Konovalov (Russia, Moscow)
 G.P. Kotel'nikov (Russia, Samara)
 S.M. Kutepov (Russia, Ekaterinburg)
 S.A. Linnik (Russia, St. Petersburg)
 A.M. Miromanov (Russia, Chita)
 A.V. Popkov (Russia, Kurgan)
 D.A. Popkov (Russia, Kurgan)
 S.O. Ryabykh (Russia, Moscow)
 E.G. Skryabin (Russia, Tyumen)
 A.A. Sufianov (Russia, Tyumen)
 R.M. Tikhilov (Russia, St. Petersburg)
 J.G. Birch (USA)
 M.A. Catagni (Italy)
 M.M. Chaudhary (India)
 J.F. Dubousset (France)
 V. Glatt (USA)
 G.A. Hosny (Egypt)
 A. Kirienko (Italy)
 P. Lascombes (Switzerland)
 S. Madan (UK)
 F. Monsell (UK)
 D. Paley (USA)
 M.S. Pinzur (USA)
 D.A. Podeszwa (USA)
 H.-R. Weiss (Germany)

O.B. Borzunova – Executive Secretary
 M.A. Beliaeva – Technical Secretary



Учредитель и издатель журнала:

**федеральное государственное бюджетное учреждение
«Национальный медицинский исследовательский центр
травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова»
Министерства здравоохранения Российской Федерации**



**Издание журнала осуществляется при поддержке
Ассоциации по изучению и применению метода Илизарова России (А.С.А.М.И. Россия)**

Журнал включен в перечень научных специализированных изданий ВАК, в которых могут публиковаться основные результаты диссертационных работ на соискание ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук (3.1.8 – травматология и ортопедия)

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ

Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory»

Журнал включен в библиографические и реферативные базы данных РИНЦ и SCOPUS

Журнал включен в электронные информационные ресурсы базы данных EBSCO

Электронная версия журнала размещена на сайтах

<http://ilizarov-journal.com>

<http://eLibrary.ru>

<http://cyberleninka.ru>



Контент журнала доступен под лицензией Creative Commons – Attribution 4.0 International, CC-BY.

Адрес: 640014, Россия, г. Курган, ул. М. Ульяновой, 6

Телефон: (3522) 43-06-94 – редакция

(3522) 23-42-60 – реклама

Интернет: <http://ilizarov-journal.com/>

Email: genius@ilizarov.ru

Оригинал-макет изготовлен ОИАиВР ФГБУ «НМИЦ ТО имени академика Г.А. Илизарова» Минздрава России

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций ПИ № ФС77-68207 от 30 декабря 2016 года

Территория распространения: Российская Федерация, зарубежные страны

Язык: русский, английский

Издается 6 раз в год

Цена свободная

© Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, 2025

Уважаемые коллеги!



Прошедший 2024 год был ознаменован множеством интересных событий в мире травматологии и ортопедии. В России в развитии прикладной науки сохранился тренд на импортозамещение. Большое внимание и в нашей стране, и за рубежом было уделено применению и развитию метода Илизарова.

В начале года прошла конференция ASAMICON India, объединившая коллег-«илизаровцев» азиатского региона (Индия, Китай, Бангладеш, Филиппины, Индонезия). В рамках конференции сотрудники Центра Илизарова (члены ASAMI-Россия) провели мастер-классы, выступили с лекциями и докладами по применению метода чрескостного остеосинтеза по Илизарову.

Ежегодная международная конференция «Илизаровские чтения», проведенная в июне в день рождения Г.А. Илизарова, была посвящена аспектам этапной ортопедической хирургии: плановой и ревизионной. В программу конференции вошли научно-практические секции и обучающие мастер-классы по чрескостному остеосинтезу при лечении костных дефектов и различных форм костно-суставной инфекции. В мероприятии приняли участие представители различных регионов нашей страны и иностранные коллеги из Индии, Бангладеша, Мьянмы, Буркина-Фасо, Омана, Узбекистана.

VI Всемирный конгресс ASAMI & ILLRS состоялся в Пекине с участием представителей более 40 стран. Почти неделю, с 17 по 22 сентября, ведущие эксперты мирового ортопедического сообщества обсуждали различные аспекты применения метода Илизарова. На церемонии открытия Центр Илизарова был удостоен награды за значительный вклад в развитие внешней фиксации.

Продолжением событий стал конгресс по огнестрельной ране, где большое внимание было уделено внешней фиксации, а имя академика Илизарова было наиболее часто упоминаемым. Докладчиками были представлены различные аспекты применения метода Илизарова в остром и отдаленном периоде боевой патологии опорно-двигательного аппарата, ее последствий и осложнений. Обсуждались также перспективы развития, в том числе организация образовательных мероприятий по применению метода Илизарова.

Мы уверены, что в 2025 году большой интерес к методикам внешней фиксации сохранится, и планируем проведение научно-практических мероприятий по методу Илизарова. Основным событием будет «Илизаровская неделя в России». Она начнется с кадаверного курса в Екатеринбурге, продолжится конференцией «Илизаровские чтения» и образовательными мероприятиями в Кургане, и далее на площадке ЕОФ пройдут научно-практические и образовательные секции под эгидой ASAMI-Россия.

Хочется отметить неугасающий интерес отечественных и зарубежных травматологов-ортопедов к методу Илизарова в преддверии юбилейных дат 2026 года (105 лет со дня рождения академика Г.А. Илизарова, 75 лет методу Илизарова, 55 лет Центру Илизарова). Мне кажется, что мы находимся в фазе профессионального переосмысления травматолого-ортопедических подходов и все больше осознаем сохраняющуюся значимость метода Илизарова в мире ортопедии не только как технологии, но и как философии.

Главный редактор журнала "Гений ортопедии"
д.м.н. Бурцев А.В.

Оригинальные статьи

Роль сывороточного лактоферрина и кальпротектина в воспалительной реакции у пациентов с переломами костей	6
<i>A.M. Amshawee, M.A. Hussain, M.A.L. Khafel, N.B. Alhusseini, A.A. Al-Fahham</i>	
Влияние принципа персонализированного выравнивания на положение компонентов эндопротеза при тотальном эндопротезировании коленного сустава	12
<i>B.B. Кузин, A.B. Кузин, A.B. Германов, M.A. Шнак</i>	
Сравнительный анализ результатов применения вариантов корригирующей остеотомии проксимального отдела большеберцовой кости	19
<i>М.Ш. Магомедов, Д.В. Чугаев, Т.А. Куляба, А.И. Петухов</i>	
Применение композитных скаффолдов на основе стеклогуглерода в инженерии костной ткани	28
<i>Е.И. Тимощук, Д.В. Пономарева, А.Р. Гареев</i>	
Гистоморфометрические характеристики метаэпифизарной пластинки дистального отдела бедренной кости ягнят в период интенсивного роста	42
<i>Т.А. Ступина, О.В. Дюрягина, А.А. Коробейников</i>	
Результаты реконструктивной хирургии конечностей с использованием телескопического титанового стержня	51
<i>А.М. Абдуллоев, Н.С. Гвоздев, Д.В. Тропин, Д.А. Попков</i>	

Случаи из практики

Первый опыт применения частично биорезорбируемого костнозамещающего материала у больного хроническим остеомиелитом большеберцовой кости 34-летней давности заболевания	60
<i>А.С. Судницын, А.Л. Шастов, Н.М. Ключин, Г.Х. Рашидов</i>	
Замещение тотального дефекта таранной кости с использованием индивидуального 3D-имплантата из пористого титана при нейроостеоартропатии Шарко у пациентки с нейросифилисом	66
<i>С.А. Оснач, В.Г. Процко, В.Н. Оболенский, А.В. Мазалов, В.Б. Бреговский, В.В. Кузнецов, С.К. Тамоев</i>	
Эффективное сочетание методов артроскопической и малоинвазивной хирургии при хронической заднелатеральной нестабильности локтевого сустава	74
<i>А.Е. Медведчиков, Е.А. Анастасиева, Б.А. Олейник, А.А. Симонян, Т.Е. Прокопович, И.А. Кирилова</i>	

Обзоры литературы

Травмы рук, полученные при контакте с работающими электрическими мясорубками (обзор литературы, иллюстрированный собственными клиническими наблюдениями)	83
<i>И.К. Супрунов, Е.Г. Скрыбин</i>	
Несращения переломов ладьевидной кости и методы лечения при SNAC-синдроме	91
<i>Н.А. Шудло, Ш.К. Куттыгул</i>	
Восстановление функции пальцев кисти при дефектах суставов	101
<i>Ю.С. Волкова, Л.А. Родоманова</i>	
Современные концепции лечения пациентов с инфицированными несращениями бедренной кости: внутренняя и внешняя фиксация	110
<i>R. Kaul, R.R. Dube, R. Agrawal, A. Pande</i>	
Элюция антибиотиков из костного цемента: проблемы и пути их решения	119
<i>Р.А. Шафигулин, И.Ф. Ахтямов, А.Л. Емелин, И.А. Беспалов, К.Н. Акифьев</i>	
Микробиологический фактор при остеоартритах	129
<i>Е.О. Перецманас, В.В. Зар, Я.А. Рукин, А.А. Казюлина, А.Д. Пахлавонова</i>	

Некролог

Профессор Введенский Станислав Петрович (2.06.1930–11.11.2024)	137
--	-----

Original Articles

Role of serum lactoferrin and calprotectin in the inflammatory response in patients with bone fractures	6
<i>A.M. Amshawee, M.A. Hussain, M.A.L. Khafel, N.B. Alhusseini, A.A. Al-Fahham</i>	
Impact of personalized alignment technique on implant components position in total knee arthroplasty	12
<i>V.V. Kuzin, A.V. Kuzin, A.V. Germanov, M.A. Shpak</i>	
Comparative analysis of the outcomes of high tibial osteotomy performed with different techniques	19
<i>M.Sh. Magomedov, D.V. Chugaev, T.A. Kulyaba, A.I. Petukhov</i>	
Possible application of glassy carbon composite scaffolds in bone tissue engineering	28
<i>E.I. Timoshchuk, D.V. Ponomareva, A.R. Gareev</i>	
Histomorphometric characteristics of the metaepiphyseal plate of the distal femur of lambs during the period of their intensive growth	42
<i>T.A. Stupina, O.V. Dyuryagina, A.A. Korobeynikov</i>	
Results of limb reconstruction surgery using a telescopic titanium rod: early findings	51
<i>A.M. Abdulloev, N.S. Gvozdev, D.V. Tropin, D.A. Popkov</i>	

Case reports

First experience with the use of a partially bioresorbable bone substitution material in a patient with 34-year old chronic osteomyelitis of the tibia	60
<i>A.S. Sudnitsyn, A.L. Shastov, N.M. Klushin, G.Kh. Rashidov</i>	
Management of a total defect of the talus with a customized 3D-implant made of porous titanium for Charcot neuroosteoarthropathy in a patient with neurosyphilis: a case report	66
<i>S.A. Osnach, V.G. Protsko, V.N. Obolensky, A.V. Mazalov, V.B. Bregovsky, V.V. Kuznetsov, S.K. Tamoev</i>	
Effective combination of arthroscopic and minimally invasive surgery for chronic posterolateral elbow instability	74
<i>A.E. Medvedchikov, E.A. Anastasieva, B.A. Oleynik, A.A. Simonyan, T.E. Prokopovich, I.A. Kyrilova</i>	

Literature reviews

Hand injuries sustained while contacting operating electric meat grinders (literature review illustrated with authors' clinical cases)	83
<i>I.K. Suprunov, E.G. Skryabin</i>	
Scaphoid nonunion and SNAC treatment	91
<i>N.A. Shchudlo, Sh.K. Kuttygul</i>	
Reconstruction of finger function in case of joint defects	101
<i>Yu.S. Volkova, L.A. Rodomanova</i>	
Current concepts in the management of infected non-union of the femur: internal versus external fixation	110
<i>R. Kaul, R.R. Dubey, R. Agrawal, A. Pande</i>	
Elution of antibiotics from bone cement: problems and ways to solution	119
<i>R.A. Shafigulin, I.F. Akhtyamov, A.L. Emelin, I.A. Besspalov, K.N. Akifyev</i>	
Microbiological factors in osteoarthritis	129
<i>E.O. Peretsmanas, V.V. Zar, Ya.A. Rukin, A.A. Kazyulina, A.D. Pakhlavonova</i>	

Obituary

Professor Vvedensky Stanislav Petrovich (06.02.1930–11.11.2024)	137
---	-----



Role of serum lactoferrin and calprotectin in the inflammatory response in patients with bone fractures

A.M. Amshawee¹, M.A. Hussain², M.A.L. Khafel³, N.B. Alhusseini⁴, A.A. Al-Fahham⁴✉

¹ Hilla University College, Babylon, Iraq

² Al-Furat Al-Awsat Technical University, Iraq

³ Al-Zahrawi University College, Karbala, Iraq

⁴ University of Kufa, Najaf, Iraq

Corresponding author: Ali A. Al-Fahham, fahham925@gmail.com

Abstract

Introduction Elevated concentrations of serum calprotectin and lactoferrin were observed to make prediction about microvascular changes in patients with bone fractures.

The **aim** of the present study was to assess the diagnostic value of serum calprotectin and lactoferrin in the development of inflammatory response in patients with bone fractures.

Material and Methods Seventy patients were included in the study between October 2021 and January 2022; of these, 40 had bone fractures and 30 were healthy participants (control group). Calprotectin and lactoferrin were measured by immunosorbent assay.

Results 12 patients (30 %) had open bone fractures while 28 (70 %) had closed bone fractures. The study revealed that levels of serum calprotectin significantly increased in patients with bone fractures as compared to healthy subjects, while lactoferrin exhibited a borderline but not significant increase ($P = 0.06$). Patients with open bone fractures had higher levels of serum calprotectin compared to those with closed fractures ($P = 0.05$). The correlation matrix exhibited that there was a strong positive correlation between calprotectin and lactoferrin in patients with bone fractures.

Discussion Calprotectin is classified as a potent pro-inflammatory marker that has been noted to be elevated in chronic inflammation such as irritable bowel syndrome (IBS), atherosclerotic lesions, different types of arthritis, and immunological rejection. The present study may only confirm an increase in calprotectin in patients with bone fractures. Recently published studies indicate the potential new role of calprotectin in bone healing and fracture risk.

Conclusion High serum calprotectin and lactoferrin indicate a strong inflammatory status in bone fracture patients, especially in those with open fractures.

Keywords: calprotectin, lactoferrin, bone fracture, inflammation

Acknowledgments The authors want to thank the patients and their families for their cooperation during the study period and express their thanks to the staff of the Al-Sadr Medical City, in Najaf City, in Iraq for their support and cooperation during sample collection.

For citation: Amshawee AM, Hussain MAL, Khafel MA, Alhusseini NB, Al-Fahham AA. Role of serum lactoferrin and calprotectin in the inflammatory response in patients with bone fractures. *Genij Ortopedii*. 2025;31(1):6-11. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-6-11.

Научная статья

УДК 616.71-001.5-002-072.5:612.398.12

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-1-6-11>

Роль сывороточного лактоферрина и кальпротектина в воспалительной реакции у пациентов с переломами костей

A.M. Amshawee¹, M.A. Hussain², M.A.L. Khafel³, N.B. Alhusseini⁴, A.A. Al-Fahham^{4✉}¹ Hilla University College, Babylon, Iraq² Al-Furat Al-Awsat Technical University, Iraq³ Al-Zahrawi University College, Karbala, Iraq⁴ University of Kufa, Najaf, Iraq**Автор, ответственный за переписку:** Ali A. Al-Fahham, fahham925@gmail.com

Аннотация

Введение. Повышенная концентрация сывороточного кальпротектина и лактоферрина позволяет сделать прогноз относительно микрососудистых изменений у пациентов с переломом костей.

Цель работы — оценить диагностическую значимость сывороточного кальпротектина и лактоферрина в развитии воспалительной реакции у пациентов с переломом костей.

Материалы и методы. В исследование в период с октября 2021 года по январь 2022 года включены 70 пациентов; из них 40 имели переломы костей и 30 были здоровыми участниками (контрольная группа). Кальпротектин и лактоферрин определяли методом иммуносорбентного анализа.

Результаты. У 12 пациентов (30 %) были открытые переломы костей, а у 28 (70 %) — закрытые. Исследование показало, что уровень сывороточного кальпротектина значительно увеличился у пациентов с переломами костей по сравнению со здоровыми участниками, в то время как лактоферрин показал пограничное, но не значительное увеличение ($P = 0,06$). Пациенты с открытыми переломами костей имели более высокий уровень сывороточного кальпротектина по сравнению с пациентами с закрытыми переломами ($P = 0,05$). Матрица корреляции показала, что существует сильная положительная корреляция между кальпротектином и лактоферрином у пациентов с переломами костей.

Обсуждение. Кальпротектин классифицируется как мощный провоспалительный маркер, повышенный при хроническом воспалении, таком как синдром раздраженного кишечника (СРК), атеросклеротических поражениях, различных видах артрита и иммунологическом отторжении. Настоящее исследование лишь подтверждает повышение уровня кальпротектина у пациентов с переломами костей. Недавно опубликованные исследования указывают на новую потенциальную роль кальпротектина в заживлении костей и риске переломов.

Заключение. Высокий уровень сывороточного кальпротектина и лактоферрина указывает на сильный воспалительный статус у пациентов с переломами костей, особенно при открытых переломах.

Ключевые слова: тотальное эндопротезирование коленного сустава, персонализированное выравнивание, кинематическое выравнивание, механическое выравнивание, артроз коленного сустава

Благодарности. Авторы благодарят пациентов и их семьи за сотрудничество в течение периода исследования и выражают благодарность персоналу медицинского центра Al-Sadr Medical City в городе Наджаф (Ирак) за поддержку и сотрудничество во время сбора образцов.

Для цитирования: Amshawee A.M., Hussain M.A., Khafel M.A.L., Alhusseini N.B., Al-Fahham A.A. Роль сывороточного лактоферрина и кальпротектина в воспалительной реакции у пациентов с переломами костей. *Гений ортопедии*. 2025;31(1):6-11. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-6-11.

INTRODUCTION

Bone fractures are of both clinical and public health major concern. The complexity entails a dependence of a variety and an array of etiologies. Bone fractures manifest as a range in types that are classified either as open or closed fractures. An open fracture is the one in which there is an open wound or break through to the skin near the site of a broken bone; it has higher risk potential for infection while a closed fracture does not break through to the skin.

Healing of bone fractures is biological and can be influenced by several complexities, one of which is the presence of an adaptive immune system. D. Toben et al. stated that without an adaptive immune system the healing of a fracture would be accelerated in an enormous manner, thus providing a potential role for immune modulation in clinical treatments for fractures [1]. Consistent with the finding above, more evidence was also reported that though the inflammatory response is essential to the initial stages of bone healing, too much inflammation inhibits recovery [2]. Dendritic cells and macrophages are immune effector cells expressing a variety of membrane-bound receptors for self-molecules such as calprotectin. In this context, calprotectin is hypothesized to act as an endogenous differentiation biomarker for phagocytes as well as an extrinsic protein complex, hence classified as a DAMP (danger-associated molecular pattern). Serum levels of calprotectin have been shown to be elevated in patients with skeletal damage that reflects vascular damage as well. Bone fractures do indeed elevate serum calprotectin. The serum calprotectin level is dramatically elevated in early OA stages, with a reverse relationship with disease severity [3]. It may thus be proposed as a promising blood-based marker for early knee osteoarthritis (OA).

More recent studies show the potential role that calprotectin might play in bone healing and fracture risk. Special attention is drawn to the modulation of the inflammatory response during bone healing, thereby indicating possible key players expressed during the process of healing, notably discussed being inflammatory cytokines and proteins, like calprotectin [4]. Lactoferrin (Lf) is found in highest concentration in human and mammalian milk, and in smaller amounts in other exocrine fluids (i.e. salivary secretions, semen, tears, gastrointestinal secretions, vaginal secretions) as well. Lf is also synthesized by the hematopoietic tissue of the bone marrow and is present within neutrophil granules [5–6]. It contributes to a variety of physiological processes *in vivo*. Consequently, lactoferrin was capable of decreasing oxidative stress, inflammation, and apoptosis processes, which are the basic pathways involved in the bone inflammatory disorders of different etiologies [6].

The **purpose** of the present study was to assess the diagnostic value of serum calprotectin and lactoferrin in the development of inflammatory response in patients with bone fracture.

MATERIALS AND METHODS

The total number of participants in this research was seventy subjects, forty individuals with bone fractures and thirty apparently healthy control group subjects. It was conducted at the Endocrine Center in Al-Sadr Medical City in Al-Najaf province, Iraq, from June 2023 to February 2024. It was prepared through a questionnaire tool for recording demographic information (age, gender) and type of fracture (open or closed fracture). A 10-ml blood sampling after fasting for 12 hours was done and kept in deep freeze (-20°C) till laboratory measurements were applied and then assayed for calprotectin and lactoferrin by immunosorbent assay kits after separation of serum. Blood samples were taken within 24–28 hours after fracture. Strictly according to manufacturers' instructions (Calprotectin test, Nova Tec, Germany), this is a monoclonal antibody test coated with calibrator directed against polyclonal antibody against calprotectin. Optical density mean value was read in duplicates at 450 nm. The control curve was constructed at different concentrations of calprotectin. Data were analyzed using Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) software, version 25. Analysis was done by descriptive statistics (percentage and frequency) and inferential statistics (t-test and Chi-squared test). Pearson Correlation Coefficient (r) is appropriate for measuring the relationship between quantitative variables.

RESULTS

The current study assessed the demographic characteristics of both patients and control groups. There was no significant variation ($P > 0.05$) in age and gender between patients and healthy groups (Table 1). On the other hand, 12 patients (30 %) had open fractures while 28 (70 %) had closed bone fractures (Fig. 1).

Table 1

Demographic characteristics of patients and control groups

Indicators		Patients (No = 40)		Control (No = 30)		Chi Square	P value (Sig.)
		Freq.	Percent	Freq.	Percent		
Age/Years	20–24	13	32.5	7	35.0	0.05	0.97 (NS)
	25–29	10	25.0	5	25.0		
	30–34	17	42.5	8	40.0		
Gender	Male	23	57.5	8	40.0	1.64	0.20 (NS)
	Female	17	42.5	12	60.0		

Notes: NS — Non-significant at P value > 0.05

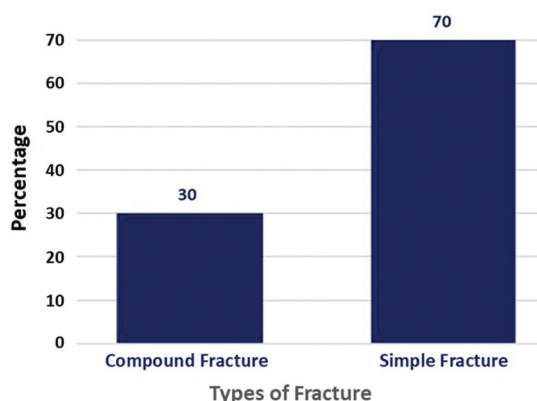


Fig. 1. Classification of patients according to the type of fracture

Serum levels of calprotectin and lactoferrin were evaluated in patients and control groups. The results exhibited a significant increase ($P < 0.05$ in calprotectin ($\mu\text{g/dl}$) in the patients compared to the healthy group (Table 2). The same table shows that there was no significant difference ($P < 0.06$) in lactoferrin ($\mu\text{g/dl}$) in the patients compared to the control group.

Table 2

Differences in calprotectin and lactoferrin between patients and healthy groups

Indicators	Patients (No = 40)		Control (No = 30)		Independent T Test	P value (Sig.)
	Mean	SD	Mean	SD		
Calprotectin, $\mu\text{g/dl}$	68.22	22.37	35.88	10.22	8.09	0.000 (HS)
Lactoferrin, $\mu\text{g/dl}$	10	25.0	5	25.0	1.93	0.06 (NS)

Notes: SD — Standard Deviation; HS — High Significant at P value < 0.01 ; NS — No-Significant at P value > 0.05 .

The inflammatory response in terms of calprotectin and lactoferrin between the patients with open and those with closed fractures was assessed. The results exhibited a significant increase ($P < 0.05$) in calprotectin ($\mu\text{g/dl}$) in patients with open fractures compared to those with closed fractures (Table 3). The same table revealed that there was no significant difference ($P < 0.06$) in lactoferrin ($\mu\text{g/dl}$) in patients with open and closed fractures. The correlation test was achieved with the Pearson correlation coefficient (r) after assessing the normality of data. There was a high positive significant correlation ($P < 0.01$) between serum lactoferrin and calprotectin ($r = 0.522$), as shown in Figure 2.

Table 3

Differences in calprotectin and lactoferrin between patients with compound and simple fractures

Indicators	Compound Fracture (No = 12)		Simple Fracture (No = 28)		Independent T Test	P value (Sig.)
	Mean	SD	Mean	SD		
Calprotectin, $\mu\text{g/dl}$	70.41	6.33	66.03	5.13	2.05	0.05 (S)
Lactoferrin, $\mu\text{g/dl}$	9.78	4.55	8.01	1.29	1.32	0.21 (NS)

Notes: SD — Standard Deviation; NS — No-Significant at P value; S — Significant at P value < 0.05 .

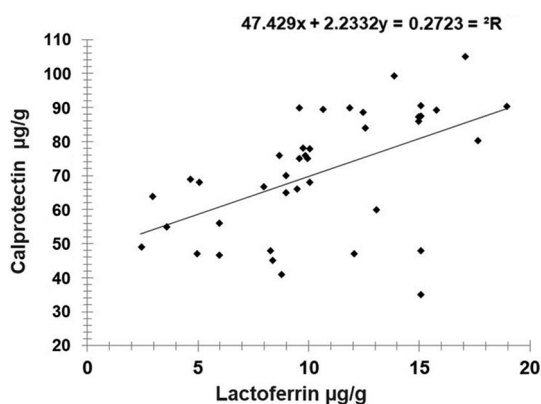


Fig. 2. Scatter plot and regression equation between calprotectin and lactoferrin

DISCUSSION

Calprotectin is made up of two proteins subunits bound to calcium ion (S100A8 & S100A9) from where calprotectin is derived. Calprotectin is classified as a potent proinflammatory marker that has been noted to be elevated in chronic inflammation such as irritable bowel syndrome (IBS), atherosclerotic lesions, different

types of arthritis, and immunological rejection [5]. The present study, however, may only confirm an increase in calprotectin in patients with bone fractures.

Recently published studies indicate the potential new role of calprotectin in bone healing and fracture risk. It was noted that during modulation of the inflammatory response in bone healing process, the indicators of inflammatory cytokines and proteins are critical and the role played by calprotectin seems fundamental [4]. The same view is shared by a recent study that went even further to explain how aging and inflammation change behavior of stem cells and herefore impact bone healing hence the high levels of calprotectin could also be a reason for retarded bone repair [7]. It was recommended that inflammatory biomarkers, such as calprotectin, may be used as predictors for complications in the healing process in long bone fracture non-union, delayed union, mal-union. It can have an impact on making clinical decisions. In other words, this relationship therefore infers that monitoring the levels of calprotectin would show how the status of fracture healing is going on [8].

The particular mechanisms through which calprotectin may influence bone health are still under study, along with the studies on how mechanical loading and biological factors regulate bone remodeling [9]. In this sense, inflammatory biomarkers like calprotectin might modulate bone remodeling as indicated by the relatedness to some biochemical bone turnover markers [10]. One integration into the future may be the results from studies on genetic and clinical determinants of fracture risk. It is emphasized that fracture risk assessment is complex and may one day include inflammatory biomarkers, such as calprotectin. Integration such as this would enhance the model's precision in calculating an individual's probability of fracturing, which is of particular value in high prevalence populations with systemic inflammation [10].

In the present study, the levels of lactoferrin were not significantly different compared to the controls, though the p -value in question was at the borderline level (< 0.06). This may be because lactoferrin has been found to influence several cellular processes in relation to bone healing. Thus, it is underlined that coupling angiogenesis with osteogenesis during repair of bone fractures is crucial. This is an important step toward supplying the healing tissue with blood; where lactoferrin may have a role through effects on inflammatory processes and cellular differentiation. First of all, lactoferrin potentially affects this linkage because of the promotion of new types of floras or blood vessel growth shapes and bone [11]. Secondly, where one of the contributing factors is better understood, lactoferrin is set to play a role as well since macrophages are understood to contribute to bone healing by enhancing osteoblastic differentiation and playing a critical role in endochondral ossification. Such immunomodulatory effects by lactoferrin would reasonably enhance activity by macrophages to allow more effective bone regeneration. Indeed, lactoferrin may not act alone but may interact with other bio-molecules during bone healing [12–13]. For instance, materials that promote bone regeneration could be developed to work in synergy with the properties of lactoferrin for better healing [14].

A study on cell therapy of delayed unions leaves open the possibility that appropriate combination of lactoferrin with cellular therapies may also allow improvement to be obtained where nonunion fractures are found [15].

The other is bone healing under hypoxic conditions. Results from previous studies proved that hypoxic mesenchymal stem cell exosomes could drive the healing of fractures. There might be possible complicated interactions between lactoferrin and exosomal miR-126 transfer in future studies, especially to explicate how lactoferrin may enhance efficacy of stem cell therapies during fracture healing. Lactoferrin acts not only in antimicrobial protection but in provision of homeostasis related to intractable inflammation and iron metabolism — two pathways directly pertinent to situations of bone healing [16]. An informative review paper clearly described the structure and functions of lactoferrin that determine its important role in control over inflammation and maintenance of iron homeostasis, essential preconditions for optimal healing of fractures [17].

Previous studies indicated that patients suffering from conditions such as infections have high elastase levels, which degrade lactoferrin; hence the doses for individuals with severe conditions could be heightened. The present study revealed that there was a significant positive correlation between lactoferrin and calprotectin, several researchers have noted the positivity between lactoferrin and calprotectin in different inflammatory conditions. Thus, both markers showed a significant positive relationship with endoscopic scores among Crohn's patients (calprotectin, $p = 0.0001$; lactoferrin, $p = 0.038$), indicating their importance in evaluating disease activity [18].

Another study reported a high correlation between fecal levels of lactoferrin and calprotectin, with $r^2 = 0.74$; thus, the two biomarkers may act as complementary indicators of inflammation [19]. Lactoferrin and calprotectin were also valid to differentiate various disease states for mucosal healing independent of clinical symptoms in patients with ulcerative colitis by using fecal biomarkers [20]. This means these two biomarkers both have perspective as noninvasive indices in monitoring inflammatory activity.

CONCLUSION

It was concluded that high serum calprotectin and lactoferrin indicated a strong inflammatory status in patients with bone fractures. Patients with open fractures exhibited higher inflammatory response in terms of calprotectin compared to patients with closed fractures.

Conflict of interests None.

Funding None.

Ethical approval This case-control study was approved by the medical ethics committee at the Faculty of Medicine/Kufa University (Reference#: MEC-16 on June 21, 2022).

REFERENCES

1. Toben D, Schroeder I, El Khassawna T, et al. Fracture healing is accelerated in the absence of the adaptive immune system. *J Bone Miner Res.* 2011;26(1):113-124. doi: 10.1002/jbmr.185.
2. Rupp M, Biehl C, Budak M, et al. Diaphyseal long bone nonunions – types, aetiology, economics, and treatment recommendations. *Int Orthop.* 2018;42(2):247-258. doi: 10.1007/s00264-017-3734-5.
3. Safa A, Bagherifard A, Hadi Al-Baseesee H, et al. Serum Calprotectin as a Blood-Based Biomarker for Monitoring Knee Osteoarthritis at Early but Not Late Stages. *Cartilage.* 2021;13(1 suppl):1566S-1571S. doi: 10.1177/1947603520961161.
4. Maruyama M, Rhee C, Utsunomiya T, et al. Modulation of the Inflammatory Response and Bone Healing. *Front Endocrinol (Lausanne).* 2020;11:386. doi: 10.3389/fendo.2020.00386.
5. Cao X, Ren Y, Lu Q, et al. Lactoferrin: A glycoprotein that plays an active role in human health. *Front Nutr.* 2023;9:1018336. doi: 10.3389/fnut.2022.1018336.
6. Kell DB, Heyden EL, Pretorius E. The Biology of Lactoferrin, an Iron-Binding Protein That Can Help Defend Against Viruses and Bacteria. *Front Immunol.* 2020;11:1221. doi: 10.3389/fimmu.2020.01221.
7. Gibon E, Lu L, Goodman SB. Aging, inflammation, stem cells, and bone healing. *Stem Cell Res Ther.* 2016;7:44. doi: 10.1186/s13287-016-0300-9.
8. Ekegren CL, Edwards ER, de Steiger R, Gabbe BJ. Incidence, Costs and Predictors of Non-Union, Delayed Union and Mal-Union Following Long Bone Fracture. *Int J Environ Res Public Health.* 2018;15(12):2845. doi: 10.3390/ijerph15122845.
9. Wang L, You X, Zhang L, et al. Mechanical regulation of bone remodeling. *Bone Res.* 2022;10(1):16. doi: 10.1038/s41413-022-00190-4.
10. Trajanoska K, Morris JA, Oei L, et al. Assessment of the genetic and clinical determinants of fracture risk: genome wide association and mendelian randomisation study. *BMJ.* 2018;362:k3225. doi: 10.1136/bmj.k3225.
11. Kusumbe AP, Ramasamy SK, Adams RH. Coupling of angiogenesis and osteogenesis by a specific vessel subtype in bone. *Nature.* 2014;507(7492):323-328. doi: 10.1038/nature13145.
12. Schlundt C, El Khassawna T, Serra A, et al. Macrophages in bone fracture healing: Their essential role in endochondral ossification. *Bone.* 2018;106:78-89. doi: 10.1016/j.bone.2015.10.019.
13. Vi L, Baht GS, Whetstone H, et al. Macrophages promote osteoblastic differentiation in-vivo: implications in fracture repair and bone homeostasis. *J Bone Miner Res.* 2015;30(6):1090-1102. doi: 10.1002/jbmr.2422.
14. Jeong J, Kim JH, Shim JH, et al. Bioactive calcium phosphate materials and applications in bone regeneration. *Biomater Res.* 2019;23:4. doi: 10.1186/s40824-018-0149-3.
15. Gómez-Barrena E, Rosset P, Lozano D, et al. Bone fracture healing: cell therapy in delayed unions and nonunions. *Bone.* 2015;70:93-101. doi: 10.1016/j.bone.2014.07.033.
16. Liu W, Li L, Rong Y, et al. Hypoxic mesenchymal stem cell-derived exosomes promote bone fracture healing by the transfer of miR-126. *Acta Biomater.* 2020;103:196-212. doi: 10.1016/j.actbio.2019.12.020.
17. Wang B, Timilsena YP, Blanch E, Adhikari B. Lactoferrin: Structure, function, denaturation and digestion. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 2019;59(4):580-596. doi: 10.1080/10408398.2017.1381583.
18. Novak G, Parker C, Pai R, et al. Histologic scoring indices for evaluation of disease activity in Crohn's disease. *Cochrane Database Syst Rev.* 2017;7(7):CD012351. doi: 10.1002/14651858.CD012351.pub2.
19. Yamamoto T, Shiraki M, Bamba T, et al. Fecal calprotectin and lactoferrin as predictors of relapse in patients with quiescent ulcerative colitis during maintenance therapy. *Int J Colorectal Dis.* 2014;29(4):485-491. doi: 10.1007/s00384-013-1817-3.
20. Yamamoto T, Shiraki M, Bamba T, et al. Faecal calprotectin and lactoferrin as markers for monitoring disease activity and predicting clinical recurrence in patients with Crohn's disease after ileocolonic resection: A prospective pilot study. *United European Gastroenterol J.* 2013;1(5):368-374. doi: 10.1177/2050640613501818.

The article was submitted 27.09.2024; approved after reviewing 10.10.2024; accepted for publication 10.12.2024.

Статья поступила 27.09.2024; одобрена после рецензирования 10.10.2024; принята к публикации 10.12.2024.

Information about the authors:

Ahmed M. Amshawee — MD, ahmed.mekki9@yahoo.com, <https://orcid.org/0009-0007-5016-5697>;

Maryam A. Hussain — MD, maryamali94914@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-8958-8079>;

Mohannad A.L. Khafel — MD, mohannadbalkareem5@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-3772-0073>;

Nabaa Basim Alhusseini — MD, nabaab.aljerio@uokufa.edu.iq, <https://orcid.org/0009-0009-4296-1516>;

Ali A. Al-Fahham — Professor, fahham925@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-2108-1668>.

Научная статья

УДК 616.728.3-007.248-089.843-77

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-1-12-18>

Влияние принципа персонализированного выравнивания на положение компонентов эндопротеза при тотальном эндопротезировании коленного сустава

В.В. Кузин, А.В. Кузин, А.В. Германов, М.А. Шпак✉

Городская клиническая больница № 1 им. Н.И. Пирогова, Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Мария Алексеевна Шпак, ShpakMA1@zdrav.mos.ru

Аннотация

Введение. Недовольство пациентов результатами эндопротезирования коленного сустава с использованием метода выравнивания по механической оси бедренной кости привели к поиску других технологий. Наиболее популярным оказался метод кинематического выравнивания, не опирающегося на механическую ось бедренной кости, развитие которого привело к появлению персонализированного выравнивания.

Цель работы — сравнительная оценка положения компонентов эндопротеза коленного сустава после тотального эндопротезирования методами механического и персонализированного выравниваний.

Материалы и методы. Проведено проспективное одноцентровое рандомизированное контролируемое исследование 159 пациентов с остеоартрозом коленного сустава III–IV степени по Kellgren и Lawrence. Метод выравнивания по механическим осям применен у 76 больных (66 женщин и 10 мужчин), персонализированное выравнивание — в 83 случаях (60 женщин и 23 мужчины). У пациентов обеих групп не было анатомических, функциональных и иных отличий, способных повлиять на результаты исследования. Оценку положения компонентов эндопротезов и осей конечностей проводили на цифровых панорамных рентгенограммах нижних конечностей с использованием компьютерной программы MediCAD.

Результаты. Положения компонентов эндопротеза после операций с применением механического и персонализированного выравниваний по многим параметрам не имеют существенных отличий, несмотря на то, что их позиционирование проводили на основе совершенно разных принципов. Отсутствовали различия между средними значениями углов после операций с механической и анатомической осями бедренной кости в обеих группах исследований (разница составила $0,1^\circ$ при $p = 0,595$). Единственным отличием в группах было положение тибияльного компонента эндопротеза по отношению к горизонтальной поверхности в положении стоя: при персонализированном выравнивании угол составил $0,9^\circ$, а при механическом выравнивании — $2,4^\circ$ на вальгус ($p < 0,001$).

Обсуждение. Отсутствие значимых различий по основным параметрам положения компонентов эндопротеза и восстановления нормальной оси конечности (НКА угол достоверно не отличается в обеих группах) говорит о том, что персонализированное выравнивание позволяет достичь во время операции тех же пространственных показателей нижней конечности, что и механическое. Расположение линии сустава в положении стоя, более близкое к горизонтальному, указывает на более выгодное распределение нагрузок на тибияльный компонент эндопротеза при персонализированном выравнивании по сравнению с механическим.

Заключение. При использовании персонализированного выравнивания во время тотального эндопротезирования коленного сустава ось послеоперационной нижней конечности исследованных пациентов не выходила за безопасный диапазон 3° от механической оси, а положение суставной линии во фронтальной оси в положении стоя было значительно ближе к параллели с полом, чем при применении выравнивания по механическим осям.

Ключевые слова: тотальное эндопротезирование коленного сустава, персонализированное выравнивание, кинематическое выравнивание, механическое выравнивание, артроз коленного сустава

Для цитирования: Кузин В.В., Кузин А.В., Германов А.В., Шпак М.А. Влияние принципа персонализированного выравнивания на положение компонентов эндопротеза при тотальном эндопротезировании коленного сустава. *Гений ортопедии*. 2025;31(1):12-18. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-12-18.

Original article

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-1-12-18>

Impact of personalized alignment technique on implant components position in total knee arthroplasty

V.V. Kuzin, A.V. Kuzin, A.V. Germanov, M.A. Shpak✉

Pirogov City Clinical Hospital No 1, Moscow, Russian Federation

Corresponding author: Maria A. Shpak, ShpakMA1@zdrav.mos.ru

Abstract

Introduction Due to substantial rates of dissatisfaction in patients with mechanical alignment in total knee replacement, surgeons began searching for alternative techniques to improve functional outcome. In the recent decade, kinematic alignment that is not based on the mechanical axis of the femur has become the most popular alternative to mechanical alignment. Kinematic alignment technique development has led to creation of a personalized alignment technique.

Purpose To compare postoperative implant positions in full-length standing lower-leg radiographs between kinematic alignment and mechanical alignment groups of patients.

Materials and methods A prospective, single-center, randomized, controlled study was performed in 139 patients with grade 3–4 knee osteoarthritis (Kellgren – Lawrence). We collected data from 76 cases of mechanical alignment (66 women and 10 men) and 83 cases of personalized alignment group (60 women and 23 men). There were no patients with significant post-traumatic or other deformities of the lower limb which can alter the results in the study. All measurements were done on digital full-length standing X-rays of the lower legs with special MediCAD software.

Results The positions of the implant components in mechanical and personalized alignments did not differ significantly in many parameters after operations, despite the fact that the alignment was based on completely different principles. There were no differences between the average values of the angles after operations with mechanical and anatomical axes of the femur in both study groups (the difference was 0.1° at $p = 0.595$). The only difference in the groups was the position of the tibial component in relation to the horizontal surface in the standing position: in personalized alignment, the angle was 0.9° , and in mechanical alignment it was 2.4° valgus ($p < 0.001$).

Discussion The absence of significant difference in the postoperative leg alignment and implant position except in the joint line orientation between the groups demonstrates possibility to achieve good leg alignment with both techniques. In the personalized alignment group, the joint line orientation in the coronal plane was found nearly parallel to the ground which can result in a more balanced weight distribution compared to mechanical alignment.

Conclusion In patients who receive total knee replacement with the personalized technique, the postoperative lower limb alignment was found within the safe boundaries of 3° from the mechanical axis while the joint line orientation in the coronal plane was significantly closer to be parallel with the ground compared with mechanical alignment group.

Keywords: total knee arthroplasty, personalized alignment, kinematic alignment, mechanical alignment, knee osteoarthritis

For citation: Kuzin VV, Kuzin AV, Germanov AV, Shpak MA. Impact of personalized alignment technique on implant components position in total knee arthroplasty. *Genij Ortopedii*. 2025;31(1):12-18. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-12-18.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие в мировом ортопедическом сообществе всё больший интерес вызывают альтернативные методы выравнивания нижней конечности при тотальном эндопротезировании коленного сустава, приходящие на смену классической методике механического выравнивания [1, 2]. Предлагаются другие техники, в частности кинематическое выравнивание [3, 4, 5], которые демонстрируют значительное улучшение функциональных результатов [6–15].

Среди сторонников традиционного механического выравнивания находится немало противников кинематического выравнивания. Их главным аргументом является то, что у пациентов после операции из-за «неправильной позиции компонентов эндопротеза» остаются деформации конечности, возникшие на фоне развития заболевания [16–20], и что такая установка компонентов неминуемо окажет отрицательное влияние на сроки эксплуатации эндопротеза и увеличит частоту ревизий [21, 22].

Сторонники кинематического выравнивания, принимая во внимание значительную вариабельность анатомии пациентов, считают, что попытки достижения одинаковых осей конечности и суставной линии для всех пациентов при использовании механического выравнивания могут значительно нарушить распределение нагрузок в суставе, что, в свою очередь, может влиять на клинический результат [23–27].

Цель работы — сравнительная оценка положения компонентов эндопротеза коленного сустава после тотального эндопротезирования методами механического и персонализированного выравниваний.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проанализированы 76 случаев (66 женщин и 10 мужчин) применения метода выравнивания по механическим осям (первая группа) и 83 случая (60 женщин и 23 мужчины) персонализированного выравнивания (вторая группа). Пациентам первой группы операцию проводили по общепринятым методикам с релизом мягких тканей и наружной ротацией бедренного компонента. Во второй группе операцию проводили с использованием авторского метода персонализированного выравнивания, основанного на принципе кинематического выравнивания и подробно изложенного в патенте РФ на изобретение [27].

Критерии включения: возраст не менее 18 лет, наличие клинически и инструментально подтвержденного гонартроза III–IV степени, наличие письменного информированного согласия пациента на участие в исследовании.

Критерии не включения: возраст менее 18 лет, отсутствие клинически и инструментально подтвержденного диагноза гонартроза, наличие тяжелой сопутствующей патологии, ставшей причиной отказа от хирургического лечения (некомпенсированный сахарный диабет, острое нарушение мозгового кровообращения и острый инфаркт миокарда, перенесенные менее чем за 4 мес.).

Критерии исключения: отказ пациента от дальнейшего участия в исследовании, смена места жительства (переезд пациента в другой регион РФ), развившиеся в послеоперационном периоде инфекционные осложнения, потребовавшие повторного оперативного вмешательства.

Пациенты перед операцией и через 3 мес. после нее заполняли опросники KOOS и Oxford, в те же сроки им оценивали объем движений в оперированном суставе.

Исследованы положение компонентов эндопротеза и параметры выравнивания конечности на панорамных рентгенограммах с помощью программы MediCAD (Hectec GmbH, Германия). Во фронтальной плоскости оценивали следующие параметры: НКА угол — угол между механической осью бедренной и механической осью большеберцовой костей, угол между линией сустава и горизонтальной поверхностью пола, угол наклона большеберцового компонента эндопротеза к механической оси большеберцовой кости (90° — mMPТА) и угол между механической и анатомическими осями бедренной кости (рис. 1). Необходимо отметить, что оценку результатов положения компонентов эндопротеза осуществляли с помощью программы MediCAD автоматически, и влияние исследователей на результаты было исключено.

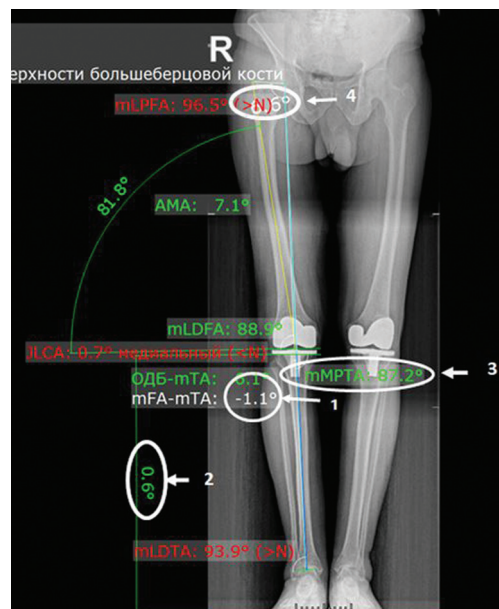


Рис. 1. Оценка результатов тотального эндопротезирования коленного сустава с помощью программы mediCAD: 1 — НКА угол между механической осью бедренной и большеберцовой костей; 2 — угол между линией вновь образованного сустава и полом; 3 — угол отклонения тибияльного компонента от механической оси большеберцовой кости; 4 — угол между механической и анатомическими осями бедренной кости

Панорамные рентгенограммы выполняли в сроки не менее 3 мес. после операции. При постановке пациента на платформу мы отказались от рекомендуемого расстояния 30 см между стопами, так как для человека ростом 150 см и 190 см — это совершенно разная по удобству постановка ног. Рекомендуемое расстояние нормально для высокого человека, но для низкого человека ноги слишком широко расставлены, что при очень полных ногах нередко бывает невозможным. Поэтому пациенты устанавливали ноги на платформе в комфортном для себя положении.

При оценке исходного состояния перед операцией пациенты обеих исследуемых групп имели достоверные отличия только по возрасту и средним срокам контрольного осмотра после операции. По всем остальным параметрам пациенты обеих групп были идентичны (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики пациентов до операции

Показатели	Первая группа	Вторая группа	p
	механическое выравнивание	персонализированное выравнивание	
BMI, Ме [IQR]	32,30 [28,62; 34,92]	33,39 [27,70; 35,48]	0,701
Возраст (лет), М (SD)	64 (8)	67 (8)	0,019*
Сроки между операцией и осмотром (мес.), Ме [IQR]	24 [4; 53]	7 [3; 11]	< 0,001*
КС Оксфорд до опер., Ме [IQR]	17,00 [12,00; 20,00]	17,00 [13,00; 22,00]	0,192
КОOS S д/о, Ме [IQR]	36,00 [25,00; 46,00]	36,00 [25,00; 46,00]	0,638
Д/о объём движений (градус), Ме [IQR]	95 [90; 100]	95 [90; 105]	0,743

Операции с ориентацией на механические оси проводили по стандартной методике. Балансировку суставов осуществляли путём релиза мягких тканей. При предоперационном планировании измеряли угол между механической и анатомической осью бедренной кости с помощью специальных шаблонов или путём планирования в программе MediCAD. Целью планирования была оценка общего состояния оперированного сустава, величины дефектов хряща и костной ткани, состояния связочного аппарата сустава.

При выполнении исследования использовали систему захвата движений Vicon, стабилметрическую платформу Neurocor. Статистическую обработку результатов осуществляли с помощью программы StatTech v. 4.1.7 (ООО «Статтех», Россия).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализируя результаты проведённого исследования, мы в первую очередь обратили внимание на то, что отклонение механических осей бедренной и большеберцовой костей оперированной конечности не имели отличий между пациентами разных групп. Углы наклона тибиального компонента эндопротеза в группах механического и персонализированного выравнивания также не имели статистически значимых отличий (табл. 2).

Таблица 2

Выравнивание конечности и положение компонентов эндопротеза после операции в положении стоя

Показатели	Первая группа	Вторая группа	p
	механическое выравнивание	персонализированное выравнивание	
НКА (градус), М (SD)	-2,3 (3,4)	-2,8 (3,2)	0,391
Факт. Q угол (градус), Ме [IQR]	6,4 [5,9; 7,1]	6,5 [6,1; 7,1]	0,595
Гориз. угол (градус), Ме [IQR]	2,4 [0,6; 4,3]	0,9 [-0,3; 1,8]	< 0,001*
Т варус (градус), Ме [IQR]	-0,5 [-2,2; 1,1]	-2,2 [-3,8; 1,7]	0,114

На послеоперационных рентгенограммах угол между механической и анатомической осями бедренной кости (Q угол) имел крайне незначительные отличия между двумя группами пациентов. В первой группе пациентов, прооперированных методом механического выравнивания, перед операцией в процессе планирования определяли Q угол с помощью транспортира или в программе MediCad. Во второй группе больных (с персонализированным выравниванием) предоперационное планирование заключалось в оценке степени износа хряща, субхондральной кости, выраженности остеофитов.

Определение соотношений осей нижней конечности не производили. Разница средних значений Q угла между группами была статистически не значима и составила всего 0,1°.

Наиболее важным в положении компонентов в исследуемых группах больных было существенное отличие углов наклона суставной линии эндопротеза по отношению к горизонтали. Угол наклона плоскости сустава в группе с персонализированным выравниванием был значительно меньше,

чем в группе пациентов, которым была выполнена операция с ориентацией на механические оси ($0,9^\circ$ и $2,4^\circ$ соответственно, $p < 0,001$) (рис. 2).

Существенным отличием явилось то, что при использовании персонализированного метода выравнивания допустимый объём движений в коленном суставе оказался существенно больше, чем при механическом выравнивании (рис. 3).

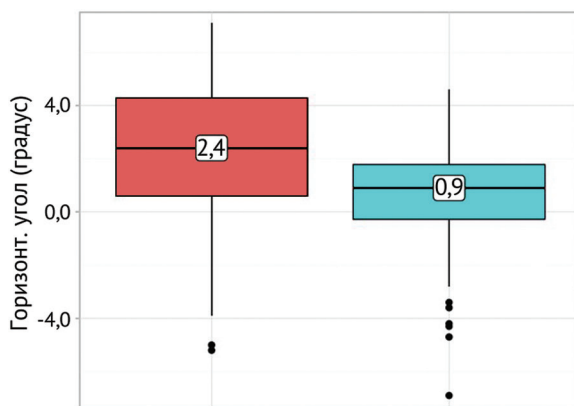


Рис. 2. Наклон линии сустава по отношению к горизонтальной поверхности в положении стоя

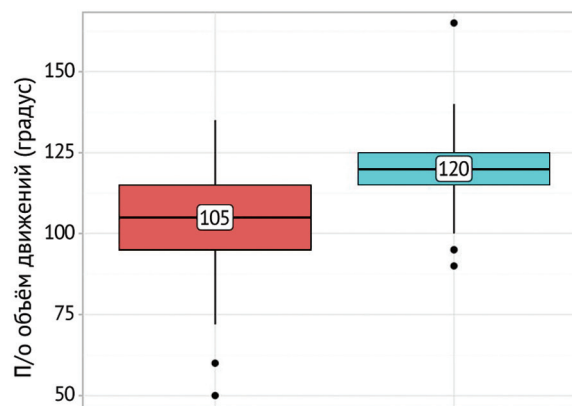


Рис. 3. Средний объём движений в сроки не меньше, чем 3 мес. после операции

ОБСУЖДЕНИЕ

Позиционирование компонентов в двух группах проводили на основе совершенно разных принципов. Несмотря на это, сравнение положения компонентов после операций с применением механического и персонализированного выравнивания не выявило существенных отличий. Определяемая перед операцией у пациентов первой группы механическая ось бедренной кости являлась отправной точкой, от которой шло последующее построение нового сустава. При персонализированном выравнивании перед операцией и во время нее оценивали степень износа сустава и связочный баланс. Необходимо подчеркнуть, что пациенты обеих групп статистически не имели отличий по всем параметрам, в том числе по степени тяжести патологического процесса.

Отсутствие отличий в результатах послеоперационной оценки НКА демонстрирует достаточную коррекцию оси конечности при использовании персонализированного выравнивания. Послеоперационная ось конечности находится в том же диапазоне, что и при операциях, выполненных с механическим выравниванием. Аналогичные результаты получены при оценке положения тибialного компонента по отношению к анатомической оси большеберцовой кости: статистически достоверной разницы между группами не выявлено.

Особый интерес вызвал факт отсутствия разницы в углах между механической и анатомической осями бедренной кости (т.н. Q угол). В операциях с ориентацией на механическую ось этот угол является «краеугольным камнем» и первым, что определяют при предоперационном планировании. Всё может поменяться во время операции, но только Q угол останется неизменным. В процессе предоперационного планирования при персонализированном выравнивании Q угол нас не интересовал, мы его не определяли и, соответственно, никак его не учитывали. Однако отличие между группами составило $0,1^\circ$ и было статистически не достоверным ($p = 0,595$). Полноценного, научно обоснованного объяснения, мы не нашли. Возможно, при значительно большей выборке пациентов данные будут иметь больше отличий. Определяемая при предоперационном планировании механическая ось бедренной кости соответствовала реальной оси конечности у большинства пациентов и оставалась неизменной при персонализированном принципе выравнивания.

Единственным и наиболее значимым отличием стала разница в положении тибialного компонента и линии вновь созданного сустава по отношению к горизонтальной поверхности в положении стоя. При механическом выравнивании средний угол наклона линии сустава в вальгусное положение составил $2,4^\circ$, а при персонализированном — $0,9^\circ$ на вальгус при высокой статистической значимости различий ($p < 0,001$). Схожие данные описаны и другими авторами [28]. Этот результат говорит о том, что линия коленного сустава после тотального эндопротезирования с персонализированным принципом выравнивания достоверно ближе к норме $2-3^\circ$ на варус, чем при выполнении операции с ориентацией на механические оси, и не приводит к перегрузке медиальных отделов вновь созданного сустава [29].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что большинство параметров положения компонентов эндопротеза при тотальном эндопротезировании коленного сустава не зависит от принципов выравнивания, персонализированного или механического. Главное отличие заключается в том, что при персонализированном выравнивании в положении стоя линия воссозданного сустава достоверно больше соответствует линии здорового сустава, что может объяснить лучшие функциональные результаты после тотального эндопротезирования коленного сустава, широко представленные в литературе.

Конфликт интересов. Не заявлен.

Источник финансирования. Исследование проводилось в рамках реализации Гранта Правительства Москвы.

Этическая экспертиза. На исследование получено согласие этического комитета ГКБ № 1.

Информированное согласие. Перед началом исследования каждый пациент заполнил информированное согласие на проведение исследования и публикацию результатов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Кузин В.В., Загородний Н.В., Кузин А.В. О неизбежности выравнивания конечности по механической оси бедренной кости при тотальном эндопротезировании коленного сустава. *Медицинский вестник МВД*. 2024;(3):6-12. doi: 10.52341/20738080.2024.130.3.6.
- Bull AM, Kessler O, Alam M, Amis AA. Changes in knee kinematics reflect the articular geometry after arthroplasty. *Clin Orthop Relat Res*. 2008;466(10):2491-249. doi: 10.1007/s11999-008-0440-z.
- Rivière C, Iranpour F, Harris S, et al. The kinematic alignment technique for TKA reliably aligns the femoral component with the cylindrical axis. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2017;103(7):1069-1073. doi: 10.1016/j.otsr.2017.06.016.
- Howell SM. Calipered Kinematically Aligned Total Knee Arthroplasty: An Accurate Technique That Improves Patient Outcomes and Implant Survival. *Orthopedics*. 2019;42(3):126-135. doi: 10.3928/01477447-20190424-02.
- Nedopil AJ, Howell SM, Hull ML. Kinematically Aligned Total Knee Arthroplasty Using Calipered Measurements, Manual Instruments, and Verification Checks. 2020 Jul 1. In: Rivière C, Vendittoli PA. (eds.) *Personalized Hip and Knee Joint Replacement [Internet]*. Cham (CH): Springer; 2020. Chapter 24. doi: 10.1007/978-3-030-24243-5_24.
- Wang G, Chen L, Luo F, et al. Superiority of kinematic alignment over mechanical alignment in total knee arthroplasty during medium- to long-term follow-up: A meta-analysis and trial sequential analysis. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2024;32(5):1240-1252. doi: 10.1002/ksa.12093.
- McEwen PJ, Daska CE, Jovanovic IA, et al. Computer-Assisted Kinematic and Mechanical Axis Total Knee Arthroplasty: A Prospective Randomized Controlled Trial of Bilateral Simultaneous Surgery. *J Arthroplasty*. 2020;35(2):443-450. doi: 10.1016/j.arth.2019.08.064.
- Howell SM, Hull ML, Nedopil AJ, Rivière C. Caliper-Verified Kinematically Aligned Total Knee Arthroplasty: Rationale, Targets, Accuracy, Balancing, Implant Survival, and Outcomes. *Instr Course Lect*. 2023;72:241-259.
- Davis KR, Soti V. Effectiveness of Kinematic Alignment-Total Knee Arthroplasty in Treating Preoperative Varus and Valgus Deformities in Patients With Knee Osteoarthritis. *Cureus*. 2024;16(1):e53230. doi: 10.7759/cureus.53230.
- Sarzaeem MM, Movahedinia M, Mirahmadi A, et al. Kinematic Alignment Technique Outperforms Mechanical Alignment in Simultaneous Bilateral Total Knee Arthroplasty: A Randomized Controlled Trial. *J Arthroplasty*. 2024;39(9):2234-2240. doi: 10.1016/j.arth.2024.03.045.
- Hiranaka T, Suda Y, Saitoh A, et al. Current concept of kinematic alignment total knee arthroplasty and its derivatives. *Bone It Open*. 2022;3(5):390-397. doi: 10.1302/2633-1462.35.BJO-2022-0021.R2.
- Liu B, Feng C, Tu C. Kinematic alignment versus mechanical alignment in primary total knee arthroplasty: an updated meta-analysis of randomized controlled trials. *J Orthop Surg Res*. 2022;17(1):201. doi: 10.1186/s13018-022-03097-2.
- Elbuluk AM, Jerabek SA, Suhardi VJ, et al. Head-to-Head Comparison of Kinematic Alignment Versus Mechanical Alignment for Total Knee Arthroplasty. *J Arthroplasty*. 2022;37(8S):S849-S851. doi: 10.1016/j.arth.2022.01.052.
- Лычагин А.В., Рукин Я.А., Грицюк А.А., Чжэной Пан. Влияние баланса сгибательно-разгибательного промежутка при первичном тотальном эндопротезировании колена на функцию сустава. *Гений Ортопедии*. 2023;29(2):159-166. doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-2-159-166.
- Shelton TJ, Gill M, Athwal G, et al. Outcomes in Patients with a Calipered Kinematically Aligned TKA That Already Had a Contralateral Mechanically Aligned TKA. *J Knee Surg*. 2021;34(1):87-93. doi: 10.1055/s-0039-1693000.
- Begum FA, Kayani B, Magan AA, et al. Current concepts in total knee arthroplasty : mechanical, kinematic, anatomical, and functional alignment. *Bone It Open*. 2021;2(6):397-404. doi: 10.1302/2633-1462.26.BJO-2020-0162.R1.
- Rivière C, Harman C, Boughton O, Cobb J. The kinematic alignment technique for total knee arthroplasty. In: Rivière C, Vendittoli P-A. (eds.) *Personalized Hip and Knee Joint Replacement*. Cham (CH): Springer; 2020:175-195. doi: 10.1007/978-3-030-24243-5_16.
- Lustig S, Sappey-Marinière E, Fary C, et al. Personalized alignment in total knee arthroplasty: current concepts. *SICOT J*. 2021;7:19. doi: 10.1051/sicotj/2021021.
- Sterneder CM, Faschingbauer M, Haralambiev L, et al. Why Kinematic Alignment Makes Little Sense in Valgus Osteoarthritis of the Knee: A Narrative Review. *J Clin Med*. 2024;13(5):1302. doi: 10.3390/jcm13051302.
- Shatrov J, Batailler C, Sappey-Marinière E, et al. Kinematic alignment fails to achieve balancing in 50% of varus knees and resects more bone compared to functional alignment. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2022;30(9):2991-2999. doi: 10.1007/s00167-022-07073-5.
- Streck LE, Faschingbauer M, Brenneis M, et al. Individual Phenotype Does Not Impact the Outcome of Mechanical Aligned Total Knee Arthroplasties for Valgus Osteoarthritis. *Medicina (Kaunas)*. 2023;59(10):1852. doi: 10.3390/medicina59101852.
- Гиркало М.В., Щаницын И.Н., Островский В.В. Анализ причин ревизионных артропластик коленного сустава. *Гений ортопедии*. 2024;30(3):327-336. doi: 10.18019/1028-4427-2024-30-3-327-336.
- Winnock de Grave P, Van Criekinge T, Luyckx T, et al. Restoration of the native tibial joint line obliquity in total knee arthroplasty with inverse kinematic alignment does not increase knee adduction moments. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2023;31(11):4692-4704. doi: 10.1007/s00167-023-07464-2.
- Trepczynski A, Moewis P, Damm P, et al. Dynamic Knee Joint Line Orientation Is Not Predictive of Tibio-Femoral Load Distribution During Walking. *Front Bioeng Biotechnol*. 2021;9:754715. doi: 10.3389/fbioe.2021.754715.
- Kour RYN, Guan S, Dowsey MM, Choong PF, Pandey MG. Kinematic function of knee implant designs across a range of daily activities. *J Orthop Res*. 2023;41(6):1217-1227. doi: 10.1002/jor.25476.

26. Blakeney W, Clément J, Desmeules F, Hagemeister N, Rivière C, Vendittoli PA. Kinematic alignment in total knee arthroplasty better reproduces normal gait than mechanical alignment. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2019;27(5):1410-1417. doi: 10.1007/s00167-018-5174-1.
27. Кузин В.В., Кузин А.В., Германов А.В. Способ персонализированного тотального эндопротезирования коленного сустава. Патент РФ на изобретение № 2823533. 23.07.2024. Бюл. № 21. Доступно по: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&rn=8118&DocNumber=2823533&TypeFile=html. Ссылка активна на 12.11.2024.
28. Roth JD, Howell SM, Hull ML. Kinematically aligned total knee arthroplasty limits high tibial forces, differences in tibial forces between compartments, and abnormal tibial contact kinematics during passive flexion. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2018;26(6):1589-1601. doi: 10.1007/s00167-017-4670-z.
29. Shelton TJ, Nedopil AJ, Howell SM, Hull ML. Do varus or valgus outliers have higher forces in the medial or lateral compartments than those which are in-range after a kinematically aligned total knee arthroplasty? limb and joint line alignment after kinematically aligned total knee arthroplasty. *Bone Joint J.* 2017;99-B(10):1319-1328. doi: 10.1302/0301-620X.99B10.BJJ-2017-0066.R1.

Статья поступила 30.09.2024; одобрена после рецензирования 11.11.2024; принята к публикации 10.12.2024.

The article was submitted 30.09.2024; approved after reviewing 11.11.2024; accepted for publication 10.12.2024.

Информация об авторах:

Виктор Васильевич Кузин — доктор медицинских наук, профессор, врач — травматолог-ортопед, kvicvas@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-0379-9657>;

Антон Викторович Кузин — врач — травматолог-ортопед, doctorkuzinav@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1475-9179>;

Алексей Владимирович Германов — врач — травматолог-ортопед, Germ-aleksej@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-7004-5989>;

Мария Алексеевна Шпак — врач — травматолог-ортопед, shpakmasha@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-0569-0239>.

Information about the authors:

Viktor V. Kuzin — Doctor of Medical Sciences, Professor, orthopaedic surgeon, kvicvas@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-0379-9657>;

Anton V. Kuzin — orthopaedic surgeon, doctorkuzinav@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1475-9179>;

Aleksey V. Germanov — orthopaedic surgeon, Germ-aleksej@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0005-7004-5989>;

Maria A. Shpak — orthopaedic surgeon, shpakmasha@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-0569-0239>.

Научная статья

УДК 616.728.3-007.248:616.718.51-089.85-035

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-1-19-27>

Сравнительный анализ результатов применения вариантов корректирующей остеотомии проксимального отдела большеберцовой кости

М.Ш. Магомедов✉, Д.В. Чугаев, Т.А. Куляба, А.И. Петухов

Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени Р.Р. Вредена,
Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Магомед Шамилович Магомедов, dr.magomedovmsh@gmail.com

Аннотация

Введение. Остеотомии с открытым и закрытым клином являются двумя наиболее часто используемыми в практике вариантами корректирующей остеотомии проксимального отдела большеберцовой кости при медиальном гонартрозе, сочетающимся с варусной деформацией.

Цель работы — оценить функциональные и рентгенологические исходы лечения пациентов с медиальным гонартрозом, сочетающимся с варусной деформацией проксимального отдела большеберцовой кости, после выполнения корректирующей остеотомии разными методиками.

Материалы и методы. В исследование включены 37 пациентов (26 мужчин и 11 женщин) в возрасте от 20 до 54 лет ($42,84 \pm 9,1$) с медиальным гонартрозом, сочетающимся с варусной деформацией во фронтальной плоскости. В первую группу вошли 23 пациента с 25 прооперированными конечностями, которым выполняли остеотомию типа «открытый клин» (ООК), во вторую — 14 пациентов, которым проведена остеотомия типа «закрытый клин» (ОЗК).

Результаты. Сравнение показателей МРТА, LDТА, аРРТА и MAD после операции не показало статистически достоверной разницы ($p > 0,05$) между группами, но в группе остеотомий с закрытым клином показатели зафиксированы в крайне широком диапазоне значений. Результаты по шкале Лисхольма – Тегнера после операции в сравнении между двумя группами показали статистически достоверную разницу ($p = 0,05$), при оценке данного параметра наиболее эффективной оказалась операция остеотомии с открытым клином.

Обсуждение. Операция корректирующей остеотомии большеберцовой кости с открытым клином является более прогнозируемым хирургическим вмешательством в сравнении с остеотомией с закрытым клином. По результатам нашего исследования, при выполнении остеотомии с открытым клином случаев с избыточной и недостаточной коррекцией значений референтных углов и линий значительно меньше, чем при остеотомии с закрытым клином.

Заключение. Отсутствие специфических хирургических осложнений у исследуемых пациентов показало безопасность обеих оцениваемых хирургических методик. Исследование показало крайне широкий разброс показателей МРТА и LDТА в группе остеотомий с закрытым клином, выходящих за пределы предоперационного планирования. В группе ОЗК зафиксировано наибольшее число пациентов, у которых в ходе операции осуществлена гиперкоррекция механической оси конечности, выходящая за пределы референтных значений. При остеотомии с открытым клином есть возможность использовать аллотрансплантат меньшего размера либо вообще не применять его, что делает ООК более управляемой технологией коррекции деформации кости конечности.

Ключевые слова: корректирующая остеотомия проксимального отдела большеберцовой кости, медиальный гонартроз, остеотомия с открытым клином, остеотомия с закрытым клином

Для цитирования: Магомедов М.Ш., Чугаев Д.В., Куляба Т.А., Петухов А.И. Сравнительный анализ результатов применения вариантов корректирующей остеотомии проксимального отдела большеберцовой кости. *Гений ортопедии*. 2025;31(1):19-27. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-19-27.



Comparative analysis of the outcomes of high tibial osteotomy performed with different techniques

M.Sh. Magomedov✉, D.V. Chugaev, T.A. Kulyaba, A.I. Petukhov

Vreden National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Saint-Petersburg, Russian Federation

Corresponding author: Magomed Sh. Magomedov, dr.magomedovmsh@gmail.com

Abstract

Introduction Opening- and closing wedge osteotomies are the two most commonly used variants of high tibial osteotomy in medial gonarthrosis associated with varus deformity.

Purpose Based on a retrospective analysis of the results of surgical treatment of patients with medial gonarthrosis associated with varus deformity of the proximal tibia, to evaluate functional and radiological outcomes of high tibial osteotomy performed with two different surgical techniques.

Material and methods The study included 37 patients (26 men and 11 women) aged 20 to 54 years (42.84 ± 9.1) with medial gonarthrosis associated with varus deformity in the frontal plane. The first group included 23 patients with 25 operated limbs who underwent open wedge osteotomy (OWO), the second group included 14 patients who underwent closed wedge osteotomy (CWO).

Results Comparison of MPTA, LDTA, aPPTA and MAD in both groups after surgery did not show a statistically significant difference ($p > 0.05$), but in the closing wedge group, the recorded values had an extremely wide range. The results on the Lisholm-Tegner scale after surgery compared between the two groups showed a statistically significant difference ($p = 0.05$), this parameter showed that the opening-wedge osteotomy was more effective.

Discussion Opening wedge osteotomy is a more predictable surgical procedure compared to closing wedge osteotomy. In opening wedge osteotomy, there are significantly fewer cases with excessive or insufficient correction of reference angles and lines than after closing wedge osteotomy.

Conclusion Absence of specific surgical complications in the studied patients demonstrates the safety of both surgical techniques. The study showed an extremely wide range of MPTA and LDTA values in the closed wedge osteotomy group, which were beyond the preoperative planning. The CWO group had the highest number of patients who underwent hypercorrection of the mechanical limb axis, which was beyond the reference values. It is possible to use a small allograft or not to use it at all in OWO, which makes it a more manageable technology for correcting limb bone deformity.

Keywords: high tibial osteotomy, medial gonarthrosis, opening wedge osteotomy, closing wedge osteotomy

For citation: Magomedov MSh, Chugaev DV, Kulyaba TA, Petukhov AI. Comparative analysis of the outcomes of high tibial osteotomy performed with different techniques. *Genij Ortopedii*. 2025;31(1):19-27. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-19-27.

ВВЕДЕНИЕ

Остеоартрит (ОА) коленного сустава является распространенным в популяции и многофакторным заболеванием, которое может привести к выраженной дисфункции сустава в результате износа хряща, изменения оси конечности, нарушения нормальной биомеханики сустава [1]. У большинства пациентов с ОА дегенеративно-дистрофические изменения в коленном суставе связаны с варусной деформацией, приводящей к перегрузке медиального отдела коленного сустава и терминальному износу суставного хряща [2]. Для устранения «механических» симптомов ОА коленного сустава и, в первую очередь, болевого синдрома используют различные оперативные методики, в частности корригирующую остеотомию проксимального отдела большеберцовой кости (ПОББК), тотальное эндопротезирование коленного сустава, одномышелковое эндопротезирование коленного сустава и артроскопическую хирургию. Среди них корригирующая остеотомия ПОББК является методом выбора у молодых и активных пациентов с высоким уровнем функциональных требований [3, 4]. Корригирующая остеотомия ПОББК позволяет пациенту избавиться от боли, восстановить нарушенную ось конечности и отсрочить необходимость выполнения тотального эндопротезирования коленного сустава [5].

Наиболее часто используемыми в практике вариантами выполнения данной операции являются остеотомия с закрытым клином (ОЗК) и остеотомия с открытым клином (ООК). Сообщается об отличных результатах использования обоих методов, каждый из которых имеет свои потенциальные преимущества и недостатки [6, 7].

Цель работы — оценить функциональные и рентгенологические исходы лечения пациентов с медиальным гонартрозом, сочетающимся с варусной деформацией ПОББК, после выполнения корригирующей остеотомии разными методиками.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования: ретроспективное сплошное когортное одноцентровое исследование.

В исследование включены пациенты, которым выполняли корригирующую остеотомию ПОББК в период 2021–2023 гг. по поводу медиального гонартроза, сочетающегося с варусной деформацией коленного сустава за счет нарушения референтных углов проксимального отдела большеберцовой кости, подтвержденного клинско-рентгенологическими данными.

Критерии не включения пациентов: посттравматический остеоартроз, перенесенные инфекции коленного сустава и системные заболевания соединительной ткани, наличие асептического некроза кости, отсутствие деформации коленного сустава во фронтальной плоскости, варусная деформация на уровне коленного сустава за счет бедренной кости, возраст старше 60 лет, наличие сгибательной контрактуры $> 10^\circ$.

Из исследования исключены пациенты, которым в послеоперационном периоде выполняли рентгенограммы коленного сустава с некорректными укладками, не позволяющими оценить референтные углы и линии, или не выполняли телерентгенографию нижних конечностей.

Всем пациентам, включенным в исследование, выполнены телерентгенограммы обеих нижних конечностей в прямой проекции, рентгенограммы коленного сустава в двух проекциях. При анализе телерентгенограмм определяли медиальный проксимальный большеберцовый угол (MPТА), латеральный дистальный большеберцовый угол (LDТА), степень смещения механической оси конечности (MAD). По обзорной рентгенограмме коленного сустава в боковой проекции определяли угол наклона суставной поверхности в сагиттальной плоскости (aPPTA).

В исследование включено 37 пациентов (26 (72,2 %) мужчин и 11 (29,8 %) женщин), у которых прооперировано 39 коленных суставов. Средний возраст пациентов с ООК составил $(43,04 \pm 9,9)$ года, с ОЗК — $(42,5 \pm 7,8)$ года.

Пациенты разделены на две группы по методике проведенного оперативного вмешательства. В первую группу включены 23 пациента с 25 прооперированными конечностями, которым выполняли остеотомию типа «открытый клин», во вторую — 14 пациентов, которым была проведена остеотомия типа «закрытый клин».

Предоперационное планирование выполняли с использованием мультимедийного приложения к планшетному компьютеру BoneNinja или в компьютерном приложении Weasys по методике Miniaci.

Техника операции. Пациентам обеих групп оперативное вмешательство выполняли под спинномозговой анестезией с использованием пневматурникета на оперируемой конечности. В группе пациентов с ООК оперативный доступ осуществляли из двух кожных разрезов 5 см и 3 см, располагая больший доступ в косом направлении, совпадающем с ходом сухожилий мышц «гусиной лапки» на уровне

4–5 см от края суставной поверхности большеберцовой кости. Меньший доступ выполняли на уровне нижней трети наkostной пластины для осуществления ее фиксации винтами. По технике, описанной Ph. Lobenhoffer [8], проводили мультипланарную остеотомию проксимального отдела большеберцовой кости и репозицию костных фрагментов с использованием специальных репозиционных клиньев и расширителей. Сформированный промежуток заполняли соразмерным алло костным трансплантатом из головки бедренной кости. Остеосинтез производили с помощью специальной проксимальной тибиальной медиальной наkostной пластины, фиксированной винтами с угловой стабильностью (специализированная Т-образная пластина). В случае выполнения ОЗК производили переднелатеральный оперативный доступ к проксимальному отделу большеберцовой кости, во фронтальной плоскости осуществляли клиновидную остеотомию с удалением костного клина, размер которого был определен на предоперационном этапе при рентгенологическом планировании остеотомии. Для создания возможности репозиции из этого же оперативного доступа выполняли резекцию малоберцовой кости на границе ее верхней и средней трети. Посредством остеоклазии сближали костные фрагменты и производили фиксацию латеральной наkostной тибиальной пластиной, фиксированной винтами с угловой стабильностью. При использовании обеих методик послеоперационные раны ушивали наглухо, без дренирования раны.

Послеоперационное ведение. Реабилитационный режим пациентов обеих групп состоял из разгрузки прооперированной конечности в течение 6 нед. после операции с ранней функцией. Со дня операции пациентов вертикализировали и начинали восстановление нарушенной амплитуды движений в коленном суставе. Гипсовую или иную иммобилизацию оперированной конечности не выполняли. Независимо от результатов выполненной рентгенографии оперированного коленного сустава, пациенты с 6–8 нед. после операции начинали увеличивать осевую нагрузку, доводя ее до полной в течение еще 4–8 нед.

Оценка результатов. В послеоперационном периоде пациенты заполняли опросник со шкалой Лисхольма – Тегнера [9] дистанционно в виде Google forms, начиная с первого года после операции.

Статистический анализ. На основании исходных данных пациентов, включенных в исследование, сформированы электронные таблицы Microsoft Excel. Для статистической обработки полученных данных мы использовали программу Past ver.4.15. Все данные проверяли на соответствие с нормальным (гауссовым) распределением при помощи критериев Шапиро – Уилка и Колмогорова – Смирнова. Данные, не соотносившиеся с нормальным распределением, исследованы с использованием методов непараметрической статистики. Выборки сравнивали при помощи критериев Манна – Уитни и Краскела – Уоллиса.

Ограничения исследования. Самыми важными ограничениями исследования были ретроспективный характер исследования, малый размер выборок, оценка функции сустава по специализированной шкале Лисхольма – Тегнера только в послеоперационном периоде, выполнение оперативных вмешательств разными хирургами, что могло повлиять на такие параметры, как продолжительность операции, ее воспроизводимость и ряд других. Кроме того, важнейшим ограничением всех так называемых «индустриальных», то есть стандартизированных, типов остеотомий является то, что коррекция деформации выполняется вне ее вершины, поэтому нежелательное изменение смежных референтных углов является закономерным следствием нарушения *osteotomy rules* [10], что также подтверждено и нашим исследованием.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравнение МРТА до операции в обеих группах выявило, что показатели практически равны, тогда как после операции, несмотря на отсутствие статистически достоверной разницы ($p > 0,05$), в группе с закрытым клином значения зафиксированы в крайне широком диапазоне (табл. 1). Столь же репрезентативным этот эффект был для LDТА (табл. 2).

Таблица 1

Показатели параметра МРТА (°)

Статистические параметры	МРТА (до операции)		МРТА (после операции)	
	Opening-wedge	Closing-wedge	Opening-wedge	Closing-wedge
Значение P	0,5488		0,4719	
Mean	87,32	86,307	91,72	90,96
Median	87,1	86,25	91,55	90,55
Max	99,7	91,9	98,7	99,2
Min	81,3	80,1	84,6	82
Stand. dev.	3	3.3	3,5	4,5

Таблица 2

Показатели параметра LDТА (°)

Статистические параметры	LDТА (до операции)		LDТА (после операции)	
	Opening-wedge	Closing-wedge	Opening-wedge	Closing-wedge
Значение <i>P</i>	0,0825		0,837	
Mean	88,79	91,035	92,04	91,675
Median	89,4	91,1	92,05	91,05
Max	95,5	96,1	97,4	99,4
Min	81,5	82	85,7	83,9
Stand. dev.	2,7	3,7	2,9	4,4

Как указано выше, изменение LDТА, как смежного референтного угла прооперированной конечности, объясняется особенностью всех вариантов стандартизированных остеотомий бедренной или большеберцовой костей, которые выполняют не на уровне вершины деформации (которая зачастую находится на уровне коленного сустава), а вне ее, адаптируясь к требованиям используемого в ходе операции имплантата. Данный эффект требует дальнейшего исследования, особенно в аспекте оценки функции голеностопного сустава после хирургических вмешательств.

При сравнении угла наклона суставной поверхности в сагиттальной плоскости (аРРТА) после операции обнаружена более высокая вариабельность показателей для остеотомии с открытым клином (табл. 3). Оценка данного параметра крайне важна, так как наклон суставной поверхности в сагиттальной плоскости, часто обозначаемый в зарубежной ортопедической литературе как slope, имеет огромное значение в корректном функционировании передней крестообразной связки и значительно влияет на сагиттальную стабильность коленного сустава.

Таблица 3

Показатели параметра аРРТА (°)

Статистические параметры	аРРТА (до операции)		аРРТА (после операции)	
	Opening-wedge	Closing-wedge	Opening-wedge	Closing-wedge
Значение <i>P</i>	0,3126		0,314	
Mean	79,21	80,44	77,25	78,88
Median	77,4	79,6	76,85	79,5
Max	90,2	88,3	87,7	83,7
Min	74,1	76,2	68,1	73,4
Stand. dev.	4,1	3,8	6,6	3,7

Параметр степени смещения механической оси конечности (MAD) при сравнении двух групп после операции не показал статистически достоверной разницы ($p > 0,05$) в полученных результатах. В обеих исследуемых группах выявлена трансляция оси конечности из варусной в вальгусную позицию. Однако в группе остеотомии с закрытым клином данный параметр изменялся в крайне широком диапазоне с малой степенью повторяемости от операции к операции (табл. 4).

Таблица 4

Показатели параметра MAD

Статистические параметры	MAD (мм)	
	Opening-wedge	Closing-wedge
Значение <i>P</i>	0,1221	
Mean	27,535	38,8
Median	26,45	35,95
Max	56,3	71,4
Min	11,1	16,1
Stand. dev.	10,9	18,9

При этом, несмотря на схожие рентгенологические результаты, не показавшие статистически значимых различий при их анализе, данные опросника Лисхольма – Тегнера после операции в сравнении между двумя группами показали статистически достоверную разницу ($p = 0,05$). Выявлено, что при оценке данного параметра наиболее эффективной оказалась операция остеотомии с открытым клином, после которой пациенты показали наилучшие функциональные послеоперационные результаты (табл. 5).

Таблица 5

Данные опросника Лисхольма – Тегнера

Статистические параметры	Баллы по шкале Лисхольм	
	Opening-wedge	Closing-wedge
Значение <i>P</i>	0,054	
Mean	85,5	55,8
Median	89,5	50,5
Max	100	95
Min	50	39
Stand. dev.	15,4	20,7

Кроме заполнения валидизированного опросника, пациенты в послеоперационном периоде отвечали на три дополнительных вопроса:

- Удовлетворены ли Вы выполненным хирургическим вмешательством?
- Если бы вновь пришлось принять решение о необходимости данной операции, согласились бы Вы на ее выполнение?
- «Забыли» ли Вы о выполненной операции и имеете ли возможность жить полной жизнью без физических ограничений, связанных с прооперированным коленным суставом?

Если для ООК эффект «забытого колена» нами выявлен почти у 70 % больных, то для ОЗК этот эффект выявлен всего у 17 % пациентов (табл. 6). Полученные результаты не дают возможности делать однозначные выводы, так как для оценки такого сложного параметра как «функция прооперированного сустава» требуется валидный и проверенный инструмент, в то время как сформулированные нами три отдельных вопроса таковым не являются. Использование опросников, разработанных для эндопротезирования коленного сустава, таких как FJS 12, или создание новых, адаптированных для реконструктивной хирургии, позволит нам в планируемых научных исследованиях более корректно ответить на вопросы удовлетворенности пациентов после перенесенной корригирующей остеотомии.

Таблица 6

Процентное распределение ответов на три дополнительных вопроса

Вопросы	Opening-wedge, %		Closing-wedge, %	
	да	нет	да	нет
Удовлетворены ли выполненной операцией?	89	11	67	33
Повторили бы при необходимости?	89	11	71	29
«Забыли» ли о выполненной операции?	65	35	17	83

Осложнения. По результатам нашего исследования специфических периоперационных осложнений (повреждения малоберцового нерва, интраоперационные переломы проксимального отдела большеберцовой кости, несращения остеотомии, гнойно-септические осложнения и пр. [11–14, 33]) у пациентов не выявлено, что, возможно, объясняется малой выборкой. Изменение референтных углов и линий вне пределов референтных значений нами оценено, но не рассматривалось как осложнение в ходе настоящего исследования. В дальнейшем планируется изучить корреляцию между прецизионностью интраоперационной коррекции механической оси конечности и иных референтных углов и линий и функциональными результатами лечения пациентов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Корригирующая остеотомия проксимального отдела большеберцовой кости является ценным хирургическим методом коррекции деформации кости, нормализации референтных линий и углов сегмента конечности, и разгрузки поврежденного отдела сустава. Одним из дискуссионных моментов при обсуждении операции остеотомии большеберцовой кости является выбор между наиболее распространенными в практике хирургическими методиками, то есть, фактически в каком месте требуется пересечь кость и затем соединить ее для последующей консолидации. Здесь важно понимать, что выбор варианта остеотомии, с помощью которой будет выполнена коррекция деформации кости, не так важен, как соблюдение общих ортопедических правил. В частности, цель остеотомии можно считать достигнутой не только в случае субъективного улучшения состояния пациента, но также при условии восстановления адекватных значений оси конечности и референтных углов и линий. «Индустриальная» остеотомия проксимального отдела большеберцовой кости, то есть операция, акцентированная в первую очередь на используемый погружной фиксатор, в подавляющем большинстве случаев нарушает так называемые «правила остеотомии» [10]. Упрощенно их можно

сформулировать следующим образом: остеотомию нужно выполнять на вершине деформации, иначе для восстановления референтных углов и линий потребуются трансляция костных фрагментов. Все хирургические варианты остеотомий данного сегмента (открытый, закрытый клин, комбинация открытого и закрытого, шарнирная остеотомия) являются компромиссом между данными правилами и требованиями, предъявляемыми используемым для фиксации кости имплантатам [32].

Выбор той или иной хирургической техники у пациентов, включенных в настоящее исследование, зависел от предпочтений хирургов и определялся преимущественно традициями клинического отделения. Идеальными кандидатами для операции считались физически активные пациенты с артрозом медиального отдела коленного сустава с его варусной деформацией без терминального износа суставного хряща. Физиологический возраст пациентов составлял не более 60–65 лет.

На настоящем этапе развития технологий корригирующих остеотомий в области коленного сустава в научном сообществе идет поиск расширения возможностей данного типа операций и анализ неудовлетворительных результатов лечения, связанных с выбором той или иной хирургической методики. U. Kuwashimo et al. провели исследование 31 пациента и 40 прооперированных коленных суставов. В работе сравнивали влияние типа остеотомии на ротационный профиль большеберцовой кости. После анализа данных компьютерной томографии авторы пришли к выводу, что в группе пациентов, которым проводили ОЗК, наблюдали избыточную наружную ротацию дистального фрагмента большеберцовой кости, а в группе пациентов с ООК существенных ротационных изменений не наблюдали [15]. Аналогичные результаты представлены и в других научных публикациях [16, 17]. Это является очевидным, так как в ходе ООК не нарушается целостность латерального кортикального слоя большеберцовой и малоберцовой костей, обеспечивающих осевую стабилизацию.

Особый интерес вызывает сравнение методик в отношении изменения длины конечностей [18]. Так, выводом мета-анализа L. O-Sung et al. является то, что среднее изменение длины голени до и после операции при ООК составило 6,96 мм, среднее изменение между предоперационной и послеоперационной длиной голени при ОЗК — 1,95 мм. Таким образом, изменение длины нижних конечностей после ООК больше, чем после ОЗК. При этом субъективное ощущение из-за несоответствия длины нижних конечностей было у 70 % пациентов после ООК, тогда как после ОЗК только 20 % заметили несоответствие длины. Ощущение дискомфорта было у 37 % после ООК, а при ОЗК — у 7 % пациентов [19].

Одним из наблюдений, полученных в ходе нашего исследования, является то, что изменение показателей МРТА, LDТА и MAD после операции происходит в крайне широком диапазоне с малой степенью повторяемости при остеотомии с закрытым клином. Похожие данные получили и S. Nao et al. в мета-анализе исследований, сравнивающих две методики выполнения корригирующей остеотомии ПОББК. Проанализировав рентгенологические результаты, авторы пришли к выводу, что при остеотомии с открытым клином случаев с избыточной и недостаточной коррекцией было значительно меньше, чем при ОЗК [20].

Интерес вызывает влияние типа хирургической методики на угол наклона проксимального отдела большеберцовой кости в сагиттальной плоскости (aPPTA). L. Schubert et al. проанализировали результаты оперативного лечения 279 коленных суставов, из которых 179 суставов прооперировано с использованием остеотомии с открытым клином, 89 — с закрытым клином. При сравнении показателей до и после операции в группе с ООК практически не было изменений показателей с минимальной тенденцией к увеличению наклона, однако в группе с ОЗК оперативное вмешательство привело к статистически значимому снижению проксимального большеберцового наклона. Уменьшение наклона при ОЗК авторы связывают с тем, что после остеотомии в дорсальном направлении резецируется меньше кости, чем в переднелатеральном, в результате чего остеотомическая щель сужается в дорсальном направлении [21]. S. Ji et al. сообщили о результатах исследования, включавшего 440 коленных суставов, из которых 50 с ОЗК, а 390 — с ООК. При сравнении показателей наклона большеберцовой кости до и после операции в группе с ООК не было изменений, а в группе с ОЗК наблюдалось статистически значимое снижение наклона проксимального отдела большеберцовой кости после операции [22].

В проведенном нами исследовании при анализе функциональных результатов установлено, что пациенты, которым проведена ООК, получили статистически значимое улучшение функции прооперированного сустава по шкале Лисхольма – Тегнера по сравнению с пациентами, которым проведена операция остеотомии с закрытым клином ($p < 0,05$). Результаты научных публикаций показали отсутствие статистически достоверной разницы в функциональных результатах между методиками остеотомии проксимального отдела большеберцовой кости [23–30]. Выявленную в ходе настоящего исследования разницу в функциональных результатах оперативного лечения пациентов, выполненного в клинике НМИЦ ТО им. Р.Р. Вредена, авторы связывают с небольшой группой больных, часть пациентов исключена из оценки согласно соответствующим критериям. Для более объективной оценки результатов требуется проведение проспективного исследования на больших по размеру выборках.

В группе ОЗК зафиксировано наибольшее число пациентов, у которых в ходе оперативного лечения была осуществлена гиперкоррекция механической оси конечности, выходящая за пределы референтных значений. По мнению авторов, это может быть связано с тем, что при ОЗК важно сопоставить проксимальный и дистальный фрагменты после удаления клина. Кроме того, нужно учитывать такой параметр как недостаточная прецизионность при выполнении опилов, связанная с осцилляторной пилой (толщина полотна лезвия, избыточная, неравномерная осцилляция, «биение» лезвия). Это приводит к тому, что после удаления клина большего размера происходит гиперкоррекция механической оси конечности.

Высокая вариабельность параметров, выявленная в ходе настоящего исследования, показывает необходимость более тщательного анализа применяемой в клинике нашего Центра хирургической техники с тем, чтобы сделать обе методики максимально эффективными и безопасными. Кроме того, требует дальнейшего изучения вопрос, что послужило причиной достоверно более высокого уровня функциональных результатов лечения, выявленных в ходе исследования в группе ООК, и как этот параметр сделать максимально устойчивым для пациентов исследуемого профиля.

Каждый из вариантов изучаемых остеотомий ПОББК имеет свои преимущества и недостатки. Дальнейшие высококачественные научные исследования с использованием больших выборок пациентов и включением в сравнительный анализ метода управляемого чрескостного остеосинтеза позволят сформулировать консенсус о том, что считать методикой выбора и какие подходы к хирургическому лечению пациентов изучаемого профиля следует считать наиболее рациональными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Операция корригирующей остеотомии ПОББК является современным и эффективным методом хирургического лечения монокомпарментального ОА коленного сустава, сочетающегося с фронтальной деформацией. Отсутствие специфических хирургических осложнений у исследуемых пациентов показало безопасность обеих оцениваемых в ходе настоящего исследования хирургических методик.

Наше исследование показало крайне широкий разброс показателей МРТА и LDТА в группе ОЗК, выходящих за пределы предоперационного планирования. В этой же группе зафиксировано наибольшее число пациентов, у которых в ходе оперативного лечения была осуществлена гиперкоррекция механической оси конечности, выходящая за пределы референтных значений. Таким образом, при ОЗК у хирурга нет права на ошибку.

Напротив, при ООК всегда есть возможность взять аллотрансплантат меньшего размера либо не использовать его вовсе. Это обстоятельство делает ООК более управляемой технологией при коррекции деформации кости конечности. В группе с ООК зафиксирована низкая повторяемость сагиттального наклона суставной поверхности большеберцовой кости от операции к операции.

Конфликт интересов. Не заявлен.

Источник финансирования. Не заявлен.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Fibel KH, Hillstrom HJ, Halpern BC. State-of-the-Art management of knee osteoarthritis. *World J Clin Cases*. 2015;3(2):89-101. doi: 10.12998/wjcc.v3.i2.89.
2. Stoddart JC, Dandridge O, Garner A, et al. The compartmental distribution of knee osteoarthritis - a systematic review and meta-analysis. *Osteoarthritis Cartilage*. 2021;29(4):445-455. doi: 10.1016/j.joca.2020.10.011.
3. Wang Z, Zeng Y, She W, et al. Is opening-wedge high tibial osteotomy superior to closing-wedge high tibial osteotomy in treatment of unicompartmental osteoarthritis? A meta-analysis of randomized controlled trials. *Int J Surg*. 2018;60:153-163. doi: 10.1016/j.ijsu.2018.10.045.
4. Wu L, Lin J, Jin Z, et al. Comparison of clinical and radiological outcomes between opening-wedge and closing-wedge high tibial osteotomy: A comprehensive meta-analysis. *PLoS One*. 2017;12(2):e0171700. doi: 10.1371/journal.pone.0171700.
5. Nerhus TK, Ekeland A, Solberg G, et al. Radiological outcomes in a randomized trial comparing opening wedge and closing wedge techniques of high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2017;25(3):910-917. doi: 10.1007/s00167-015-3817-z.
6. Ogino T, Kumagai K, Yamada S, et al. Relationship between the bony correction angle and mechanical axis change and their differences between closed and open wedge high tibial osteotomy. *BMC Musculoskelet Disord*. 2020;21(1):675. doi: 10.1186/s12891-020-03703-6.
7. Song EK, Seon JK, Park SJ, Jeong MS. The complications of high tibial osteotomy: closing- versus opening-wedge methods. *J Bone Joint Surg Br*. 2010;92(9):1245-1252. doi: 10.1302/0301-620X.92B9.23660.
8. Lobenhoffer P, van Heerwaarden RJ, Staubli AE, Jacob RP. *Osteotomies around the knee: indications-planning-surgical techniques using plate fixators*. Davos: AO Publ.; 2009:300.
9. Tegner Y, Lysholm J. Rating systems in the evaluation of knee ligament injuries. *Clin Orthop Relat Res*. 1985;(198):43-49.
10. Paley D, Herzenberg JE. *Principles of Deformity Correction*. Springer; 2014:831.
11. Duivenvoorden T, van Diggele P, Reijman M, et al. Adverse events and survival after closing- and opening-wedge high tibial osteotomy: a comparative study of 412 patients. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2017;25(3):895-901. doi: 10.1007/s00167-015-3644-2.
12. Franulic N, Muñoz JT, Figueroa F, et al. Lateral hinge fracture in medial opening wedge high tibial osteotomy: a narrative review. *EFORT Open Rev*. 2023;8(7):572-580. doi: 10.1530/EOR-22-0103.
13. Ogawa H, Matsumoto K, Akiyama H. The prevention of a lateral hinge fracture as a complication of a medial opening wedge high tibial osteotomy: a case control study. *Bone Joint J*. 2017;99-B(7):887-893. doi: 10.1302/0301-620X.99B7.2016-0927.R1.
14. Dixel J, Fritzsche H, Beyer F, et al. Open-wedge high tibial osteotomy: incidence of lateral cortex fractures and influence of fixation device on osteotomy healing. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2017;25(3):832-837. doi: 10.1007/s00167-015-3730-5.

15. Kuwashima U, Takeuchi R, Ishikawa H, et al. Comparison of torsional changes in the tibia following a lateral closed or medial open wedge high tibial osteotomy. *Knee*. 2019;26(2):374-381. doi: 10.1016/j.knee.2019.01.009.
16. Kim JJ, Kim BH, Han HS, Lee MC. Rotational Changes in the Tibia After High Tibial Valgus Osteotomy: A Comparative Study of Lateral Closing Versus Medial Opening Wedge Osteotomy. *Am J Sports Med*. 2020;48(14):3549-3556. doi: 10.1177/0363546520960114.
17. Kawai R, Tsukahara T, Kawashima I, Yamada H. Tibial rotational alignment after opening-wedge and closing-wedge high tibial osteotomy. *Nagoya J Med Sci*. 2019;81(4):621-628. doi: 10.18999/nagjms.81.4.621.
18. Kim JH, Kim HJ, Lee DH. Leg length change after opening wedge and closing wedge high tibial osteotomy: A meta-analysis. *PLoS One*. 2017;12(7):e0181328. doi: 10.1371/journal.pone.0181328.
19. Lee OS, Ahn S, Lee YS. Comparison of the Leg-Length Change between Opening- and Closing-Wedge High Tibial Osteotomy: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Knee Surg*. 2019;32(4):372-379. doi: 10.1055/s-0038-1641176.
20. Sun H, Zhou L, Li F, Duan J. Comparison between Closing-Wedge and Opening-Wedge High Tibial Osteotomy in Patients with Medial Knee Osteoarthritis: A Systematic Review and Meta-analysis. *J Knee Surg*. 2017;30(2):158-165. doi: 10.1055/s-0036-1584189.
21. Schubert I, Ferner F, Dickschas J. The effect of open-wedge and closed-wedge high tibial osteotomies on the tibial posterior slope—a study of two hundred seventy-nine cases. *Int Orthop*. 2020;44(6):1077-1082. doi: 10.1007/s00264-020-04499-9.
22. Ji S, Gao Y, Zhang J, et al. High tibial lateral closing wedge and opening wedge valgus osteotomy produce different effects on posterior tibial slope and patellar height. *Front Surg*. 2023;10:1219614. doi: 10.3389/fsurg.2023.1219614.
23. Lu J, Tang S, Wang Y, et al. Clinical Outcomes of Closing- and Opening-Wedge High Tibial Osteotomy for Treatment of Anteromedial Unicompartamental Knee Osteoarthritis. *J Knee Surg*. 2019;32(8):758-763. doi: 10.1055/s-0038-1668124.
24. Ogino T, Kumagai K, Yamada S, et al. Relationship between the bony correction angle and mechanical axis change and their differences between closed and open wedge high tibial osteotomy. *BMC Musculoskelet Disord*. 2020;21(1):675. doi: 10.1186/s12891-020-03703-6.
25. Cheng X, Liu F, Xiong F, et al. Radiographic changes and clinical outcomes after open and closed wedge high tibial osteotomy: a systematic review and meta-analysis. *J Orthop Surg Res*. 2019;14(1):179. doi: 10.1186/s13018-019-1222-x.
26. Safdari M, Dastjerdi A, Makhmalbaf N, et al. Closing-Wedge and Opening-Wedge High Tibial Osteotomy as Successful Treatments of Symptomatic Medial Osteoarthritis of the Knee: A Randomized Controlled Trial. *Arch Bone Jt Surg*. 2023;11(6):421-428. doi: 10.22038/ABJS.2023.68944.3253.
27. Wu L, Lin J, Jin Z, et al. Comparison of clinical and radiological outcomes between opening-wedge and closing-wedge high tibial osteotomy: A comprehensive meta-analysis. *PLoS One*. 2017;12(2):e0171700. doi: 10.1371/journal.pone.0171700.
28. Wang Z, Zeng Y, She W, et al. Is opening-wedge high tibial osteotomy superior to closing-wedge high tibial osteotomy in treatment of unicompartamental osteoarthritis? A meta-analysis of randomized controlled trials. *Int J Surg*. 2018;60:153-163. doi: 10.1016/j.ijsu.2018.10.045.
29. Seil R. In High Tibial Osteotomy, Closing and Opening Wedges Did Not Differ for Clinical Outcomes at Up to Two Years. *J Bone Joint Surg Am*. 2018;100(10):882. doi: 10.2106/JBJS.18.00168.
30. Nerhus TK, Ekeland A, Solberg G, et al. No difference in time-dependent improvement in functional outcome following closing wedge versus opening wedge high tibial osteotomy: a randomised controlled trial with two-year follow-up. *Bone Joint J*. 2017;99-B(9):1157-1166. doi: 10.1302/0301-620X.99B9.BJJ-2017-0062.R1.
31. Fujisawa Y, Masuhara K, Shiomi S. The effect of high tibial osteotomy on osteoarthritis of the knee. An arthroscopic study of 54 knee joints. *Orthop Clin North Am*. 1979;10(3):585-608.
32. Solomin LN, Chugaev DV, Filippova AV, Kulesh PN. High Tibial Osteotomy for Genu Varum in Adults: Do Proprietary Implants Limit the Quality of Correction? *Strategies Trauma Limb Reconstr*. 2020;15(1):13-22. doi: 10.5005/jp-journals-10080-1449.
33. Gao L, Madry H, Chugaev DV, et al. Advances in modern osteotomies around the knee : Report on the Association of Sports Traumatology, Arthroscopy, Orthopaedic surgery, Rehabilitation (ASTAOR) Moscow International Osteotomy Congress 2017. *J Exp Orthop*. 2019;6(1):9. doi: 10.1186/s40634-019-0177-5.

Статья поступила 29.07.2024; одобрена после рецензирования 01.10.2024; принята к публикации 10.12.2024.

The article was submitted 29.07.2024; approved after reviewing 01.10.2024; accepted for publication 10.12.2024.

Информация об авторах:

Магомед Шамилович Магомедов — клинический ординатор, dr.magomedovmsh@gmail.com;
 Дмитрий Валерьевич Чугаев — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, dr.chugaev@gmail.com;
 Тарас Андреевич Куляба — доктор медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, taraskuliaba@mail.ru;
 Алексей Иванович Петухов — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, aipetuhov@rniito.ru.

Information about the authors:

Magomed Sh. Magomedov — clinical resident, dr.magomedovmsh@gmail.com;
 Dmitriy V. Chugaev — Candidate of Medical Sciences, orthopaedic surgeon, dr.chugaev@gmail.com;
 Taras A. Kulyaba — Doctor of Medical Sciences, orthopaedic surgeon, taraskuliaba@mail.ru;
 Alexey I. Petukhov — Candidate of Medical Sciences, orthopaedic surgeon, aipetuhov@rniito.ru.

Вклад авторов:

Магомедов М.Ш. — применение статистических, математических, вычислительных или других формальных методов для анализа данных исследования, проведение процесса исследования, подготовка работы к публикации.
 Чугаев Д.В. — формулировка целей и задач исследования, разработка и проектирование методологии, внесение корректировки в первоначальный вариант, подготовка работы к публикации.
 Куляба Т.А. — редактирование статьи.
 Петухов А.И. — редактирование статьи.

Научная статья

УДК 616.71-004.8-089.844-74-003.93

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2024-31-1-28-41>



Применение композитных скаффолдов на основе стеклоуглерода в инженерии костной ткани

Е.И. Тимошук, Д.В. Пономарева✉, А.Р. Гареев

Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита «НИИГрафит», Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Дарья Владимировна Пономарева, DVPonomareva@rosatom.ru

Аннотация

Введение. Восстановление костных дефектов остаётся одной из острых проблем регенеративной медицины, для решения которой наиболее перспективным является использование тканево-инженерных конструкций на основе композитных скаффолдов, стимулирующих остеогенез. Одна из основных задач тканевой инженерии — разработка скаффолда, имитирующего трехмерную архитектуру, для остеогенных прогениторных клеток внутри скаффолда с возможностью взаимодействия клеток с химическими и физическими стимулами естественной кости.

Цель работы — оценить возможность применения композитных скаффолдов на основе стеклоуглерода в тканевой инженерии.

Материалы и методы. В данном исследовании описан воспроизводимый метод получения трехмерных пористых скаффолдов на основе стеклоуглерода с поверхностями, модифицированными пироуглеродом (CF-C) и пироуглеродом с гидроксиапатитом (CF-C-HAP), и исследованы пористость, прочностные характеристики, цитотоксичность, остеоиндуктивность полученных композитных скаффолдов. Остеогенную дифференциацию культивируемых мезенхимальных стволовых клеток (МСК) человека оценивали на скаффолдах CF-C и CF-C-HAP с использованием общих остеогенных маркеров, таких как активность щелочной фосфатазы (ЩФ), окрашивание ализарином красным и количественной ПЦР в реальном времени (qPCR).

Результаты. Исследования *in vitro* показали биосовместимость разработанных скаффолдов. Установлена способность CF-C-HAP индуцировать дифференцировку МСК в остеогенном направлении и продуцировать кальцийсодержащий матрикс.

Обсуждение. Получаемые на основе стеклоуглеродной пены скаффолды с покрытиями пироуглеродом и гидроксиапатитом обладают трехмерной структурой с открытой пористостью, прочностью, сопоставимой с прочностью замещаемой ткани, и имитируют структуру трабекулярной кости. При этом прочность стеклоуглеродной пены без покрытий отличается низкими значениями предела прочности при сжатии. Для всех исследуемых материалов установлено наличие адгезионной и пролиферативной активности МСК, высокой клеточной адгезии и отсутствие цитотоксичности. Определение уровня экспрессии мРНК методом ПЦР в реальном времени показало, что у клеток, культивированных на CF-C-HAP, через 14 сут. наблюдается экспрессия генов VDR, BMP7, IGFR1, SPP1, что демонстрирует остеогенный потенциал. Результаты наших исследований по изучению активности фосфатазы и окрашивания ализариновым красным продемонстрировали, что скаффолд CF-C-HAP стимулирует дифференцировку остеобластов *in vitro* в остеогенном направлении, а также процессы внутриклеточной минерализации.

Заключение. Композитные скаффолды CF-C-HAP на основе стеклоуглеродной пены поддерживают пролиферацию и дифференциацию клеток и могут быть перспективными для использования в инженерии костной ткани.

Ключевые слова: скаффолд, стеклоуглерод, гидроксиапатит, остеогенез, мезенхимальные стромальные клетки, восстановление костной ткани

Для цитирования: Тимошук Е.И., Пономарева Д.В., Гареев А.Р. Применение композитных скаффолдов на основе стеклоуглерода в инженерии костной ткани. *Гений ортопедии*. 2025;31(1):28-41. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-28-41.



Possible application of glassy carbon composite scaffolds in bone tissue engineering

E.I. Timoshchuk, D.V. Ponomareva✉, A.R. Gareev

Research Institute of Structural Materials Based on Graphite "NIIgrazit", Moscow, Russian Federation

Corresponding author: Daria V. Ponomareva, DVPonomareva@rosatom.ru

Annotation

Introduction Bone defect management remains one of the challenging problems of regenerative medicine, for the solution of which the most promising trend is the use of tissue-engineered implants based on composite scaffolds that stimulate osteogenesis. One of the main tasks of tissue engineering is the development of a scaffold that mimics three-dimensional architecture for osteogenic progenitor cells inside the scaffold, with the possibility of cell interaction with appropriate chemical and physical stimuli of natural bone.

The **purpose** of the work is to evaluate the possibility of using composite scaffolds based on glassy carbon in tissue engineering.

Materials and Methods This study describes a reproducible method of obtaining three-dimensional porous glass-carbon-based scaffolds with surfaces modified with pyrocarbon (CF-C) and pyrocarbon and hydroxyapatite (CF-C-HAP) and investigates the porosity, strength characteristics, cytotoxicity, and osteoinductivity of the composite scaffolds obtained. Osteogenic differentiation of cultured human mesenchymal stem cells (MSCs) was evaluated on CF-C and CF-C-HAP scaffolds using common osteogenic markers such as: alkaline phosphatase (ALP) activity, alizarin red staining and quantitative real-time PCR (qPCR).

Results *In vitro* studies showed the biocompatibility of the developed scaffolds. The ability of CF-C-HAP to induce MSC differentiation in osteogenic direction and to produce calcium-containing matrix was established.

Discussion The scaffolds based on glassy carbon foam with pyrocarbon and hydroxyapatite coatings have a three-dimensional structure with open porosity, along with the strength comparable to the strength of the replaced tissue, and imitate the structure of trabecular bone. However, the strength of glassy carbon foam without coating is characterized by low compressive strength. All the studied materials demonstrated adhesive and proliferative activity of MSCs, high cell adhesion and absence of cytotoxicity. Determination of the mRNA expression level by real-time PCR showed that after 14 days, cells cultured on CS-C-HAP showed expression of the VDR, BMP7, IGFR1, SPP1 genes, what demonstrates osteogenic potential. The results of our studies on phosphatase activity and alizarin red staining demonstrated that the CF-C-HAP scaffold stimulates osteoblast differentiation *in vitro* in the osteogenic direction, as well as intracellular mineralization processes.

Conclusion Composite CF-C-HAP scaffolds based on glassy carbon foam support cell proliferation and differentiation and may be promising for use in bone tissue engineering.

Keywords: scaffold, glassy carbon, hydroxyapatite, osteogenesis, mesenchymal stromal cells, bone tissue engineering

For citation: Timoshchuk EI, Ponomareva DV, Gareev AR. Possible application of glassy carbon composite scaffolds in bone tissue engineering. *Genij Ortopedii*. 2025;31(1):28-41. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-28-41.

ВВЕДЕНИЕ

Кость является твердым, васкуляризированным органом человека, выполняющим защитную и опорно-механическую функции. Помимо этого, костную ткань можно отнести к части эндокринной системы: остеокальцин секретируется преимущественно остеобластами и в декарбоксилированном виде способен связываться с собственным рецептором на бета-клетках поджелудочной железы и клетках Лейдига [1], FGF23 (фактор роста фибробластов 23) синтезируется остеоцитами и является основным регулятором фосфорно-кальциевого обмена [1]. Костная ткань обладает хорошими регенеративными свойствами и способна восстанавливать свою структуру без образования рубцовой фиброзной ткани, однако в случае разможения или наличия отягчающих факторов, таких как старческий возраст и/или сопутствующие соматические заболевания, возможно отклонение регенерации костной ткани от органотипической в сторону заместительной (формирование фиброзной и хрящевой ткани) [2]. В случае возникновения дефектов критического размера самостоятельное восстановление становится невозможным, и требуется медицинское вмешательство. Обширные дефекты костной ткани могут быть вызваны различными факторами: травмы, опухолевые и инфекционные процессы, хирургические вмешательства (резекция патологических участков). Кроме этого, увеличение гериатрической популяции также способствует росту числа заболеваний опорно-двигательной системы.

Традиционно подходы к лечению дефектов критического размера включают использование ауто- и аллотрансплантатов [3, 4]. Аутоотрансплантаты считаются «золотым стандартом» за счет наличия хорошей остеоиндуктивности, остеокондуктивности, остеоинтеграции, способствующей формированию ткани в месте дефекта [5, 6]. Однако использование аутоотрансплантатов сопровождается рядом существенных недостатков, таких как увеличение объема оперативного вмешательства, ограниченный объем донорской ткани, возрастание риска возникновения постоперационных осложнений (инфицирование, кровотечение, повреждение нервно-сосудистой системы донорского участка). К недостаткам аллотрансплантатов относятся низкая остеоиндуктивность, риск передачи инфекционных заболеваний от реципиента к донору, возможность развития реакции гистонесовместимости и хронического воспаления, а также этические и религиозные принципы [7–9].

В последние годы тканевую инженерию рассматривают перспективной альтернативой ауто- и аллотрансплантатам для лечения заболеваний и повреждений костной ткани [10, 11]. В концепцию тканевой инженерии входят три основных блока: клетки, скаффолд и остеоиндуктивные факторы роста [12, 13].

Благодаря своей биоинертности, пористые материалы на основе углерода могут быть кандидатными для использования в качестве скаффолдов. Сообщалось, что скаффолды на основе композита гидроксиапатит / пористый углерод способствуют адгезии и пролиферации MG-63 [14]. Однако, несмотря на это, использование пористых углеродных материалов в качестве скаффолдов ограничено, что связано с их незначительными прочностными характеристиками (например, прочность при сжатии углеродной пены Duacel® составляет 0,47 МПа). В связи с тем, что имплантируемые скаффолды подвергаются различным механическим нагрузкам, включая сжатие, растяжение, кручение и сдвиг [1], крайне важной задачей является создание материала, способного выдерживать нагрузку в процессе регенерации.

Цель работы — оценить возможность применения композитных скаффолдов на основе стеклоуглерода в тканевой инженерии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Композитные скаффолды. В качестве углеродного прекурсора использован коммерчески доступный порошок фенолформальдегидной смолы марки СФП-012А2 (ООО «Метадинеа»). Порошок фенолформальдегидной смолы растворяли в этиловом спирте с получением раствора с концентрацией 30 масс. % для последующей импрегнации полимерных темплатов (Regicell® PPI 80). Импрегнацию образцов проводили путем погружения в спиртовой раствор фенолформальдегидной смолы при температуре 35–40 °С с обработкой в ультразвуковой ванне в течение 30 мин., после чего образцы извлекали и отжимом из них удаляли излишек импрегнирующего раствора. Пропитанные образцы сушили с применением принудительной конвекции в течение 15 мин. при температуре 70 °С. Затем сушку осуществляли в сушильном шкафу при температурах 70, 90, 120 °С. Отверждение проводили при температуре 150 °С в течение 4 ч. Пиролиз пен-прекурсоров проводили в атмосфере азота при температуре (1000 ± 50) °С, со скоростью подъема температуры 2,5 °С/мин и изотермической выдержкой в течение 30 мин. В результате пиролиза получали стеклоуглеродную пену, реплицирующую полимер предшественник. Затем проводили процесс осаждения пироуглерода на поверхность стеклоуглеродной пены методом CVI. В качестве газа прекурсора использовали метан (чистота 99,9 %, АО «МПЗ», Россия), температура процесса составляла (1050 ± 50) °С, продолжительность процесса — 20 ч.

Покрытие на основе гидроксиапатита. Для придания материалу остеоиндуктивных свойств его поверхность модифицировали гидроксиапатитом. Для этого проводили операции, описанные ниже.

Пористый углеродный скаффолд с пироуглеродным покрытием с геометрическими размерами $10 \times 10 \times 20$ мм обезжиривали и очищали от механических примесей путем кипячения в этиловом спирте, после чего промывали дистиллированной водой до нейтрального pH. Очищенный скаффолд погружали в раствор электролита с концентрацией компонентов, обеспечивающей соотношение Ca/P — 1,67, pH поддерживали на уровне 3–5, время осаждения составляло 25 мин. при температуре 40°C при постоянном перемешивании магнитной мешалкой. Образец углеродного скаффолда с пироуглеродным покрытием, выступающий в качестве катода, помещали в центр спиралевидного платинового анода. Для электрохимического осаждения использовали источник тока Matrix MPS-3020 (China). По окончании электролитического осаждения образец извлекали и сушили на воздухе до постоянной массы, после чего осуществляли удаление остатков электролита отмывкой в дистиллированной воде до нейтрального pH промывных вод. Отмытый образец подвергали сушке при температуре 140°C до постоянной массы.

Образцы маркировали следующим образом: CF (*англ.*: carbon foam) — стеклоуглеродная пена, C (*англ.*: carbon coating) — пироуглеродное покрытие, НАР (*англ.*: hydroxyapatite) — гидроксиапатит.

Плотность и пористость. Объемная плотность образцов рассчитана как отношение массы к объему, объем определен измерением геометрических размеров образца с помощью цифрового штангенциркуля. Пикнометрия с использованием гелия осуществлена для установления истинной плотности углеродного «скелета» на приборе AccuPyc II 1340 [13].

Пористость P (%) и объем пор V_p ($\text{см}^3/\text{г}$):

$$P = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}\right) \times 100 \% \quad (1)$$

$$V_p = \frac{1}{\rho_b} - \frac{1}{\rho_s} \quad (2)$$

где ρ_b — объемная плотность, $\text{г}/\text{см}^3$; ρ_s — истинная плотность, $\text{г}/\text{см}^3$.

Предел прочности при сжатии. Механические свойства скаффолдов исследовали при комнатной температуре на универсальной испытательной машине производства Zwick/Roell (Германия) при постоянной скорости перемещения активной траверсы $0,5 \text{ мм}/\text{мин}$.

Для проведения испытаний по определению предела прочности при сжатии использованы образцы формы параллелепипеда размерами $10 \times 10 \times 20 \text{ мм}$.

При подготовке (вырезке) образцов обращали внимание на обработку нагруженных поверхностей. Торцы образцов изготавливали плоскопараллельными друг другу во избежание перекоса при нагружении. В противном случае разрушение могло произойти на торцах образца, предел прочности при этом был бы значительно ниже фактического. Для минимизации влияния перекоса испытания проводили с применением специальной плавающей опоры (рис. 1). Во время испытания производили запись диаграммы нагружения в координатах «Нагрузка-деформация», предел прочности $\sigma_{\text{сж}}$ рассчитывали по формуле:

$$\sigma_{\text{сж}} = P_{\text{max}} / bh \quad (3)$$

где: P_{max} — максимальная нагрузка, Н; b — ширина образца, мм; h — толщина образца, мм.

Для статистической достоверности данных получено среднее значение, по меньшей мере, пяти различных измерений и вычислено стандартное отклонение.

Клеточная культура. При проведении исследования использовали первичную культуру мезенхимальных стромальных клеток из пульпы зуба человека (DPSC), фенотип которых (CD44+CD54+, CD90+, CD105+, CD34–, CD45–, HLA–DR–, CD31–, CD133–) соответствует МСК. Первичную культуру мультипотентных мезенхимальных стромальных клеток человека выделяли из зачатка третьего моляра, извлеченного по ортодонтическим показаниям (DPSC, Dental Pulp Stem Cells) у здорового пациента 16 лет. Асептически извлеченный зачаток зуба измельчали ножницами до размеров $1\text{--}2 \text{ мм}^3$ и диссоциировали раствором $0,25\%$ трипсин — $0,02\%$ ЭДТА (этилендиаминтетрауксусная кислота) (ПанЭко, Россия) в течение 30 мин. при 37°C . Выделенные клетки центрифугировали в течение 3 мин. при 200 g и помещали в среду для культивирования DMEM/F-12 (*англ.*: Dulbecco's modified Eagles medium, ПанЭко) в соотношении 1:1 с добавлением 10% фетальной сыворотки крупного

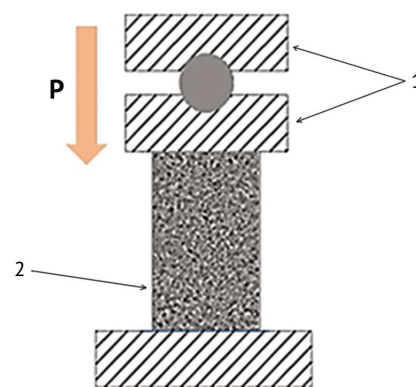


Рис. 1. Схема нагружения: 1 — плавающая опора, 2 — образец углеродного пористого материала

рогатого скота (ЭТС), переносили в 25 см² флаконы и культивировали в атмосфере 5 % CO₂ при 37 °C в среде DMEM (ПанЭко), содержащей 10 % ЭТС (HyClone), 100 ед./мл пенициллина/стрептомицина с добавлением 2 мМ L-глутамина. При достижении субконфлюентного состояния клетки обрабатывали 0,25 % раствором трипсин-ЭДТА и переносили в 75 см² флаконы, культивирование проводили в среде DMEM/F-12 10 % ЭТС, 100 ед./мл пенициллина/стрептомицина и добавлением 2 мМ L-глутамина в соотношении 1:1 (Life technologies, США) при 37 °C в атмосфере 5 % CO₂. По мере роста и достижения субконфлюентного состояния клетки обрабатывали 0,25 % раствором трипсин-ЭДТА и пассировали в новые флаконы в соотношении 1:2. Для проведения исследований использовали клетки на 3 пассаже.

Цитотоксичность. Исследование жизнеспособности клеток проводили с применением МТТ-теста, основанного на восстановлении бесцветной соли тетразолия (3-[4,5-диметилтиазол-2-ил]-2,5-дифенил-тетразолия бромид, МТТ) митохондриальными и цитоплазматическими дегидрогеназами живых метаболически активных клеток с образованием голубых кристаллов формазана, растворимого в диметилсульфоксиде.

Спустя 2 сут. после внесения вытяжек материалов культуральную среду удаляли и в каждую лунку вносили по 100 мкл раствора МТТ 0,5 мг/мл в культуральной среде DMEM/F12 без сыворотки. После выдерживания в течение 3 час. при 37 °C в увлажненной атмосфере 5 % CO₂ жидкость удаляли, вносили по 100 мкл диметилсульфоксида (ДМСО) и, встряхивая планшеты при комнатной температуре в течение 10 мин., растворяли образовавшиеся соли формазана. Количество восстановленного формазана определяли по оптической плотности растворов на фотометре модели 680 (BIO-RAD, США) при длине волны 540 нм. Статистический анализ полученных результатов проводили с использованием непараметрического U-критерия Манна – Уитни (Mann – Whitney U-test). За ошибку принимали среднеквадратичное отклонение от среднего значения, за достоверные принимали различия по U-критерию Манна – Уитни при $p < 0,05$.

Жизнеспособность, адгезионная, пролиферативная и дифференцировочная активность МСК человека. Для проведения исследования жизнеспособности, адгезионной, пролиферативной и дифференцировочной активности МСК человека клетки высевали на поверхности образцов с плотностью 40 тыс./см² и культивировали в течение 14 сут., при этом объем среды составил 0,5 мл/лунку. Смену среды производили каждые 3–4 дня. Дифференцировочную активность клеток оценивали путем определения степени кальцификации и выявления активности в клетках щелочной фосфатазы. Для определения жизнеспособности клеток использовали метод флуоресцентного окрашивания смесью красителей SYTO 9, йодида пропидия и Hoechst 33342. Флуоресцентный краситель SYTO 9 в режиме исследования $\lambda_{\text{возб}} = 450\text{--}490$ нм, $\lambda_{\text{эмисс}} = 515\text{--}565$ нм окрашивал в зеленый цвет ДНК и РНК живых и мертвых клеток. Интеркалирующий реагент йодид пропидия в режиме исследования $\lambda_{\text{возб}} = 546$ нм, $\lambda_{\text{эмисс}} = 575\text{--}640$ нм окрашивал в красный цвет ядра погибших клеток. Флуоресцентный краситель Hoechst 33342 в режиме исследования $\lambda_{\text{возб}} = 355$ нм, $\lambda_{\text{эмисс}} = 460$ нм окрашивал в синий цвет ДНК живых и мертвых клеток. Микрофотосъемку клеток проводили на микроскопе Axiovert 200 (Carl Zeiss, Германия).

Степень кальцификации определяли путем окрашивания отложений фосфорнокислого кальция красителем ализариновый красный (рН = 4,1). Для этого после окончания культивирования клетки промывали 0,01 М фосфатным буфером (рН = 7,4) и фиксировали в течение 20 мин. в 3,7 % забуференном растворе формальдегида. После удаления фиксатора и промывки деионизованной водой клетки были окрашены 2 % раствором ализаринового красного в течение 5 мин. для выявления образования минерализованного матрикса. Оценку морфологии клеток и количества кальцификатов проводили на микроскопе Axiovert 200 (Carl Zeiss, Германия).

Определение активности щелочной фосфатазы проводили с использованием набора реагентов (Alkaline phosphatase kit, Sigma 86-R) согласно инструкции производителя. Клетки фиксировали в течение 30 сек. цитрат-ацетон-формальдегидным фиксатором, промывали деионизованной водой и окрашивали в течение 15 мин. забуференным раствором, содержащим нафтол-AS-фосфат, fast red violet (хромогенный субстрат, используемый для определения активности щелочной фосфатазы). Промывали лунки деионизованной водой и в течение 2 мин. проводили докрасивание раствором гематоксилина. После трехкратной промывки деионизованной водой образцы подсушивали на воздухе. Оценку морфологии и окрашивания клеток проводили на микроскопе Axiovert 200 (Carl Zeiss, Германия).

По завершении культивирования проводили подготовку образцов для исследования методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Образцы промывали в 0,1 М фосфатно-солевом буфере (рН = 7,4) и фиксировали 12 час. при температуре 5 °C в 2,5 % забуференном растворе глутарового альдегида. После фиксации образцы промывали водой и дегидратировали при 4 °C последовательно в батарее водного раствора этанола возрастающей концентрации (50 %, 75 %, 80 %, 90 %) и в абсолютном этаноле на заключительном этапе. На каждой стадии образцы дважды погружали на 5 мин. в соответствующий раствор этилового спирта. Для удаления спирта образцы переносили на 30 мин. в гексаметилдисилазан

(HMDS), после чего высушивали на воздухе. Исследование микроструктуры образцов проводили на сканирующем электронном микроскопе с автоэмиссионным источником Tescan Vega II (TESCAN, Чехия) во вторичных электронах (детектор типа SE) при ускоряющем напряжении 20 кВ.

Фенотипический экспрессионный профиль культивируемых клеток оценивали методом ПЦР в реальном времени на 14-е сут. Исследовали экспрессию 22 генов-маркеров, отображающих процессы остеогенной дифференцировки. Анализируемые гены подбирали из базы данных <http://www.sabiosciences.com/> для ПЦР-профилирования различных биологических процессов (табл. 1).

Уровень транскрипции генов нормировался по средним уровням экспрессии хаус-кипинг генов β -актина и rplp0 (ribosomal protein, large, P0). Ген-специфические праймеры подбирали в программе Primer Express 3 (Applied Biosystems, США) (табл. 1). Для выделения общей матричной РНК из клеток применяли набор «Выделение полноразмерной поли (А) мРНК на магнитных частицах» (Силекс, Россия). Полученную мРНК использовали для синтеза комплементарной ДНК с помощью набора «Синтез первой цепи кДНК (олиго(дТ)15)» (Евроген, Россия). кДНК использовали в качестве матрицы для ПЦР в реальном времени, который проводили на приборе CFX 96 (BioRad, США), используя набор фирмы Евроген, содержащий интеркалирующий краситель SybrGreen. Для этого реакционную смесь размораживали и тщательно перемешивали. Смешивали компоненты реакции в следующей последовательности (на 25 мкл реакции): qPCRmix-HS SYBR — 5 мкл, ПЦР праймер 1 — 0,3 мкМ, ПЦР праймер 2 — 0,3 мкМ, кДНК матрица — 1 нг на реакцию и стерильная вода — до 25 мкл. Концентрация праймеров в реакциях по оптимизации составляла 0,05 пмоль/мкл, концентрация ионов Mg^{2+} составляла от 1,5 мМ, концентрация фермента от 0,2 ед. на 20 мкл реакции. Длина праймеров составляла в среднем 24 нуклеотида. Температура отжига 60 °С, длина амплифицируемого фрагмента 94–100 пар нуклеотидов.

Таблица 1

Гены, экспрессию которых оценивали в исследовании

Аббревиатура	Название гена	NCBI Reference Sequence
ALPL	alkaline phosphatase, liver/bone/kidney	NM_000478.4
BGLAP	osteocalcin (bone gamma-carboxyglutamate (gla) protein)	NM_199173.4
BMP1	bone morphogenetic protein 1	NM_006129.4
BMPR1A	bone morphogenetic protein receptor, type IA	NM_004329.2
COL1A1	collagen, type I, alpha 1	NM_000088.3
COL3A1	collagen, type III, alpha 1	NM_000090.3
EGFR	epidermal growth factor receptor	NM_005228.3
FGF-2	fibroblast growth factor 2 (basic)	NM_002006.4
FGFR1	fibroblast growth factor receptor 1	NM_015850.3
IGF1	insulin-like growth factor 1 (somatomedin C)	NM_000618.3
IGFR1	insulin-like growth factor 1 receptor	NM_000875.3
IGF2	insulin-like growth factor 2	NM_000612
RUNX2	runt-related transcription factor 2	NM_004348.3
SMAD2	SMAD family member 2	NM_005901.5
SMAD4	SMAD family member 4	NM_005359.5
SMAD5	SMAD family member 5	NM_005903.6
SPP1	osteopontin-1 (secreted phosphoprotein 1)	NM_000582.2
TGFR1	transforming growth factor, beta receptor 1	NM_004612.2
TNF	tumor necrosis factor	NM_000594.3
VDR	vitamin D (1,25-dihydroxyvitamin D3) receptor	NM_000376.2
BMP7	bone morphogenetic protein 7	NM_001719.2
TWIST1	twist family bHLH transcription factor 1	NM_000474.3
RPLP0	ribosomal protein, large, P0	NM_001002.3
ACTIN	beta-actin	XM_006715764.1

Реакцию проводили по следующей схеме: 1 цикл 95 °С — 5 мин; 2–40 циклы 95 °С — 30 сек, 60 °С — 40 сек; 1 цикл (стадия диссоциации) 95 °С — 15 сек, 60 °С — 1 мин, 95 °С — 15 сек. Для определения специфичности реакции продукты амплификации проверяли электрофорезом в 2 % агарозе. Также специфичность реакции определяли по кривым температурной диссоциации ампликонов с помощью программы CFX Manager 2.0 (BioRad, США). Анализ данных, полученных с помощью ПЦР в реальном времени, производили по пороговой флуоресценции методом $\Delta\Delta C(T)$, используя web ресурс для анализа PCR данных Qiagen (<http://www.qiagen.com>), построение тепловых карт экспрессии генов проводили с помощью программы Genesis (https://genome.tugraz.at/genesisclient/genesisclient_description.shtml).

Полученные данные экспрессии анализировали методом пороговой флуоресценции методом $\Delta C(T)$:

$$\Delta C(T)_{\text{гена}} = C(T)_{\text{гена}} - C(T)_{\text{хаус кипинг}},$$

где $C(T)_{\text{хаус кипинг}}$ — пороговая флуоресценция хаус кипинг гена.

Разницу между экспрессией гена в опыте и контроле вычисляли методом $\Delta\Delta C(T)$:

$$\Delta\Delta C(T)_{\text{гена}} = \Delta C(T)_{\text{гена опыт}} - \Delta C(T)_{\text{гена контр.}}$$

Относительный уровень экспрессии гена вычисляли по формуле:

$$\text{Отн. экспр.} = 2^{\Delta\Delta C(T)_{\text{гена}}}.$$

Для анализа массива данных использовали онлайн сервисы <http://www.qiagen.com/>, программу Mayday-2.14 (Center for Bioinformatics Tübingen, Германия) и программу Genesis (Sturn et al., 2002). Контролем служил образец без стадии обратной транскрипции. Учитывались лишь те результаты, для которых изменения уровня экспрессии генов наблюдали при $p < 0,05$.

Статистическую обработку результатов проводили с помощью программы Origin 8.1, за ошибку принимали среднеквадратичное отклонение от среднего значения, за достоверные принимали различия по U-критерию Манна – Уитни при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 и 3 представлены СЭМ-фотографии углеродных скаффолдов с различным типом модификации поверхности и без нее в сравнении с губчатой костью. Все исследуемые образцы имеют ячеистую структуру, состоящую из ячеек, сообщающихся между собой, по своей морфологии схожую с губчатой костью. Размер макропор находится в диапазоне от 150 до 200 мкм.

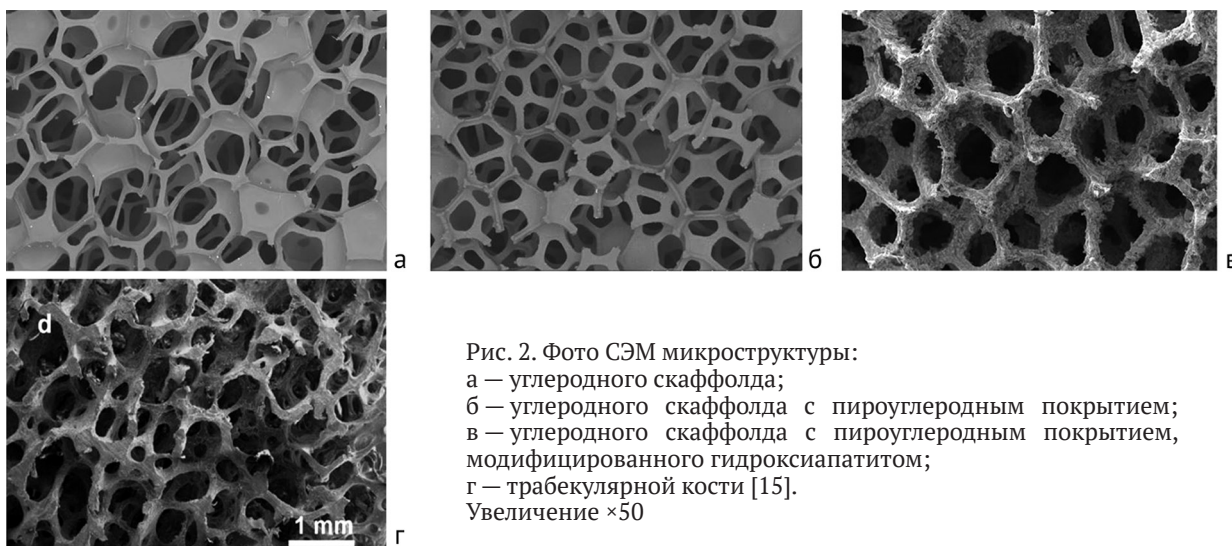


Рис. 2. Фото СЭМ микроструктуры:
а — углеродного скаффолда;
б — углеродного скаффолда с пироуглеродным покрытием;
в — углеродного скаффолда с пироуглеродным покрытием, модифицированного гидроксиапатитом;
г — трабекулярной кости [15].
Увеличение $\times 50$

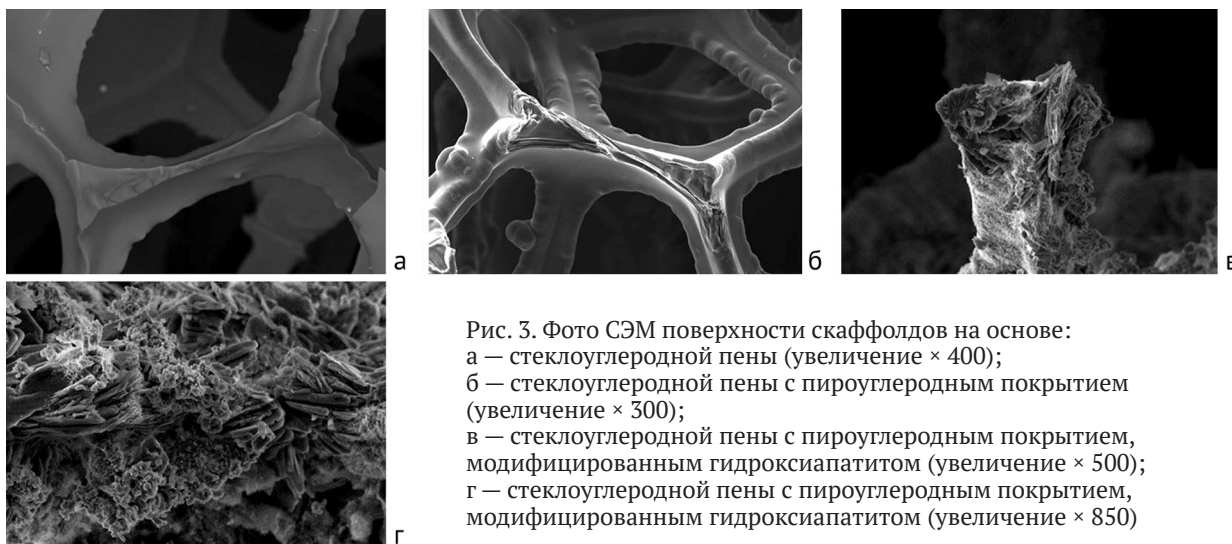


Рис. 3. Фото СЭМ поверхности скаффолдов на основе:
а — стеклоуглеродной пены (увеличение $\times 400$);
б — стеклоуглеродной пены с пироуглеродным покрытием (увеличение $\times 300$);
в — стеклоуглеродной пены с пироуглеродным покрытием, модифицированным гидроксиапатитом (увеличение $\times 500$);
г — стеклоуглеродной пены с пироуглеродным покрытием, модифицированным гидроксиапатитом (увеличение $\times 850$)

По своим механическим характеристикам скаффолды, используемые в тканевой инженерии, должны быть сопоставимы с характеристиками замещающей костной ткани (рис. 4).

Как видно из представленной зависимости, прочность при сжатии модифицированных скаффолдов составила ~ 3 МПа, что укладывается в диапазон значений для трабекулярной кости (2 ~ 10 МПа) [16]. Пористость исследуемых образцов находилась в диапазоне от 89 до 96 %.

На основании полученных данных для исследований *in vitro* отобраны образцы, получившие наилучшие результаты при проведении физико-механических испытаний, CF-C и CF-C-HAP.

Исследование метаболической активности МСК человека показало отсутствие токсического воздействия на клетки вытяжек из всех исследованных материалов (рис. 5).

Результаты исследования жизнеспособности, адгезионной и пролиферативной активности МСК человека при культивировании на поверхности углеродных скаффолдов, проведенного методами флуоресцентной микроскопии, приведены на рис. 6.

Метод дифференцированного флуоресцентного окрашивания основан на мониторинге жизнеспособных клеток в зависимости от целостности их мембраны. Краситель SYTO 9 окрашивает все клетки в культуре (зеленое окрашивание), в то время как нарушение целостности мембраны обеспечивает ее проницаемость для селективного ДНК-красителя пропидия иодида (красное окрашивание ядра). Hoechst 33342 является клеточным проницателем (синее окрашивание), окрашивает ДНК живых и мертвых клеток [17].

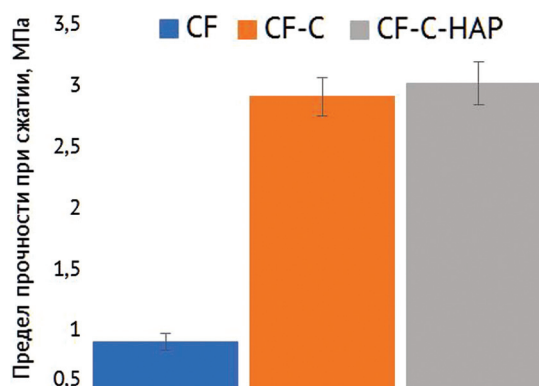


Рис. 4. Предел прочности при сжатии углеродных скаффолдов в зависимости от типа модификации поверхности

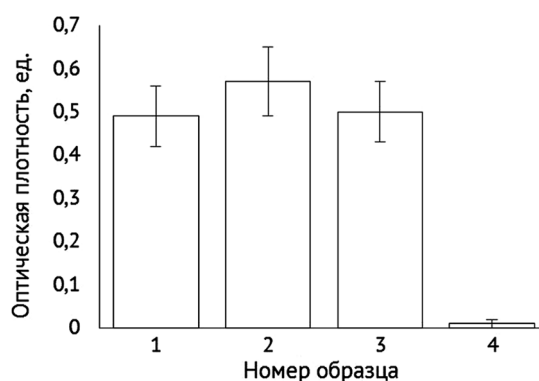


Рис. 5. Метаболическая активность МСК человека по результатам МТТ-теста при инкубации 48 ч с трехсуточными вытяжками из исследуемых материалов: 1 — CF-C; 2 — CF-C-HAP; 3 — контроль отрицательный (среда DMEM / F12); 4 — контроль положительный (среда DMEM / F12 + 10 % DMSO)

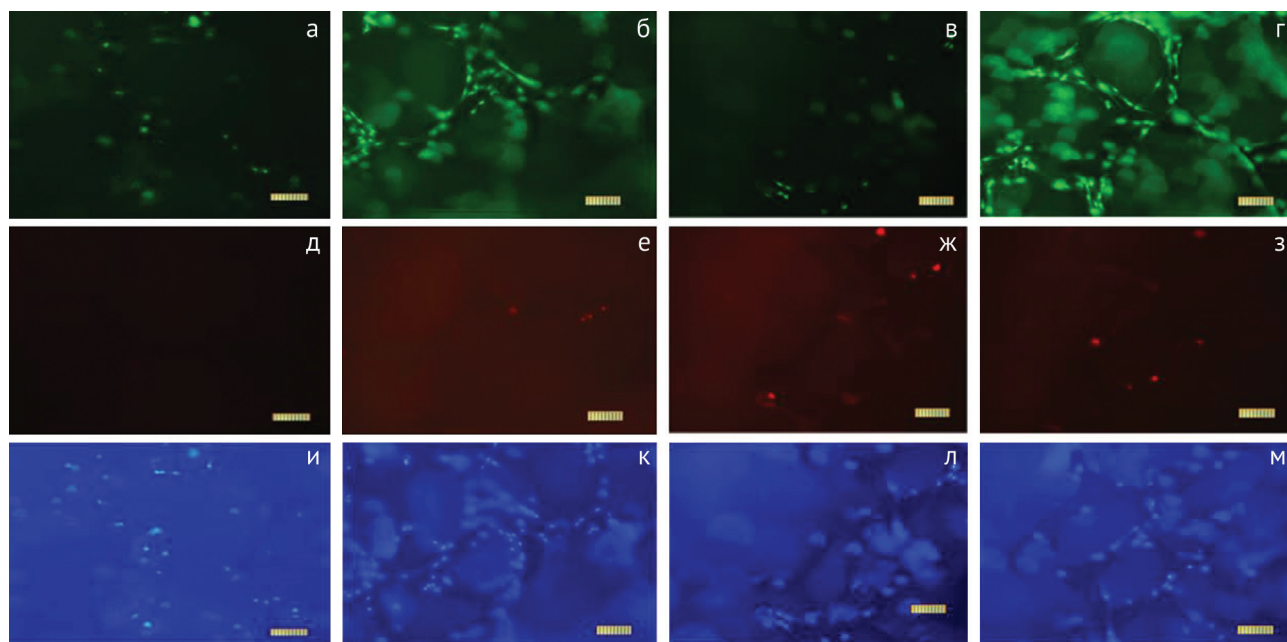


Рис. 6. Внешний МСК человека при культивировании на поверхности CF-C и CF-C-HAP на седьмые (а, д, и; в, ж, л) и четырнадцатые (б, е, к; г, з, м) сутки после посева. Окраска SYTO 9 (а, б, в, г); PI (д, е, ж, з); Hoechst 33342 (и, к, л, м). Линейка 100 мкм

Для контроля флуоресцентную микроскопию проводили на клетках, культивируемых на покровное стекло (рис. 7).

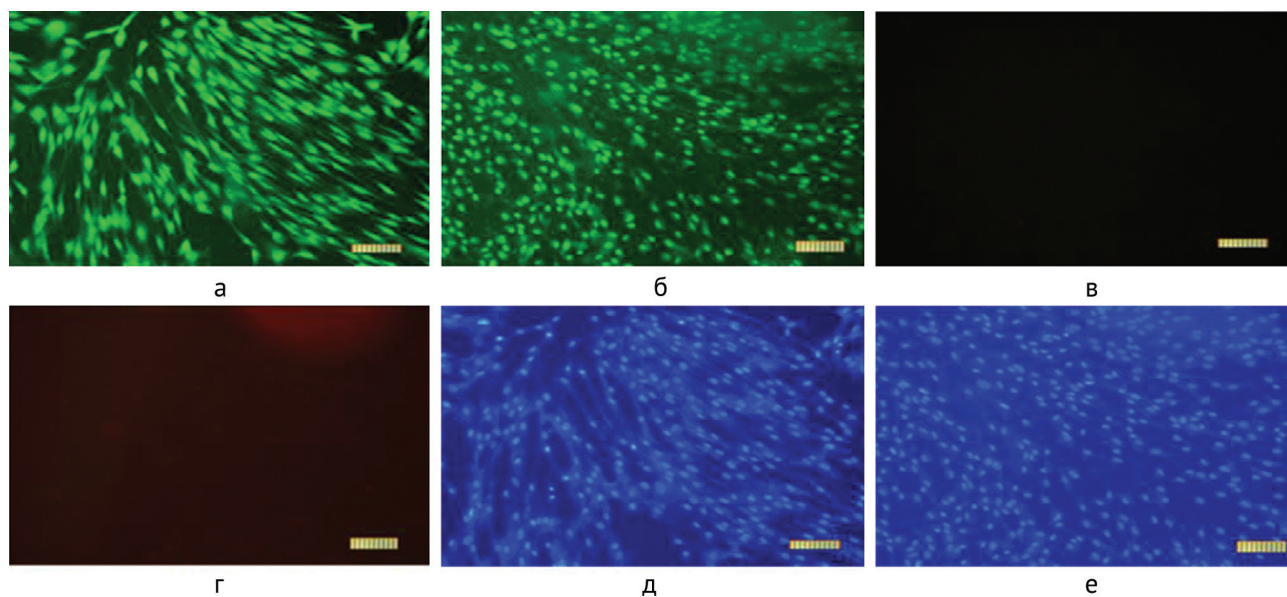


Рис. 7. Внешний вид МСК человека при культивировании на поверхности покровного стекла (контроль) на седьмые (а, в, д) и четырнадцатые (б, г, е) сутки после посева. Окраска SYTO 9 (а, б); PI (в, г); Hoechst 33342 (д, е). Линейка 100 мкм

Также, с помощью СЭМ, анализировали морфологию клеток после культивирования в течение 14 дней (рис. 8).

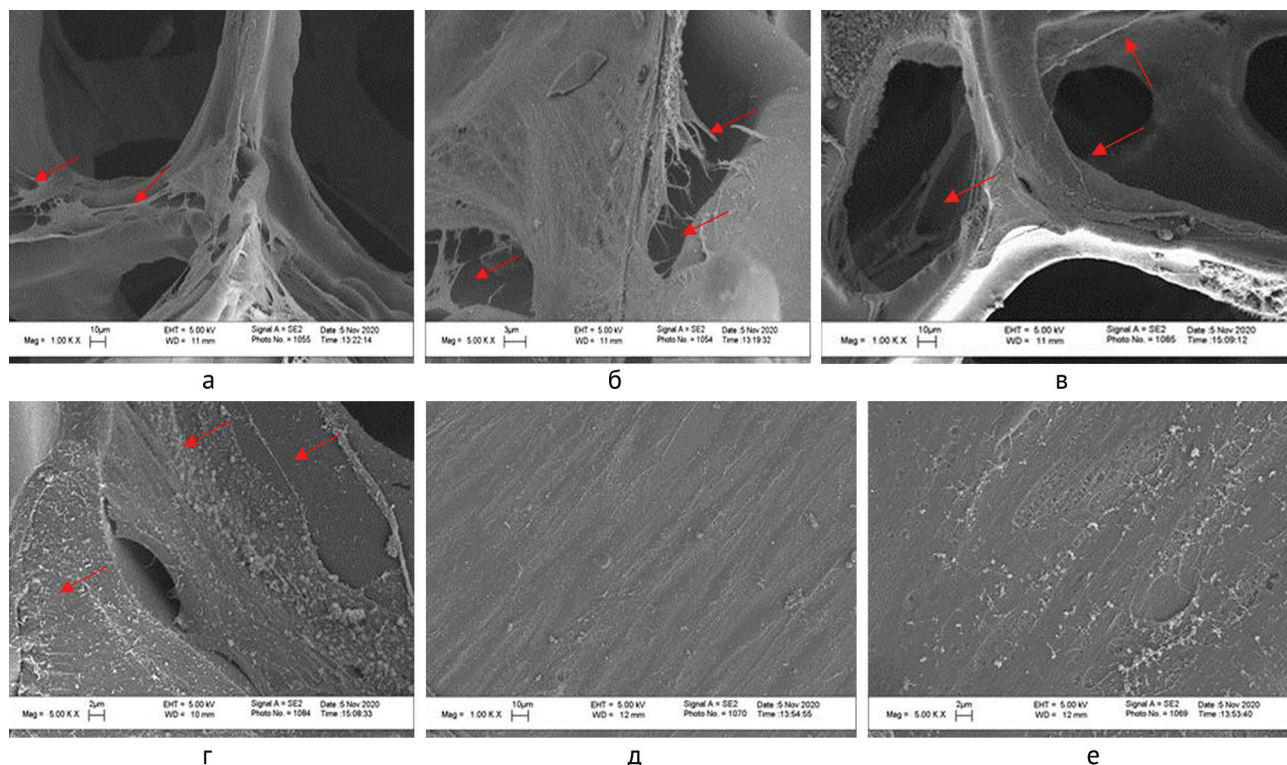


Рис. 8. Внешний вид МСК человека при культивировании на поверхности: скаффолдов на основе CF-C (а — увеличение 1000, б — увеличение 5000), CF-C-HAP (в — увеличение $\times 1000$, г — увеличение $\times 5000$) и покровного стекла (д — увеличение $\times 1000$, е — увеличение $\times 5000$) на 14-е сутки после посева

Определение уровня экспрессии мРНК с использованием метода ПЦР в реальном времени. В качестве контроля взят показатель МСК человека, культивируемых на покровном стекле в среде DMEM /F12 с добавкой 10 % ЭТС, 100 ед./мл пенициллина/стрептомицина.

Сравнение материалов с различной модификацией поверхности показало, что в культивируемых клетках наблюдаются преимущественно схожие паттерны экспрессии исследуемых генов (рис. 9, табл. 2). В целом при сравнении с контрольными образцами отмечали снижение транскрипционной активности всех исследуемых генов, но на образцах B1 и в клетках обнаружили увеличенное содержание транскриптов генов SPP1, VDR и BMP7.

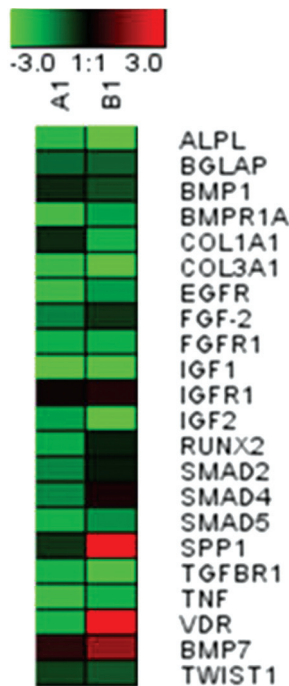


Рис. 9. Паттерны экспрессии генов в клетках, растущих на образцах A1 (CF-C), B1 (CF-C-HAP), в виде тепловых карт. На диаграммах: черный цвет — уровень экспрессии сравним с контролем, градации цвета от черного до зеленого отражают степень ингибирования экспрессии генов, градации от черного до красного цвета — уровень стимуляции относительно контроля

Таблица 2

Данные параметров изменений экспрессии генов из анализируемых образцов, выраженные через Log2

Гены	A1	B1
ALPL	-2,28	-3,80
BGLAP	-1,11	-0,76
BMP1	-0,47	-1,21
BMPR1A	-2,57	-1,14
COL1A1	-0,49	-2,50
COL3A1	-2,40	-3,33
EGFR	-2,47	-1,79
FGF-2	-1,40	1,10
FGFR1	-1,95	-1,85
IGF1	-2,90	-1,60
IGFR1	1,14	1,77
IGF2	-1,75	-2,17
RUNX2	-1,85	-0,81
SMAD2	-1,44	-0,59
SMAD4	-1,46	-0,65
SMAD5	-2,05	-1,87
SPP1	-0,58	46,21
TGFBR1	-2,08	-2,23
TNF	-2,49	-1,88
VDR	-2,09	17,51
BMP7	1,44	1,62
TWIST1	-0,73	-0,95

Остеоиндуктивный потенциал пористых матриксов на основе углерода. Начальные этапы остеогенной дифференцировки МСК анализировали с помощью набора Alkaline Phosphatase Kit (Sigma-Aldrich, США), оценивая гистохимическое выявление в клетках активности щелочной фосфатазы. Щелочная фосфатаза, эктофермент, секретируемый зрелыми остеобластами, является ранним фенотипическим маркером остеогенной дифференцировки МСК [18–20]. Активность щелочной фосфатазы обычно отмечают *in vitro* на седьмой день после начала остеоиндукции и визуализируют при окрашивании на 14 день.

Для оценки влияния скаффолдов на остеогенную дифференцировку клетки культивировали на поверхность покровного стекла, CF-C, CF-C-HAP (рис. 10).

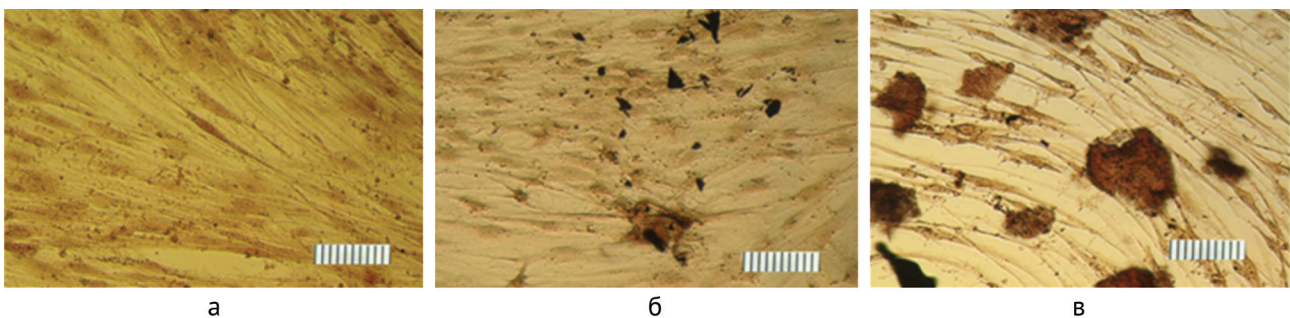


Рис. 10. Активность щелочной фосфатазы МСК человека, культивированных в течение 14 дней на поверхности образцов материалов: покровное стекло (а), CF-C (б); CF-C-HAP (в). Среда DMEM/F-12. Линейка 100 мкм

Одним из количественных методов определения минерализации во время остеогенной дифференциации является окрашивание ализариновым красным. Внешний вид МСК, культивированных в течение 14 сут., показан на рис. 11.

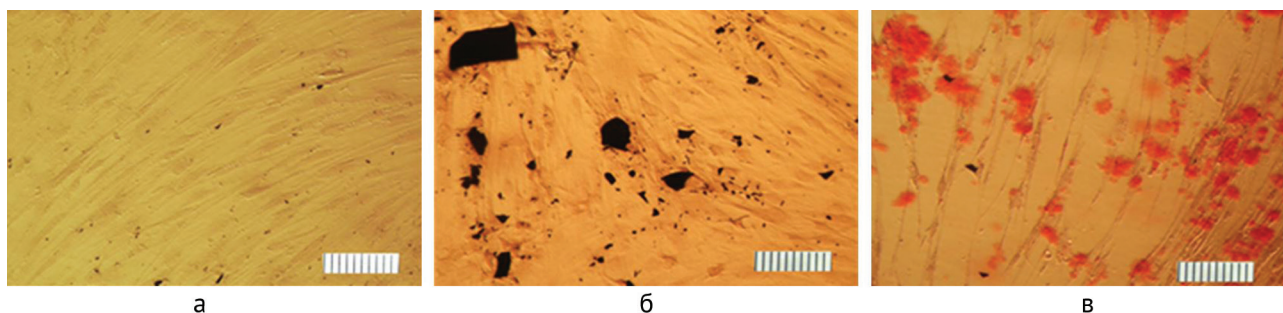


Рис. 11. Внешний вид МСК, культивированных в течение 14 суток в среде DMEM/F-12 (а) и в присутствии образцов материалов CS (б); CS-NAP (в). Окрашивание ализариновым красным. Линейка 100 мкм

ОБСУЖДЕНИЕ

Одной из основных задач тканевой инженерии является разработка скаффолда, имитирующего трехмерную архитектуру, для остеогенных прогениторных клеток внутри скаффолда с возможностью взаимодействия клеток с соответствующими химическими и физическими стимулами естественной кости [21]. Несмотря на значительное количество исследований, проводимых в данном направлении, требования к конструкции скаффолдов для тканевой инженерии до конца не сформулированы. При этом выделяют ряд ключевых структурных характеристик, определяющих возможность межклеточного взаимодействия внутри скаффолда. Известно, что размер пор, степень канальной взаимосвязанности, а также общая пористость играют решающую роль в регулировании морфологии и поведения различных типов клеток [1, 22–25]. Пористость и размер пор вносят большой вклад в способность скаффолда поддерживать клеточную адгезию, что, в свою очередь, влияет на плотность заселения клеток в объеме скаффолда, а также их распространение и миграцию [24, 26]. Размеры пор, необходимые клеткам различного типа, существенно варьируют, но в среднем для эффективного роста, миграции клеток, а также проникновения питательных веществ и удаления продуктов жизнедеятельности приемлемым является диапазон размера пор 100–500 мкм. Увеличение размера пор скаффолда приводит к снижению площади поверхности, ограничению адгезии клеток и предотвращению образования белково-клеточных мостиков. Помимо этого, механические свойства скаффолда ухудшаются за счет увеличения объема пустот, что является еще одним критическим параметром в конструкции [17, 22]. У скаффолдов, предназначенных для регенерации костной ткани, размер пор в диапазоне 150–400 мкм является оптимальным для стимуляции остеогенеза и васкуляризации вглубь тканево-инженерной конструкции [22, 27].

В настоящем исследовании мы предлагаем технически простой и недорогой метод получения скаффолдов, имитирующих структуру трабекулярной костной ткани человека. В качестве основы композитного скаффолда выбрана стеклоглеродная пена. Стеклоглеродная пена на основе полиуретанового темплата представляет собой трехмерную структуру с размером пор 150–200 мкм, открытой пористостью, преимущественно состоящую из углерода. Поры в данном диапазоне способствуют инфильтрации клеток, участвующих в пролиферации, миграции и васкуляризации *in vivo* [27].

Благодаря сетчатой структуре, а также биоинертности, стеклоглеродные пены подходят для применения в качестве скаффолдов в тканевой инженерии [28, 29]. Наиболее значимыми характеристиками материала для использования в качестве скаффолдов являются пористость, прочность, отсутствие токсичности, остеоиндуктивность и остеокондуктивность [22, 30]. Материал скаффолда должен обладать прочностью, сопоставимой с прочностью замещаемой ткани. В связи с тем, что стеклоглеродные пены являются хрупкими материалами, их прочностные характеристики оценивают по пределу прочности при сжатии [28]. Предел прочности при сжатии и модуль упругости стеклоглеродных пен зависят, прежде всего, от таких параметров, как объемная плотность и пористость. Для скаффолдов чрезвычайно важно сохранить высокую открытую пористость, поскольку это благоприятствует адгезии и пролиферации клеток [27, 31]. Одним из путей повышения прочностных характеристик является модификация поверхности путем нанесения покрытий различной природы. Осаждение пироуглерода позволило повысить предел прочности при сжатии до ~3 МПа, при сохранении общей пористости на уровне 93 %. Высокая пористость скаффолда за счет значительной площади поверхности обеспечивает большее взаимодействие с внеклеточным матриксом [32], что, в свою очередь, способствует прорастанию костной ткани и васкуляризации [32]. Кроме того, постоянный контакт скаффолда с внеклеточным матриксом со временем приводит к окклюзии пор, в связи с чем высокая пористость скаффолда обеспечивает достаточную проницаемость для транспорта питательных веществ и биомолекул [32].

Для улучшения остеоиндуктивных свойств скаффолда поверхность дополнительно модифицировали гидроксиапатитом [27, 33]. Исследование СЭМ показало, что получаемое покрытие формируется как на внешних, так и на внутренних поверхностях скаффолда, является однородным и преимуще-

ственно состоит из пластинчатых кристаллов гидроксиапатита. Нанесение покрытия гидроксиапатита привело к незначительному повышению прочностных характеристик, что согласуется с результатами, полученными в работе S.F. Rahman [27].

Исследование метаболической активности МСК человека показало отсутствие токсического воздействия на клетки вытяжек из всех исследованных материалов. При этом отмечено некоторое увеличение оптической плотности раствора, в который добавлена вытяжка из CF-C-HAP (рис. 5), что может свидетельствовать о наличии в ней водорастворимых факторов, стимулирующих активность клеток. Однако статистический анализ результатов исследования метаболической активности клеток DPSC, проведенный с использованием непараметрического U критерия Манна – Уитни, не показал значимых различий с контролем при воздействии на клетки вытяжек из всех материалов. Таким образом, можно сделать вывод об отсутствии цитотоксичности у всех исследуемых материалов и отсутствии водорастворимых компонентов, негативно воздействующих на жизнеспособность МСК человека.

Исследования жизнеспособности, адгезионной и пролиферативной активности МСК показали, что на всех сроках наблюдения для CF-C и CF-C-HAP выявлены адгезированные клетки, динамика плотности расположения которых увеличивалась в течение сроков наблюдения. На 14 день после инкубации наблюдается плотное расположение клеток, как на поверхности, так и внутри трехмерных скаффолдов (рис. 6).

СЭМ-анализ прикрепления и морфологии клеток показал, что клетки активно пролиферировали на поверхности скаффолдов, модифицированных пироуглеродом, и гидроксиапатитом. Модификация поверхности углеродных скаффолдов приводит к появлению шероховатости (рис. 2, б, в), что, в свою очередь, является одним из факторов, стимулирующих остеогенез [34].

Клетки образуют плотный монослой, прорастающий через поры внутри трехмерного углеродного скаффолда. По своей морфологии клетки — удлинённые с плоской поверхностью, наблюдаются обширные филоподии (рис. 8, а, б), что свидетельствует о сильной клеточной адгезии и росте.

Определение уровня экспрессии мРНК с использованием метода ПЦР в реальном времени показало (табл. 2), что у клеток, культивированных на CS-C-HAP, через 14 сут. наблюдается экспрессия генов. VDR кодирует рецептор витамина D3, регулирующий активность генов минерального обмена и контролирующий гомеостаз кальция и фосфора [35, 36]. BMP7 является стимулятором дифференцировки остеобластов, который необходим для дифференцировки преостеобластов в зрелые остеобласты [37]. IGFR1 выступает важным регулятором гомеостаза костной ткани, который, вероятно, стимулирует репликацию и дифференцировку остеобластов [38, 39], а также увеличивает экспрессию коллагена I типа в остеобластах и снижает транскрипцию матриксной металлопротеиназы (ММП)-13 [40], которая разрушает коллагеновые волокна и кости [41]. SPP1 — гликопротеин, участвующий в остеогенезе [42–44], усиливает дифференцировку и пролиферацию остеобластов [42, 44, 45], модулирует как формирование костной ткани, так и ее резорбцию за счет прикрепления остеокластов к минерализованному костному матриксу [45]. На основании данных об увеличении экспрессии генов, ассоциированных с остеогенезом, можно сделать вывод, что разрабатываемые материалы обладают остеогенным потенциалом.

Остеогенез — это процесс образования новой кости, включающий кальцификацию предкостного матрикса и дифференциацию остеобластов, предшественников костной ткани, в зрелые остециты. Минерализация матрикса или кальцификация в МСК, подвергающихся остеоиндукции, может быть обнаружена с помощью определения активности ЩФ и окрашивания ализариновым красным. После индукции в течение 14 дней небольшое количество положительных на ЩФ клеток наблюдалось на поверхности CF-C. Клетки, культивированные на поверхности CF-C-HAP (рис. 10, в), демонстрировали более высокую по сравнению с поверхностями покровного стекла и CF-C (рис. 10 а, б) активность ЩФ. Окрашивание культивированных клеток ализариновым красным показало, что в случае контроля (рис. 11, а) отсутствовала спонтанная дифференцировка клеток в остеогенном направлении. Окрашивание культуры МСК в присутствии CF-C дало отрицательный результат, аналогичный контролю, что свидетельствует об отсутствии минерализации и дифференцировки в остеогенном направлении (рис. 11, б). В присутствии CF-C-HAP (рис. 11, в) наблюдаются скопления клеток в виде узелков остеобластов и отложения внеклеточного матрикса, выявленного гистохимически окрашиванием ализариновым красным как кальцификаты, что свидетельствует о его способности индуцировать дифференцировку МСК в остеогенном направлении и продуцировать кальцийсодержащий матрикс.

Результаты наших исследований по изучению активности фосфатазы и окрашивания ализариновым красным показали, что скаффолд CF-C-HAP стимулирует дифференцировку остеобластов *in vitro* в остеогенном направлении, а также процессы внутриклеточной минерализации в остеобластах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Углеродные скаффолды на основе стеклоглеродной пены с поверхностью, модифицированной гидроксиапатитом, обладают высокой пористостью, развитой поверхностью, а также воспроизводят архитектуру трабекулярной костной ткани. Нанесение покрытия на основе пиролизического углерода способствует увеличению прочностных характеристик и снижает гидрофобность углеродного скаффолда. Модификация гидроксиапатитом значительно повышает шероховатость материала, что оказывает положительное влияние на адгезию и прикрепление клеток. Все исследуемые в работе углеродные скаффолды показали отсутствие цитотоксичности.

Установлено, что скаффолды, модифицированные гидроксиапатитом, обладают остеоиндуктивностью, способны индуцировать дифференцировку МСК в остеогенном направлении, продуцировать кальцийсодержащий матрикс и увеличивают экспрессии генов, ассоциированных с остеогенезом.

Разработанный материал является перспективным для использования в тканевой инженерии.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена за счет средств ГК «Росатом».

Этическая экспертиза. Не требуется.

Информированное согласие. Не применимо.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Садовой М.А., Ларионов П.М., Самохин А.Г., Рожнова О.М. Клеточные матрицы (скаффолды) для целей регенерации кости: современное состояние проблемы. *Хирургия позвоночника*. 2014;2:79-86. doi: 10.14531/ss2014.2.79-86.
2. Phadke A, Hwang Y, Kim SH, et al. Effect of scaffold microarchitecture on osteogenic differentiation of human mesenchymal stem cells. *Eur Cell Mater*. 2013;25:114-129. doi: 10.22203/ecm.v025a08.
3. Taylor B, Indano S, Yankannah Y, et al. Decellularized Cortical Bone Scaffold Promotes Organized Neovascularization In Vivo. *Tissue Eng Part A*. 2019;25(13-14):964-977. doi: 10.1089/ten.TEA.2018.0225.
4. Sohn HS, Oh JK. Review of bone graft and bone substitutes with an emphasis on fracture surgeries. *Biomater Res*. 2019;23:9. doi: 10.1186/s40824-019-0157-y.
5. Chiarello E, Cadossi M, Tedesco G, et al. Autograft, allograft and bone substitutes in reconstructive orthopedic surgery. *Aging Clin Exp Res*. 2013;25 Suppl 1:S101-S103. doi: 10.1007/s40520-013-0088-8.
6. Hatzenbuehler J, Pulling TJ. Diagnosis and management of osteomyelitis. *Am Fam Physician*. 2011 Nov 1;84(9):1027-1033.
7. Wang W, Zhang B, Liu R, Zhao Y. Developing fabrication of high strength hydrogels from non-covalent interactions. *Prog Polym Sci*. 2017;71:1-25. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2017.04.001.
8. Zamborsky R, Svec A, Bohac M, et al. Infection in bone allograft transplants. *Exp Clin Transplant*. 2016;14(5):484-490. doi: 10.6002/ect.2016.0076.
9. Oakley MJ, Smith WR, Morgan SJ, et al. Repetitive posterior iliac crest autograft harvest resulting in an unstable pelvic fracture and infected non-union: case report and review of the literature. *Patient Saf Surg*. 2007;1(1):6. doi: 10.1186/1754-9493-1-6.
10. Gao Y, Ma Q. Bacterial infection microenvironment-responsive porous microspheres by microfluidics for promoting anti-infective therapy. *Smart Med*. 2022;1(1):e20220012. doi: 10.1002/SMMD.20220012.
11. Zhu Y, Kong B, Liu R, Zhao Y. Developing biomedical engineering technologies for reproductive medicine. *Smart Med*. 2022;1(1):e20220006. doi: 10.1002/SMMD.20220006.
12. Dixon DT, Gomillion CT. Conductive Scaffolds for Bone Tissue Engineering: Current State and Future Outlook. *J Funct Biomater*. 2021;13(1):1. doi: 10.3390/jfb13010001.
13. Perez JR, Kouroupis D, Li DJ, et al. Tissue Engineering and Cell-Based Therapies for Fractures and Bone Defects. *Front Bioeng Biotechnol*. 2018;6:105. doi: 10.3389/fbioe.2018.00105.
14. Liu H, Xia L, Dai Y, et al. Fabrication and characterization of novel hydroxyapatite/porous carbon composite scaffolds. *Materials Letters*. 2012;66(1):36-38. doi: 10.1016/j.matlet.2011.08.053.
15. Guillén T, Ohrndorf A, Tozzi G, et al. Compressive fatigue behavior of bovine cancellous bone and bone analogous materials under multi-step loading conditions. *Advanced Engineering Materials*. 2012;14(5):B199-B207. doi: 10.1002/adem.201180060.
16. Ramaswamy G, Bidez MW, Misch CE. Bone response to mechanical loads. In: Misch CE. *Dental Implant Prosthetics* (Second Edition). Mosby; 2015:107-125. doi: 10.1016/B978-0-323-07845-0.00006-3.
17. Попов А.Л., Татарникова О.Г., Шекунова Т.О. и др. Исследование воздействия нанокристаллического диоксида церия, допированного гадолинием (Ce1-xGdxO2-y), на функциональное состояние и жизнеспособность клеток линии NCTC clone L929. Вестник Томского государственного университета. *Химия*. 2017;(8):68-87. doi: 10.17223/24135542/8/6.
18. Wutticharoenmongkol P, Pavasant P, Supaphol P. Osteoblastic phenotype expression of MC3T3-E1 cultured on electrospun polycaprolactone fiber mats filled with hydroxyapatite nanoparticles. *Biomacromolecules*. 2007;8(8):2602-2610. doi: 10.1021/bm700451p.
19. Tsukamoto Y, Fukutani S, Mori M. Hydroxyapatite-induced alkaline-phosphatase activity of human pulp fibroblasts. *J Mater Sci: Mater Med*. 1992;3:180-183. doi: 10.1007/bf00713446.
20. Lao L, Wang Y, Zhu Y, et al. Poly(lactide-co-glycolide)/hydroxyapatite nanofibrous scaffolds fabricated by electrospinning for bone tissue engineering. *J Mater Sci Mater Med*. 2011;22(8):1873-1884. doi: 10.1007/s10856-011-4374-8.
21. Chung S, King MW. Design concepts and strategies for tissue engineering scaffolds. *Biotechnol Appl Biochem*. 2011;58(6):423-438. doi: 10.1002/bab.60.
22. Saberi A, Koughjani M, Mohammadi M, Hosta-Rigau L. Novel scaffold platforms for simultaneous induction osteogenesis and angiogenesis in bone tissue engineering: a cutting-edge approach. *J Nanobiotechnology*. 2023;21(1):351. doi: 10.1186/s12951-023-02115-7.
23. He X, Zhao Q, Zhang N, et al. Impact of a staggered scaffold structure on the mechanical properties and cell response in bone tissue engineering. *J Appl Biomater Funct Mater*. 2023;21:22808000231181326. doi: 10.1177/22808000231181326.
24. Abbasi N, Hamlet S, Love RM, Nguyen NT. Porous Scaffolds for Bone Regeneration. *J Sci: Adv Mater Dev*. 2020;5(1):1-9. doi: 10.1016/j.jsamd.2020.01.007.
25. Aghali A. Craniofacial Bone Tissue Engineering: Current Approaches and Potential Therapy. *Cells*. 2021;10(11):2993. doi: 10.3390/cells10112993.

26. Persson M, Lehenkari PP, Berglin L, et al. Osteogenic differentiation of human mesenchymal stem cells in a 3D woven scaffold. *Sci Rep*. 2018;8(1):10457. doi: 10.1038/s41598-018-28699-x.
27. Rahman SF, Ghaffary MM, Tampubuluon JY, et al. Effect of graphite, graphene oxide, and multi-walled carbon nanotubes on the physicochemical characteristics and biocompatibility of chitosan/hyaluronic acid/hydroxyapatite scaffolds for tissue engineering applications. *J Sci: Adv Mater Dev*. 2024;9(2):100719. doi: 10.1016/j.jsamd.2024.100719.
28. Bagal R, Bahir M, Lenka N, Patro TU. Polymer derived porous carbon foam and its application in bone tissue engineering: a review. *Int J Polymer Mater Polymer Biomat*. 2022;72(12):909-924. doi: 10.1080/00914037.2022.2066669.
29. Islam M, Sadaf A, Gomez MR, et al. Carbon fiber/microlattice 3D hybrid architecture as multi-scale scaffold for tissue engineering. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*. 2021;126:112140. doi: 10.1016/j.msec.2021.112140.
30. Dong J, Ding H, Wang Q, Wang L. A 3D-Printed Scaffold for Repairing Bone Defects. *Polymers (Basel)*. 2024;16(5):706. doi: 10.3390/polym16050706.
31. Lee DJ, Kwon J, Kim YI, et al. Effect of pore size in bone regeneration using polydopamine-laced hydroxyapatite collagen calcium silicate scaffolds fabricated by 3D mould printing technology. *Orthod Craniofac Res*. 2019;22 Suppl 1(Suppl 1):127-133. doi: 10.1111/ocr.12261.
32. Koushik TM, Miller CM, Antunes E. Bone tissue engineering scaffolds: function of multi-material hierarchically structured scaffolds. *Adv Healthc Mater*. 2023;12(9):e2202766. doi: 10.1002/adhm.202202766.
33. Cao J, Lian R, Jiang X, Rogachev AV. In vitro degradation assessment of calcium fluoride-doped hydroxyapatite coating prepared by pulsed laser deposition. *Surface and Coatings Technology*. 2021;416:127177. doi: 10.1016/j.surfcoat.2021.127177.
34. Zhang Y, Chen SE, Shao J, van den Beucken JJJP. Combinatorial Surface Roughness Effects on Osteoclastogenesis and Osteogenesis. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2018;10(43):36652-36663. doi: 10.1021/acsami.8b10992.
35. Meyer MB, Goetsch PD, Pike JW. Genome-wide analysis of the VDR/RXR cistrome in osteoblast cells provides new mechanistic insight into the actions of the vitamin D hormone. *J Steroid Biochem Mol Biol*. 2010;121(1-2):136-141. doi: 10.1016/j.jsbmb.2010.02.011.
36. Li Y, Zhao P, Jiang B, et al. Modulation of the vitamin D/vitamin D receptor system in osteoporosis pathogenesis: insights and therapeutic approaches. *J Orthop Surg Res*. 2023; 18(1):860. doi: 10.1186/s13018-023-04320-4.
37. Ott SM, Elder G. Osteoporosis associated with chronic kidney disease. In: Marcus R, Feldman D, Dempster DW, et al. (eds). *Osteoporosis*. 4th ed. Elsevier Pub.; 2013:1387-1424. doi: 10.1016/B978-0-12-415853-5.00058-3.
38. Yakar S, Rosen CJ. From mouse to man: redefining the role of insulin-like growth factor-I in the acquisition of bone mass. *Exp Biol Med* (Maywood). 2003;228(3):245-252. doi: 10.1177/153537020322800302.
39. Fang J, Zhang X, Chen X, et al. The role of insulin-like growth factor-1 in bone remodeling: A review. *Int J Biol Macromol*. 2023;238:124125. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.124125.
40. Canalis E, Rydziel S, Delany AM, et al. Insulin-like growth factors inhibit interstitial collagenase synthesis in bone cell cultures. *Endocrinology*. 1995;136:1348-1354. doi: 10.1210/endo.136.4.7895645.
41. Brennan-Speranza TC, Rizzoli R, Kream BE, et al. Selective osteoblast overexpression of IGF-I in mice prevents low protein-induced deterioration of bone strength and material level properties. *Bone*. 2011;49(5):1073-1079. doi: 10.1016/j.bone.2011.07.039.
42. Denhardt DT, Noda M. Osteopontin expression and function: Role in bone remodeling. *J Cell Biochem*. 1998;72 Suppl 30-31(S30-31): 92-102. doi: 10.1002/(SICI)1097-4644(1998)72:30/31<92::AID-JCB13>3.0.CO;2-A.
43. Choi ST, Kim JH, Kang EJ, et al. Osteopontin might be involved in bone remodelling rather than in inflammation in ankylosing spondylitis. *Rheumatology (Oxford)*. 2008;47(12):1775-1779. doi: 10.1093/rheumatology/ken385.
44. Martín-Márquez BT, Sandoval-García F, Corona-Meraz FI, et al. Osteopontin: A Bone-Derived Protein Involved in Rheumatoid Arthritis and Osteoarthritis Immunopathology. *Biomolecules*. 2023;13(3):502. doi: 10.3390/biom13030502.
45. Singh A, Gill G, Kaur H, et al. Role of osteopontin in bone remodeling and orthodontic tooth movement: a review. *Prog Orthod*. 2018;19(1):18. doi: 10.1186/s40510-018-0216-2.

Статья поступила 18.07.2024; одобрена после рецензирования 26.09.2024; принята к публикации 10.12.2024.

The article was submitted 18.07.2024; approved after reviewing 26.09.2024; accepted for publication 10.12.2024.

Информация об авторах:

Елена Игоревна Тимошук — кандидат технических наук, начальник управления конструкционных материалов, EITimoschuk@rosatom.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4162-1196>;

Дарья Владимировна Пономарева — заместитель начальника управления — начальник отдела конструкционных графитов, DVPonomareva@rosatom.ru, <https://orcid.org/0009-0009-4886-1436>;

Артур Радикович Гареев — кандидат технических наук, заместитель директора по науке и инновациям, ARGareev@rosatom.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5934-8456>.

Information about the authors:

Elena I. Timoshchuk — PhD in Engineering, Head of Structural Materials Department, EITimoschuk@rosatom.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4162-1196>;

Darya V. Ponomareva — Deputy Head of Department — Head of Structural Graphite Department, DVPonomareva@rosatom.ru, <https://orcid.org/0009-0009-4886-1436>;

Artur R. Gareev — PhD in Engineering, Deputy Director for Science and Innovation, ARGareev@rosatom.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5934-8456>.

Вклад авторов:

Тимошук Е.И. — концептуализация, исследование, написание — первоначальный вариант, написание — рецензирование и редактирование, контроль.

Пономарева Д.В. — исследование, написание — рецензирование и редактирование, визуализация.

Гареев А.Р. — написание, рецензирование и редактирование.

Научная статья

УДК 616.718.46:611.018.3:616-092.9

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-1-42-50>



Гистоморфометрические характеристики метаэпифизарной пластинки дистального отдела бедренной кости ягнят в период интенсивного роста

Т.А. Ступина✉, О.В. Дюрягина, А.А. Коробейников

Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова, Курган, Россия

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Анатольевна Ступина, stupinasta@mail.ru

Аннотация

Введение. Травмы зоны роста встречаются довольно часто и составляют 15–30 % всех повреждений костей скелета у детей. Осложнения возникают у 2–14 % пациентов. Для разработки новых методик лечения пациентов с повреждениями зоны роста необходима адекватная экспериментальная модель на животных.

Цель работы — выявить закономерности изменения гистоморфометрических характеристик метаэпифизарного хряща дистального отдела бедренной кости ягнят в период интенсивного роста.

Материалы и методы. Исследован метаэпифизарный хрящ дистального отдела бедренной кости 12 ягнят (возраст — 3,5 и 5,5 мес., 5 самцов и 7 самок), участвующих ранее в эксперименте о влиянии спиц для остеосинтеза на структурную реорганизацию метаэпифизарного хряща. Проведены гистологические, иммуногистохимические, гистоморфометрические исследования.

Результаты. Определено зональное строение метаэпифизарной пластинки, увеличение доли ШИК-позитивных структур в наружном слое пограничной зоны и в зоне обызвествленного хряща. При окраске по Массону в метаэпифизарном хряще животных возраста 5,5 мес. зарегистрированы фуксинофильные участки матрикса пограничной зоны, а также увеличение доли фуксинофильных участков зоны обызвествленного хряща по сравнению с животными возраста 3,5 мес., что свидетельствовало об усилении минерализации. Экспрессия CD34 в 3,5 мес. выявлена в наружном слое пограничной зоны, в 5,5 мес. глубина сосудистой инвазии увеличивалась, но не достигала зоны пролиферирующего хряща. Снижение толщины метаэпифизарного хряща в 5,5 мес. в среднем на 18,2 % обусловлено снижением толщины пограничной зоны в 1,9 раз, при этом толщина зоны пролиферирующего хряща увеличена в 1,2 раза.

Обсуждение. Наблюдаемые изменения основного вещества метаэпифизарного хряща указывали, что у ягнят к возрасту 5,5 мес. более интенсивно протекают процессы кальцификации матрикса. Глубина проникновения сосудов со стороны диафиза более выражена, чем со стороны эпифиза. Переломы в области зоны роста в период интенсивного роста могут быть обусловлены преобладанием доли пограничной зоны и зоны пролиферирующего хряща.

Заключение. Гистоморфометрические изменения метаэпифизарной пластинки дистального отдела бедренной кости ягнят в период интенсивного роста характеризовались снижением ее толщины за счет выраженного уменьшения размеров резервной зоны, при этом толщина пролиферирующего хряща статистически значимо увеличивалась. Глубина сосудистой инвазии в пограничной зоне увеличивалась, но не достигала зоны пролиферирующего хряща, изменения тинкториальных характеристик основного вещества свидетельствовали об активации процессов кальцификации матрикса со стороны субхондральной кости эпифиза и энхондрального окостенения со стороны диафиза.

Ключевые слова: ягнята, метаэпифизарный хрящ, гистология, иммуногистохимия, гистоморфометрия

Для цитирования: Ступина Т.А., Дюрягина О.В., Коробейников А.А. Гистоморфометрические характеристики метаэпифизарной пластинки дистального отдела бедренной кости ягнят в период интенсивного роста. *Гений ортопедии*. 2025;31(1):42–50. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-42-50.

Original article

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-1-42-50>

Histomorphometric characteristics of the metaepiphyseal plate of the distal femur of lambs during the period of their intensive growth

T.A. Stupina[✉], O.V. Dyuryagina, A.A. Korobeynikov

Ilizarov National Medical Research Centre for Traumatology and Orthopedics, Kurgan, Russian Federation

Corresponding author: Tatyana A. Stupina, stupinasta@mail.ru

Abstract

Introduction Growth zone injuries are quite common and account for 15–30 % of all skeletal bone injuries in children. Complications occur in 2–14 % of patients. An adequate experimental animal model is needed to develop new methods for treating growth zone injuries.

The purpose of the work is to identify patterns in the dynamics of histomorphometric characteristics of the metaepiphyseal cartilage of the distal femur of lambs during the period of their intensive growth.

Materials and methods The metaepiphyseal cartilage of the distal femur of 12 lambs (aged 3.5 and 5.5 months, 5 males and 7 females) previously participating in an experiment on the effect of osteosynthesis pins on the structural reorganization of the metaepiphyseal cartilage was studied. Histological, immunohistochemical, and histomorphometric studies were performed.

Results The zonal structure of the metaepiphyseal plate along with an increased proportion of PAS-positive structures in the outer layer of the border zone and in the calcified cartilage zone were determined. Masson staining revealed fuchsinophilic areas of the border zone matrix in the metaepiphyseal cartilage of animals aged 5.5 months, as well as an increase in the proportion of fuchsinophilic areas of the calcified cartilage zone compared to animals aged 3.5 months, which indicated increased mineralization. CD34 expression at 3.5 months was detected in the outer layer of the border zone, at 5.5 months the depth of vascular invasion increased, but did not reach the proliferating cartilage zone. A decrease in the thickness of the metaepiphyseal cartilage at the age of 5.5 months by an average of 18.2 % is due to a decrease in the thickness of the border zone by 1.9 times, while the thickness of the proliferating cartilage zone increased by 1.2 times.

Discussion The changes observed in the main substance of the metaepiphyseal cartilage indicated that the processes of matrix calcification are more intense in lambs by the age of 5.5 months. The depth of vascular penetration from the diaphysis is more pronounced than from the epiphysis. Fractures in the growth zone during the period of intensive growth can be caused by the predominance of the border zone and by the proliferating cartilage zone.

Conclusion Histomorphometric changes in the metaepiphyseal plate of the distal femur of lambs during the period of their intensive growth were characterized by a decrease in its thickness due to a marked decrease in the thickness of the reserve zone, while the thickness of the proliferating cartilage statistically significantly increased. The depth of vascular invasion in the border zone increased, but did not reach the proliferating cartilage zone, changes in the tinctorial characteristics of the ground substance indicated the activation of matrix calcification processes from the subchondral bone of the epiphysis and endomorphic ossification from the diaphysis.

Keywords: lambs, metaepiphyseal cartilage, histology, immunohistochemistry, histomorphometry

For citation: Stupina TA, Dyuryagina OV, Korobeynikov AA. Histomorphometric characteristics of the metaepiphyseal plate of the distal femur of lambs during the period of their intensive growth. *Genij Ortopedii*. 2025;31(1):42-50. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-42-50.

ВВЕДЕНИЕ

Зона роста (физис, метаэпифизарная пластинка, метаэпифизарный хрящ) представлена гиалиновым хрящом, располагающимся между эпифизом и метафизом трубчатых костей, и отвечает за продольный рост костей [1]. По данным статистики, травмы зоны роста встречаются довольно часто и составляют 15–30 % всех повреждений костей скелета у детей, осложнения возникают у 2–14 % пациентов [2, 3]. Переломы дистального отдела бедренной кости являются наиболее частым явлением у детей, преобладают переломы Салтера – Харриса II типа [4, 5].

В настоящее время существует острая необходимость разработки эффективных методов лечения детей с травмами зоны роста, которые не только предотвращают образование «костных мостиков», но и создают условия для полноценной регенерации гиалинового хряща и восстановления нормального роста костей [6, 7].

Экспериментальные исследования, направленные на разработку новых методик лечения детей с повреждениями зоны роста и коррекцию патологических состояний, связанных с нарушением ее функции, являются актуальными. Для изучения заживления повреждений метаэпифизарной пластинки необходима адекватная модель на животных. В доклинических исследованиях в качестве экспериментальной модели используют мелких млекопитающих, таких как мыши, крысы, кролики [8, 9, 10, 11, 12, 13]. Модели грызунов не подходят для экстраполяции экспериментальных данных на человека не только потому, что зоны роста грызунов не закрываются при созревании, но и из-за их различий гистологического строения, кровоснабжения, клеточного цикла и времени роста. Также на моделях мелких животных не могут быть смоделированы биомеханические условия скелетной нагрузки человека [14, 15]. По данным ряда авторов, наиболее удачными экспериментальными животными в качестве модели исследования метаэпифизарной пластинки являются собаки и овцы. Овцы более похожи по весу и размерам костей на человека, а длинные кости конечностей подвергаются аналогичной нагрузке. Кроме того, зона роста закрывается по мере взросления, молодые овцы имеют плексиформные костные структуры, аналогичные таковым у детей в периоды быстрого роста [15, 16, 17, 18]. Несмотря на наличие обширной информации о росте и развитии животных, до настоящего времени многие явления этого биологического процесса остаются до конца неизученными. В доступной литературе мы не обнаружили данных о структурных изменениях метаэпифизарной пластинки ягнят в процессе роста. Для определения степени выраженности отличий качественных и количественных характеристик метаэпифизарного хряща от нормы существует необходимость сравнения с аналогичными характеристиками метаэпифизарного хряща интактных животных.

Цель работы — выявить закономерности изменения гистоморфометрических характеристик метаэпифизарного хряща дистального отдела бедренной кости ягнят в период интенсивного роста.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследовали метаэпифизарную пластинку дистального отдела бедренной кости контралатеральной конечности 12 ягнят (5 самцов, 7 самок), участвовавших ранее в эксперименте о влиянии спиц для остеосинтеза на структурную реорганизацию метаэпифизарного хряща [19], в возрасте 3,5 и 5,5 мес. (масса тела — $(21,92 \pm 0,85)$ и $(28,92 \pm 2,4)$ кг соответственно). В этот период происходит бурный рост длинных трубчатых костей ягнят, с 7 мес. интенсивность роста снижается, идет накопление мышечной массы [20].

Эвтаназию животных осуществляли после премедикации раствором димедрола 1 % (0,02 мг/кг) и рометара 2 % (1 мг/кг), введением летальной дозы барбитуратов. Содержание животных в эксперименте проводили согласно нормативным документам: ГОСТ Р 33044-2014; ПС СанПиН 3.3686-21; ГОСТ 33215-2014; ГОСТ 34088-2017.

Для микроскопического исследования выпиливали фрагменты дистального суставного конца бедренной кости, затем образцы фиксировали в 10 % растворе нейтрального формалина 48 час. Декальцинацию проводили в смеси растворов соляной и муравьиной кислот (1:1), промывали в воде, обезживляли в спиртах, по стандартной методике заливали в парафин.

Для получения достоверной информации о качественных и количественных характеристиках метаэпифизарного хряща учитывали его зональное строение, использовали парафиновые срезы адекватной ориентации и толщины [21, 22]. На микротоме HM450 (ThermoScientific, США) изготавливали продольные серийные срезы вдоль оси бедренной кости (5,00 мкм), которые окрашивали альциановым синим pH 2,5 и ШИК (PAS-Реакция), трехцветным методом по Массону.

Для постановки иммуногистохимической реакции применяли маркер ангиогенеза CD34 (CD34 [EP373Y]) (Abcam, Великобритания) и пероксидазную систему детекции с диаминобензидином с микрополимером ab236469 (Rabbit specific HRP/DAB Detection IHC Detection Kit-Micropolymer, Abcam, Великобритания). Все этапы иммуногистохимической реакции выполняли согласно протоколу фирмы-производителя антител. Срезы докрашивали гематоксилином.

Гистоморфометрическое исследование и оцифровку осуществляли на микроскопе AxioScope.A1 с цифровой камерой AxioCam (Carl Zeiss MicroImaging GmbH, Германия), используя программу анализа изображений Zenblue (Carl Zeiss MicroImaging GmbH, Германия).

Толщину метаэпифизарного хряща (h , мм) измеряли как расстояние между его верхней и нижней границами с интервалом около 20 мкм, для каждого случая проведено 20 измерений. Определяли толщину зон метаэпифизарного хряща (h , мкм) и их процентное соотношение. Границей между пограничной зоной и зоной пролиферирующего хряща считали точку появления первого уплощенного хондроцита в столбике, границей между зоной пролиферирующего хряща и зоной пузырьчатого хряща — точку появления первого округлого хондроцита, границей между зоной пузырьчатого хряща и зоной обызвествленного хряща — точку появления участков резорбируемого матрикса [23]. Процентную долю каждой зоны определяли как долю от общей толщины метаэпифизарного хряща, принятую за 100 %.

Количественные данные анализировали методами описательной статистики. Характер распределения данных оценивали с помощью критерия Колмогорова, меру центральной тенденции представляли в виде медианы и квартилей (Me (p25–p75)). Гипотезы о различиях сравниваемых групп проверяли с помощью критерия Манна – Уитни, значимыми считали различия при $p < 0,05$ (программа AtteStat, версия 9.3.1).

РЕЗУЛЬТАТЫ

На гистотопограммах метаэпифизарная пластинка дистального отдела бедренной кости ягнят визуализирована слегка извилистой линией. При светооптическом исследовании парафиновых срезов метаэпифизарный хрящ имел зональное строение. Четко выделены четыре зоны: пограничная, или резервная зона, граничащая с эпифизарной костью; зона пролиферирующего или столбчатого хряща; зона пузырьчатого (гибнущего) хряща; зона обызвествленного (кальцифицирующего) хряща (рис. 1).

В пограничной зоне хондроциты располагались одиночно, редко в виде двухчленных изогенных групп. Во всех остальных зонах прослеживалось столбчатое расположение хрящевых клеток, в пролиферативной зоне хондроциты — уплощенной формы, в зоне пузырьчатого хряща увеличены в размерах, округлой формы, в зоне обызвествленного хряща основная часть клеток — с признаками деструкции (рис. 1).

По тинкториальным характеристикам основного вещества пограничной зоны выделены два слоя: наружный и внутренний. Наружный слой при окраске альциановым синим: ШИК близок к кости, ШИК-позитивен (ШИК-реакция в возрасте 5,5 мес. более интенсивна, чем в возрасте 3,5 мес.), а внутренний слой окрашен альциановым синим pH 2,5 в голубой цвет (рис. 1).

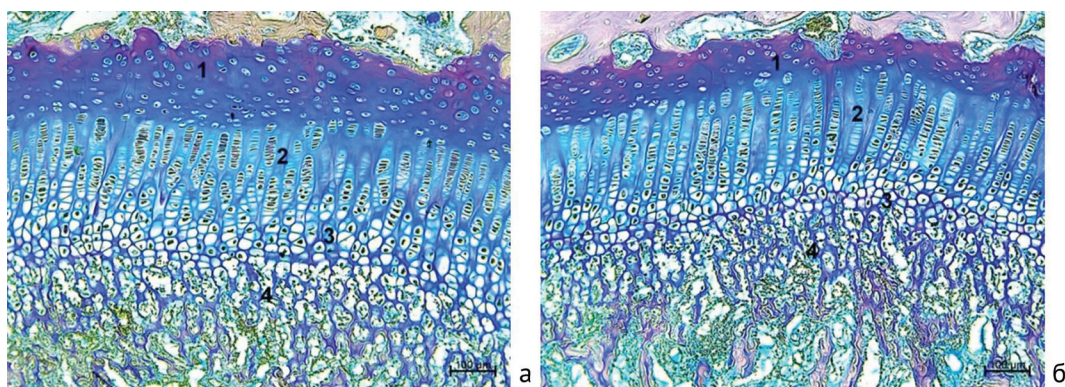


Рис. 1. Метаэпифизарный хрящ дистального отдела бедренной кости ягненка: а — возраст 3,5 мес.; б — возраст 5,5 мес. Пограничная (резервная) зона (1), зона пролиферирующего хряща (2); зона пузырьчатого хряща (3); зона обызвествленного хряща (4). Парафиновый срез, окраска альциановый синий pH 2,5 и ШИК-реакция (PAS). Увеличение $\times 100$

При окраске трехцветным методом по Массону межклеточное вещество пограничной зоны у животных в возрасте 3,5 мес. окрашено в синий цвет, а в возрасте 5,5 мес. отмечены обширные участки межклеточного вещества, окрашенные в красный цвет, что указывало на кальцификацию матрикса (рис. 2, а, в).

Межклеточное вещество зон пролиферирующего и пузырьчатого (зрелого) хрящей альциановым синим: ШИК — окрашено в интенсивно голубой цвет, что свидетельствовало о высоком содержании сульфатированных гликозаминогликанов. В зоне кальцифицирующего хряща матрикс частично резорбирован, в возрасте 5,5 мес. более ШИК-позитивен (рис. 1, б), а при окраске по Массону преобладал красный цвет (рис. 2, г). Хрящевые островки расположены в направлении продольной оси кости и являлись основой аппозиционного роста кости (рис. 2, б, г).

Кровеносные сосуды, питающие метаэпифизарный хрящ, расположены как со стороны эпифиза, так и со стороны метафиза (рис. 3). У животных возраста 3,5 мес. со стороны эпифизарной субхондральной кости сосуды контактировали с пограничной зоной и внедрялись в нее на небольшую глубину (рис. 2, а). Регистрировали положительное иммуногистохимическое окрашивание на CD34 в эпифизарных сосудах на границе с пограничной зоной (рис. 3, а). В процессе роста глубина проникновения сосудов увеличивалась, в возрасте животных 5,5 мес. наблюдали инвазию сосудов вплоть до границы с зоной пролиферирующего хряща (рис. 2, в; 3, в). Экспрессия CD34 со стороны метафиза была более выражена, чем со стороны эпифиза (рис. 3, б, г).

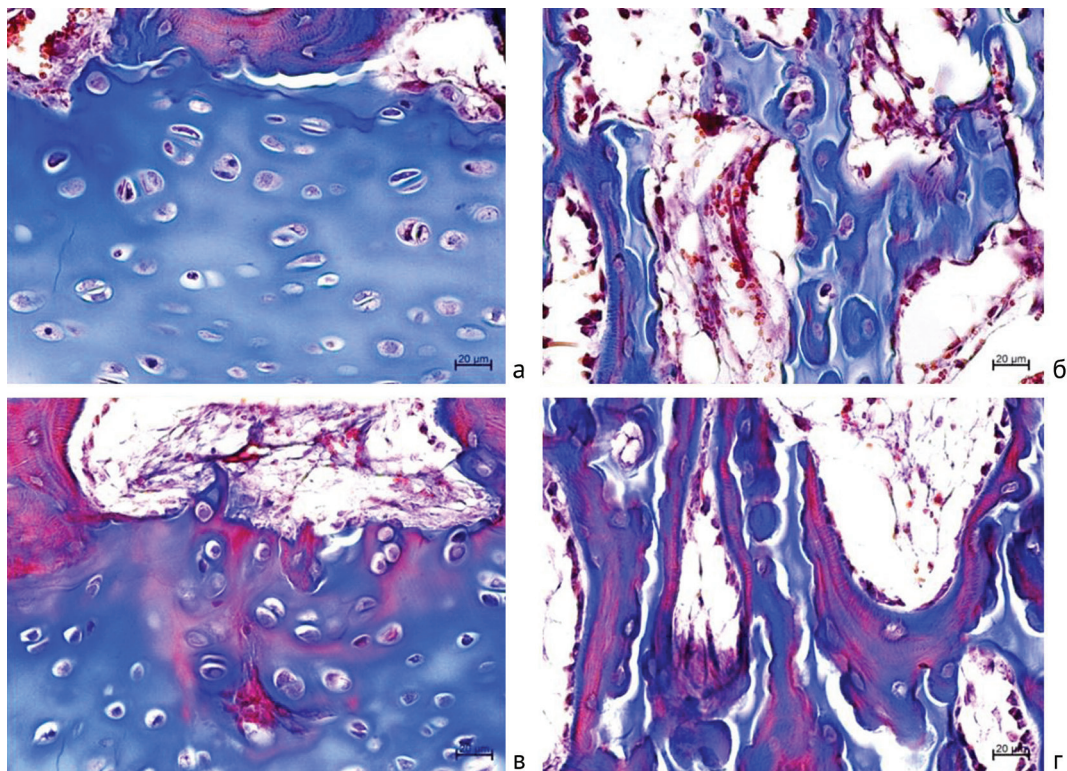


Рис. 2. Метаэпифизарный хрящ дистального отдела бедренной кости ягненка: а, б — возраст 3,5 мес.; в, г — возраст 5,5 мес. Пограничная зона (а, в), глубокое проникновение сосудов, наличие фронта минерализации, формирование костной ткани (в). Зона обызвествленного хряща (б, г). Выраженная минерализация матрикса, остеобласты на поверхности обызвествленного хряща продуцируют костный матрикс (г). Парафиновый срез, окраска трехцветным методом по Массону. Увеличение $\times 400$

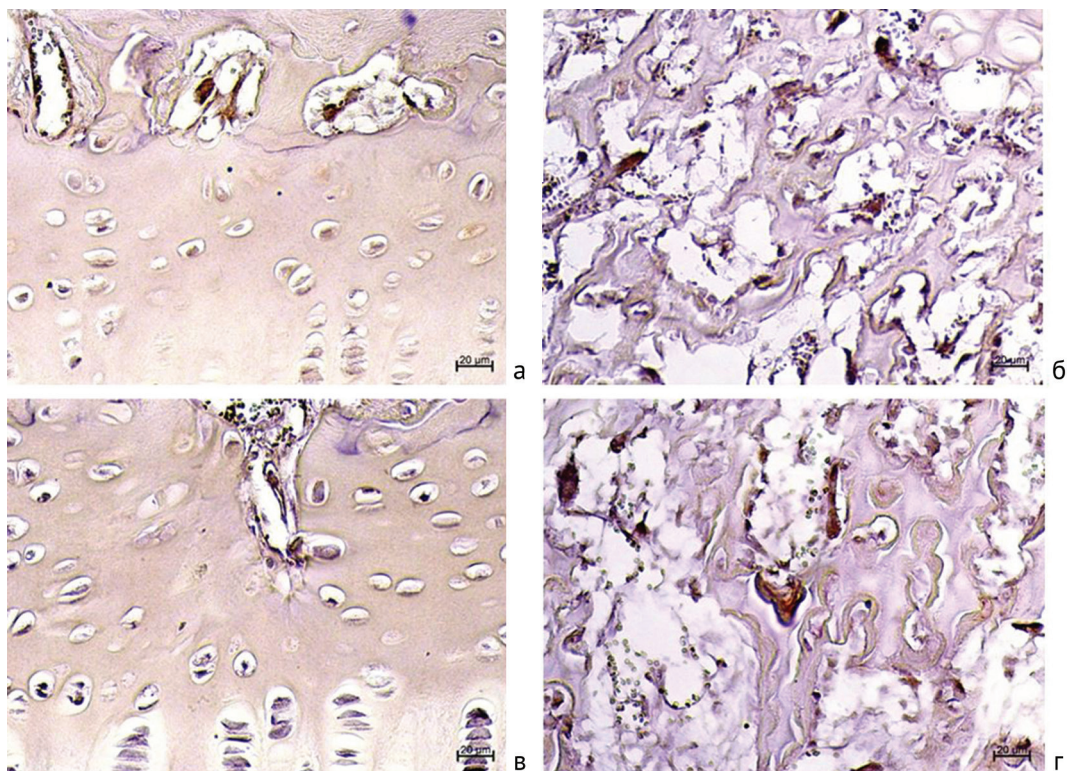


Рис. 3. Фрагменты парафиновых срезов метаэпифизарного хряща дистального отдела бедренной кости ягнят: а, б — возраст 3,5 мес.; в, г — возраст 5,5 мес. Положительное иммуногистохимическое окрашивание на CD34 в эпифизарных сосудах на границе с пограничной зоной (а) и в глубине пограничной зоны (в). Экспрессия CD34 в эндотелии сосудов микроциркуляторного русла со стороны диафиза (б, г). Увеличение $\times 400$

Результаты морфометрических исследований показали, что толщина метаэпифизарного хряща ягнят в период интенсивного роста от 3,5 до 5,5 мес. снижалась в среднем на 18,2 % и составила 0,66 (0,57–0,64) и 0,54 (0,46–0,59) мм соответственно. Снижение толщины метаэпифизарного хряща в возрасте 5,5 мес. обусловлено выраженным снижением толщины пограничной зоны в 1,9 раза, при этом толщина зоны пролиферирующего хряща увеличена в 1,2 раза (рис. 4, табл. 1).

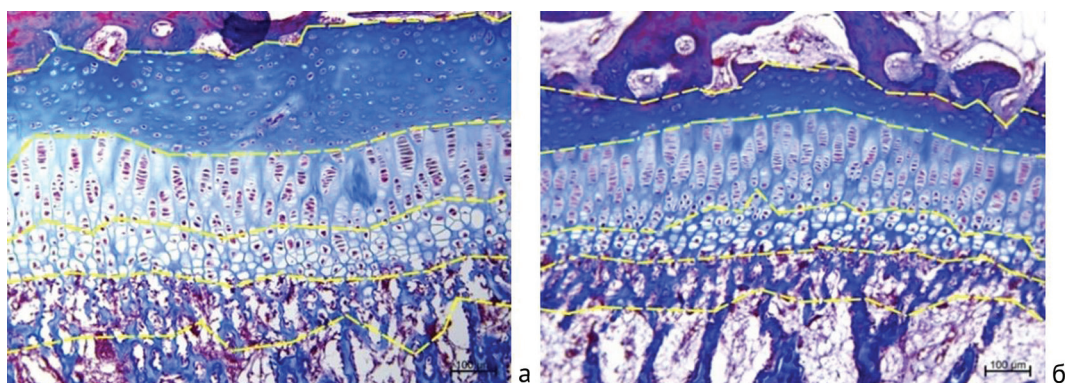


Рис. 4. Метаэпифизарный хрящ дистального отдела бедренной кости ягненка: а — возраст 3,5 мес.; б — возраст 5,5 мес. Границы зон метаэпифизарного хряща обозначены желтой пунктирной линией. Парафиновый срез, окраска трехцветным методом по Массону. Увеличение $\times 100$

Таблица 1

Толщина зон метаэпифизарного хряща дистального отдела бедренной кости ягнят

Зоны метаэпифизарного хряща	Толщина (h , мкм)		p
	возраст 3,5 мес.	возраст 5,5 мес.	
Пограничная	238,45 (214,29–252,18)	124,76 (107,17–132,62)	0,0001
Пролиферирующего хряща	195,47 (185,18–198,64)	235,74 (217,37–249,27)	0,0001
Пузырчатого хряща	125,49 (107,38–134,99)	128,57 (116,35–138,92)	0,4223
Обызвествленного хряща	106,16 (92,44–128,28)	116,31 (93,41–120,84)	0,5222

Примечание: применяли критерий Манна – Уитни, различия статистически значимы при $p < 0,05$.

Процентное соотношение зон метаэпифизарного хряща дистального отдела бедренной кости ягнят представлено на диаграмме (рис. 5). В возрасте 5,5 мес. зарегистрировано выраженное снижение доли резервной зоны и увеличение доли зоны пролиферирующих хондроцитов.

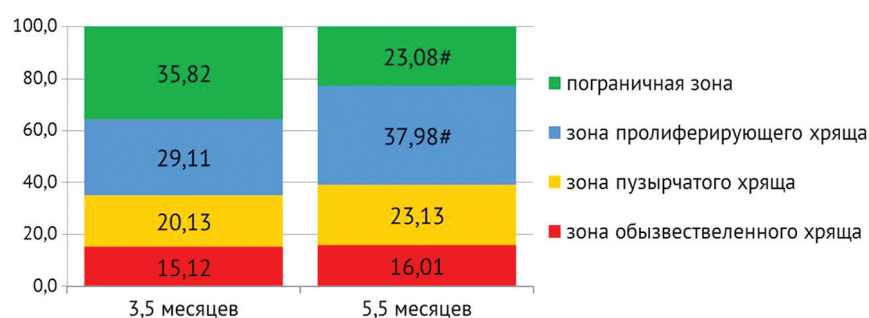


Рис. 5. Диаграмма процентного соотношения зон метаэпифизарного хряща дистального отдела бедренной кости ягнят: # — статистически значимые различия между возрастом 3,5 и 5,5 мес. при $p < 0,05$.

ОБСУЖДЕНИЕ

Зона роста (физис) образуется гиалиновым хрящом, является самой слабой структурой в скелете ребенка и часто становится зоной травмы или перелома. Лечение детей с переломами в области зоны роста представляет собой сложную проблему, поскольку последствия такой травмы могут привести к нарушению роста [24]. В ортопедических исследованиях экспериментальные модели растущих овец немногочисленны [19, 25], данные о половых различиях структурной реорганизации физиса ягнят отсутствуют.

Известно, что темпы роста имеют половую специфичность. По данным ряда авторов, скачек роста у девочек зарегистрирован в 11–12 лет, у мальчиков на 1,5–2 года позднее, полное закрытие зон роста происходит у девочек к 16 годам, у мальчиков к 18 годам [26, 27].

Метаэпифизарный хрящ характеризуется ярко выраженной органной специфичностью, обусловленной его топографией и провизорной функцией [23]. Единодушие исследователей в классификации зон метаэпифизарного хряща отсутствует. На сегодняшний день существует несколько классификаций, в которых выделяют от трех до шести зон, при этом все они основаны на функциональной активности хрящевых клеток и степени их дифференцировки [23, 28, 29].

Результаты данного исследования впервые демонстрируют особенности структурной перестройки метаэпифизарного хряща дистального отдела бедренной кости ягнят в период интенсивного роста. В возрасте животных 3,5 и 5,5 мес. четко определено зональное строение метаэпифизарной пластинки с выделением пограничной или резервной зоны, зоны пролиферирующих хондроцитов, зоны пузырчатого хряща или гипертрофированных хондроцитов и зоны обызвествленного хряща.

Функциональное единство кости и хряща определяет норму развития и функционирования основных звеньев скелета. На современном этапе контакт субхондральной эпифизарной кости и пограничной зоны метаэпифизарного хряща, его формирование и структура, в отличие от интерфейса между суставным хрящом и субхондральной костью, малоизучены [29].

Во всех наблюдениях при окраске альциановым синим-ШИК отмечено усиление ШИК-реакции в межклеточном веществе наружного слоя пограничной зоны. Именно наружный слой по окраске близок к субхондральной эпифизарной кости, увеличение доли ШИК-позитивных структур зарегистрировано и в зоне обызвествленного хряща. Высокое содержание гликозаминогликанов отмечено при окраске альциановым синим-ШИК в пограничной зоне, зоне пролиферирующих и гипертрофированных хондроцитов.

Трехцветный метод по Массону позволяет дифференцировать минерализованные и деминерализованные структуры, минерализованные структуры проявляют сродство к кислому фуксину и окрашиваются в красный цвет [30]. При окраске по Массону в метаэпифизарном хряще животных возраста 5,5 мес. зарегистрированы фуксинофильные участки матрикса пограничной зоны, а также увеличение доли фуксинофильных участков зоны обызвествленного хряща по сравнению с животными возраста 3,5 мес., что свидетельствует об усилении минерализации.

Наблюдаемые изменения тинкториальных характеристик основного вещества метаэпифизарного хряща указывают на то, что у ягнят к возрасту 5,5 мес. более интенсивно протекают процессы кальцификации матрикса со стороны субхондральной кости эпифиза и процессы энхондрального окостенения со стороны диафиза. Известно, что питание метаэпифизарного хряща осуществляется путем диффузии с двух сторон, от сосудов эпифизарной и диафизарной костей, инвазия сосудов со стороны диафиза более выражена [23, 31].

При иммуногистохимическом исследовании парафиновых срезов метаэпифизарного хряща экспрессия CD34 у ягнят в возрасте 3,5 мес. выявлена в наружном слое пограничной зоны, сосуды внедрялись со стороны субхондральной кости эпифиза в пограничную зону на небольшую глубину, в возрасте 5,5 мес. глубина сосудистой инвазии в пограничной зоне увеличивалась, но не достигала зоны пролиферирующего хряща. Глубина проникновения сосудов со стороны диафиза более выражена, чем со стороны эпифиза.

Переломы в области метаэпифизарной пластинки являются преобладающим поражением среди детей младшего возраста (7–11 лет), тогда как у детей старше 12 лет наблюдают разрывы связок, связанные с низкоэнергетической травмой, и повреждение мышц при высокоэнергетической травме [2, 31].

A. Celarek et al. на экспериментальной модели переломов в области зоны роста у овец разного возраста установили, что в возрасте 1,5 мес. перелом проходил параллельно зоне роста, а в возрасте 3,5–7 мес. — в области метаэпифизарной пластины через зону пролиферирующего хряща [25].

По нашим данным, в период интенсивного роста ягнят от 3,5 до 5,5 мес. толщина метаэпифизарного хряща уменьшена в среднем на 18,2 %, за счет выраженного снижения (в 1,9 раза) толщины резервной зоны. В возрасте животных 5,5 мес. зарегистрировано статистически значимое увеличение толщины зоны пролиферирующих хондроцитов (в 1,3 раза) относительно возраста 3,5 мес. У ягнят в возрасте 3,5–5,5 мес. доля пограничной зоны и зоны пролиферирующего хряща составляла более 50 % всей толщины метаэпифизарного хряща. Для этих зон характерно преобладание клеточного компонента и низкая доля межклеточного вещества [23, 32], что может свидетельствовать об их уязвимости, неспособности выдерживать высокие механические нагрузки.

Ограничение данной работы: исследование с большим количеством растущих животных разного возраста позволило бы изучить гендерные закономерности структурной реорганизации метаэпифизарного хряща, расширить статистический анализ, например, выявить различия соотношений зон метаэпифизарного хряща.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гистоморфометрические изменения метаэпифизарной пластинки дистального отдела бедренной кости ягнят в период интенсивного роста характеризовались снижением ее толщины за счет выраженного снижения толщины резервной зоны, при этом зарегистрировано статистически значимое увеличение толщины зоны пролиферирующего хряща. У животных в возрасте 5,5 мес. глубина сосудистой инвазии в пограничной зоне увеличивалась, но не достигала зоны пролиферирующего хряща, изменения тинкториальных характеристик основного вещества свидетельствовали об активации процессов кальцификации матрикса со стороны субхондральной кости эпифиза и процессов энхондрального окостенения со стороны диафиза. Полученные новые данные о динамике гистоморфометрических характеристик метаэпифизарного хряща дистального отдела бедренной кости ягнят в период интенсивного роста являются основой для экспериментальных исследований патологических состояний зоны роста и способов их коррекции.

Конфликт интересов. Не заявлен.

Финансирование исследования. Работа поддержана программой МЗ РФ в рамках государственного задания ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова» для выполнения НИР на 2024–2026 гг.

Авторы несут полную ответственность за представление окончательной версии рукописи в печать.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Shaw N, Erickson C, Bryant SJ, et al. Regenerative Medicine Approaches for the Treatment of Pediatric Physeal Injuries. *Tissue Eng Part B Rev.* 2018;24(2):85–97. doi: 10.1089/ten.TEB.2017.0274.
- Sananta P, Lesmana A, Alwy Sugiarto M. Growth plate injury in children: Review of literature on PubMed. *J Public Health Res.* 2022;11(3):22799036221104155. doi: 10.1177/22799036221104155.
- Meyers AL, Taqi M, Marquart MJ. Pediatric Physeal Injuries Overview. 2024. In: *StatPearls* [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024.
- Elsoe R, Ceccotti AA, Larsen P. Population-based epidemiology and incidence of distal femur fractures. *Int Orthop.* 2018;42(1):191–196. doi: 10.1007/s00264-017-3665-1.
- Wang X, Li Z, Wang C, Bai H, et al. Enlightenment of Growth Plate Regeneration Based on Cartilage Repair Theory: A Review. *Front Bioeng Biotechnol.* 2021;9:654087. doi: 10.3389/fbioe.2021.654087.
- Коробейников А.А., Аранович А.М., Попков Д.А. Метод Илизарова при лечении детей с околосуставными переломами. *Гений ортопедии.* 2021;27(4):418–423. doi: 10.18019/1028-4427-2021-27-4-418-423.
- Бровин Д.А., Трофимова Т.Н., Кенис В.М., Брайлов С.А. Диффузионно-тензорная магнитно-резонансная томография зоны роста кости: обоснование методики и оценка ее воспроизводимости. *Лучевая диагностика и терапия.* 2022;13(3):67–76. doi: 10.22328/2079-5343-2022-13-3-67-76.
- Макарова М.Н., Матичин А.А., Матичина А.А., Макаров В.Г. Принципы выбора животных для научных исследований. Сообщение 1. Выбор модельных организмов на основании филогенетических связей. *Лабораторные животные для научных исследований.* 2022;5(2):58–70. doi: 10.29296/2618723X-2022-02-07.
- Drenkard LMM, Kupratis ME, Li K, Gerstenfeld LC, Morgan EF. Local Changes to the Distal Femoral Growth Plate Following Injury in Mice. *J Biomech Eng.* 2017;139(7). doi: 10.1115/1.4036686.
- Erickson CB, Shaw N, Hadley-Miller N, et al. A Rat Tibial Growth Plate Injury Model to Characterize Repair Mechanisms and Evaluate Growth Plate Regeneration Strategies. *J Vis Exp.* 2017;(125):55571. doi: 10.3791/55571.
- Li W, Xu R, Huang J, et al. Treatment of rabbit growth plate injuries with oriented ECM scaffold and autologous BMSCs. *Sci Rep.* 2017;7:44140. doi: 10.1038/srep44140.
- Fernández-Iglesias Á, Fuente R, Gil-Peña H, et al. The Formation of the Epiphyseal Bone Plate Occurs via Combined Endochondral and Intramembranous-Like Ossification. *Int J Mol Sci.* 2021;22(2):900. doi: 10.3390/ijms22020900.
- van Loon JJWA, Berezovska OP, Bervoets TJM, et al. Growth and mineralization of fetal mouse long bones under microgravity and daily 1 g gravity exposure. *NPJ Microgravity.* 2024;10(1):80. doi: 10.1038/s41526-024-00421-4.
- Kember NF, Sissons HA. Quantitative histology of the human growth plate. *J Bone Joint Surg Br.* 1976;58-B(4):426–435. doi: 10.1302/0301-620X.58B4.1018028.
- Pearce AI, Richards RG, Milz S, et al. Animal models for implant biomaterial research in bone: a review. *Eur Cell Mater.* 2007;13:1–10. doi: 10.22203/ecm.v013a01.
- Turner AS. Experiences with sheep as an animal model for shoulder surgery: strengths and shortcomings. *J Shoulder Elbow Surg.* 2007;16(5 Suppl):S158–163. doi: 10.1016/j.jse.2007.03.002.
- Sartoretto SC, Uzeda MJ, Miguel FB, et al. Sheep as an experimental model for biomaterial implant evaluation. *Acta Ortop Bras.* 2016;24(5):262–266. doi: 10.1590/1413-785220162405161949.
- Banstola A, Reynolds JN. The Sheep as a Large Animal Model for the Investigation and Treatment of Human Disorders. *Biology (Basel).* 2022 Aug 23;11(9):1251. doi: 10.3390/biology11091251.
- Коробейников А.А., Ступина Т.А., Дюрягина О.В. и др. Оценка влияния спиц для остеосинтеза на структурную реорганизацию метаэпифизарного хряща (экспериментально-морфологическое исследование). *Гений ортопедии.* 2024;30(4):561–571. doi: 10.18019/1028-4427-2024-30-4-561-571.
- Хайитов А.Х., Джураева У.Ш. Морфофизиологические закономерности роста костной и мышечной тканей у овец. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета.* 2017;(48):72–80.
- Шудло М.М., Варсегова Т.Н., Ступина Т.А. и др. Проблема эффекта Холмса в количественной телепатологии (методические аспекты). *Известия Челябинского научного центра УрО РАН.* 2003;(1):120–124.
- Ступина Т.А., Шудло М.М. Способ количественной оценки состояния суставного хряща на разных уровнях структурной организации. *Гений ортопедии.* 2009;(1):55–57.
- Заварухин В.И., Моренко Е.С., Свиридов М.К., Говоров А.В. Эмбриональное развитие и строение зоны роста. *Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста.* 2015;3(2):61–65. doi: 10.17816/PTORS3261-65.
- Singh V, Garg V, Parikh SN. Management of Physeal Fractures: A Review Article. *Indian J Orthop.* 2021;55(3):525–538. doi: 10.1007/s43465-020-00338-6.

25. Celarek A, Fischerauer SF, Weinberg AM, Tschegg EK. Fracture patterns of the growth plate and surrounding bone in the ovine knee joint at different ages. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2014;29:286-294. doi: 10.1016/j.jmbbm.2013.09.010.
26. Алексина Л.А. Возрастные особенности и динамика окостенения проксимальных отделов плечевых костей. *Журнал анатомии и гистопатологии*. 2015;4(1):38-44.
27. Cuestas ME, Cieri ME, Ruiz Brünner MLM, Cuestas E. Height growth study of healthy children and adolescents from Córdoba, Argentina. *Rev Chil Pediatr*. 2020;91(5):741-748. (In English, Spanish.) doi: 10.32641/rchped.vi91i5.2066.
28. Villemure I, Stokes IA. Growth plate mechanics and mechanobiology. A survey of present understanding. *J Biomech*. 2009;42(12):1793-1803. doi: 10.1016/j.jbiomech.2009.05.021.
29. Kazemi M, Williams JL. Properties of Cartilage-Subchondral Bone Junctions: A Narrative Review with Specific Focus on the Growth Plate. *Cartilage*. 2021;13(2_suppl):16S-33S. doi: 10.1177/1947603520924776.
30. Zhang C, Yan B, Cui Z, et al. Bone regeneration in minipigs by intrafibrillarly-mineralized collagen loaded with autologous periodontal ligament stem cells. *Sci Rep*. 2017;7(1):10519. doi: 10.1038/s41598-017-11155-7.
31. Skak SV, Jensen TT, Poulsen TD, Stürup J. Epidemiology of knee injuries in children. *Acta Orthop Scand*. 1987;58(1):78-81. doi: 10.3109/17453678709146348.
32. Nilsson O, Baron J. Fundamental limits on longitudinal bone growth: growth plate senescence and epiphyseal fusion. *Trends Endocrinol Metab*. 2004;15(8):370-374. doi: 10.1016/j.tem.2004.08.004.

Статья поступила 23.10.2024; одобрена после рецензирования 03.12.2024; принята к публикации 10.12.2024.

The article was submitted 23.10.2024; approved after reviewing 03.12.2024; accepted for publication 10.12.2024.

Информация об авторах:

Татьяна Анатольевна Ступина — доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, StupinaSTA@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3434-0372>;

Ольга Владимировна Дюрягина — кандидат ветеринарных наук, заведующая лабораторией, diuriagina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9974-2204>;

Анатолий Анатольевич Коробейников — кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, koroban@list.ru, <https://orcid.org/0009-0005-0326-8285>.

Information about the authors:

Tatyana A. Stupina — Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher, StupinaSTA@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3434-0372>;

Olga V. Diuriagina — Candidate of Veterinary Sciences, Head of Laboratory, diuriagina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9974-2204>;

Anatoly A. Korobeinikov — Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher, koroban@list.ru, <https://orcid.org/0009-0005-0326-8285>.

Вклад авторов:

Все авторы принимали участие в разработке концепции статьи и в написании рукописи. Окончательная версия рукописи одобрена всеми авторами.

Научная статья

УДК 616.71-007.235-001.5-089.227.84-053.2

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-1-51-59>

Результаты реконструктивной хирургии конечностей с использованием телескопического титанового стержня

А.М. Абдуллоев✉, Н.С. Гвоздев, Д.В. Тропин, Д.А. Попков

Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова, Курган, Россия

Автор, ответственный за переписку: Авазбек Муроталиевич Абдуллоев, asadiabdulloev@gmail.com

Аннотация

Введение. Реконструкция конечностей у детей с заболеваниями, сопровождающимися нарушенным остеогенезом и хрупкостью костной ткани, требует применения комбинированных методик с элементами телескопического интрамедуллярного остеосинтеза, оставляемого *in situ*.

Цель работы — проверка гипотезы о том, что установка трансфизарных телескопических стержней одновременно с аппаратом внешней фиксации при удлинении бедра или голени у детей с заболеваниями, сопровождающимися сниженными прочностными свойствами костной ткани (болезнь Олье и несовершенный остеогенез), не приводит к блокированию стержней в период фиксации, не препятствует формированию distractionного регенерата и позволяет, помимо удлинения, выполнять коррекцию деформаций.

Материалы и методы. В данное исследование вошли четыре пациента с болезнью Олье (все мальчики) и девочка с несовершенным остеогенезом, которым осуществляли удлинение конечности и/или коррекцию деформации комбинированной методикой. В качестве внешнего фиксатора использовали аппарат Илизарова, одновременно с внешней фиксацией устанавливали телескопический титановый стержень. После достижения костного сращения аппарат Илизарова снимали, а телескопический стержень оставляли на месте.

Результаты. Планируемая величина удлинения, коррекция деформации достигнуты у всех пациентов. Ни в одном случае мы не наблюдали потери фиксации резьбовых частей стержня в эпифизах бедра, голени или апофизе большого вертела в период distraction. Также не отмечено блокирование телескопирования стержня в период фазы distraction. Индекс внешней фиксации при полисегментарном удлинении составлял 11,6 дн/см, при моносегментарном удлинении бедра варьировал от 22,6 дн/см до 28,8 дн/см.

Обсуждение. В сравнении с методиками комбинированного удлинения с эластичным интрамедуллярным армированием удлинение на телескопическом стержне показывает преимущества армирования на всем протяжении сегмента, отсутствие рисков миграции интрамедуллярного материала. Не обнаружено проблем формирования distractionного регенерата и увеличения сроков внешней фиксации, встречающихся при применении других методик.

Заключение. Результаты лечения пациентов данной серии доказывают возможность выполнения удлинения конечности у пациентов с патологическим остеогенезом, выполняя комбинированный одновременный остеосинтез внешним фиксатором и телескопическим титановым стержнем. В процессе удлинения мы не наблюдали ни потери фиксации резьбовых частей интрамедуллярного стержня, ни блокирования скольжения частей стержня.

Ключевые слова: удлинение, болезнь Олье, несовершенный остеогенез, телескопический стержень, внешняя фиксация

Для цитирования: Абдуллоев А.М., Гвоздев Н.С., Тропин Д.В., Попков Д.А. Результаты реконструктивной хирургии конечностей с использованием телескопического титанового стержня. *Гений ортопедии*. 2025;31(1):51-59. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-51-59.



Results of limb reconstruction surgery using a telescopic titanium rod: early findings

A.M. Abdulloev✉, N.S. Gvozdev, D.V. Tropin, D.A. Popkov

Ilizarov National Medical Research Center for Traumatology and Orthopedics, Kurgan, Russian Federation

Corresponding author: Avazbek M. Abdulloev, asadiabdulloev@gmail.com

Abstract

Introduction Pediatric limb reconstruction associated with impaired osteogenesis and fragile bone suggests the use of combined techniques with telescopic intramedullary rods left in situ.

The **objective** was to test the hypothesis that transphyseal telescopic rods applied simultaneously with an external fixation device for pediatric femur or tibia lengthening associated with weak and brittle bone in Ollier disease and osteogenesis imperfecta does not lead to the rod blocking during fixation, does not prevent distraction bone regeneration, lengthening and deformity correction.

Material and methods The study involved four male patients with Ollier disease and a female patient with osteogenesis imperfecta who underwent limb lengthening and/or deformity correction using a combined technique. Ilizarov apparatus was used as an external fixator, and a telescopic titanium rod was placed simultaneously with external fixator. With the bone consolidated, the Ilizarov apparatus was removed and the telescopic rod left in place.

Results The length gain and deformity correction intended were achieved in all patients. No loss of fixation of the threaded rod was observed in the femur and tibia epiphyses, or greater trochanter apophysis during distraction. There was no blocking of the rod telescopes during distraction. The external fixation index was 11.6 days/cm for polysegmental lengthening, 22.6 days/cm to 28.8 days/cm with monosegmental femoral lengthening.

Discussion Limb lengthening with a telescopic rod has the advantages of additional reinforcement through the segment with no risk of intramedullary construct migration as compared with combined lengthening techniques using flexible intramedullary nailing. There were no problems with formation of the distraction regenerate and longer period of external fixation, which can be seen with other techniques.

Conclusion Outcomes in this series indicated the possibility of limb lengthening and simultaneous osteosynthesis using external fixator and a telescopic titanium rod in patients with pathological osteogenesis. No loss of fixation of the threaded parts of the intramedullary rod, no blocking of the sliding parts of the rod were observed during limb lengthening.

Keywords: lengthening, Ollier disease, osteogenesis imperfecta, telescopic rod, external fixation

For citation: Abdulloev AM, Gvozdev NS, Tropin DV, Popkov DA. Results of limb reconstruction surgery using a telescopic titanium rod: early findings. *Genij Ortopedii*. 2025;31(1):51-59. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-51-59.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе лечения заболеваний, сопровождающихся низкими прочностными свойствами костей (болезнь Олье, несовершенный остеогенез, полиоссальная фиброзная дисплазия, метаболические остеопатии), часто развиваются вторичные деформации, патологические переломы, неравенства длины конечностей, что является показанием к использованию комбинированных хирургических решений, где интрамедуллярные телескопические конструкции являются ключевым элементом [1–5]. Телескопический стержень, оставленный *in situ* на протяжении многих лет, снижает риски повторного возникновения деформаций и переломов [6, 7]. В литературе предложены технологии армирования при одновременном использовании внешней фиксации [2, 8–10]. Более того, у пациентов с врожденными патологиями скелета или болезнью Олье используют удлинение на ригидном стержне внешним фиксатором или полностью имплантируемым электромагнитным интрамедуллярным стержнем, что практически полностью устраняет риск переломов после снятия аппарата внешней фиксации и существенно сокращает период реабилитации [11–13]. Но данная технология ограничена в применении у детей вследствие наличия открытых зон роста и относительно малого диаметра диафиза кости [12, 14–16]. Кроме того, оставление на длительный период внутри кости электромагнитного стержня вызывает определенное беспокойство [17].

F. Schiedel et al. [8] и F. Grill et al. [9] предложили профилактическое армирование удлиненной кости в момент снятия аппарата внешней фиксации введением либо ригидного стержня, либо эластичных стержней, метод получил свое название “lengthening then rodding”. Однако, как признают сами авторы, риски перелома в коротком промежутке от момента снятия аппарата до введения интрамедуллярного фиксатора, а также инфекционных осложнений вследствие бактериального присутствия в каналах удаленных спиц существенны [8, 9]. Наш опыт показывает определенные преимущества армирования удлиненного участка кости при реконструкции конечностей, когда эластичные стержни вводят одновременно с установкой внешнего фиксатора в самом начале лечения [18, 19]. Однако введение эластичных стержней через метафизарные отделы не обеспечивает армирования новообразованных участков кости в отдаленном периоде по мере функционирования зон роста у детей [2].

В детской ортопедии телескопические стержни, введенные трансфизарно при коррекции деформаций и фиксированные в проксимальном и дистальном эпифизах (или апофизе большого вертела), обеспечивают армирование кости на всем протяжении, когда внутренняя часть стержня скользит во внешней по мере роста ребенка [3, 6, 20–22]. Телескопические стержни имеют преимущества перед трансфизарным эластичным армированием с точки зрения сохранения положения конструкции и меньшего числа повторных операций [23].

Цель работы — проверка гипотезы о том, что установка трансфизарных телескопических стержней одновременно с аппаратом внешней фиксации при удлинении бедра или голени у детей с заболеваниями, сопровождающимися сниженными прочностными свойствами костной ткани (болезнь Олье и несовершенный остеогенез), не приводит к блокированию стержней в период фиксации, не препятствует формированию дистракционного регенерата и позволяет, помимо удлинения, выполнять коррекцию деформаций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наше исследование основано на ретроспективной короткой серии пяти пациентов: четыре удлинения бедра и один случай бисегментарного удлинения конечности (бедро и голень), которые были выполнены в период с марта 2022 г. по ноябрь 2024 г. (табл. 1). Средний возраст пациентов — $(6,0 \pm 1,9)$ лет. Четыре пациента с болезнью Олье были мальчиками, у девочки диагностирован несовершенный остеогенез. Ранее лишь одному пациенту проводили удлинение голени.

На момент начала оперативного лечения все пациенты и их родители отмечали прогрессирующее ухудшение двигательных возможностей, неравенство длины ног и деформации. Кроме того, в анамнезе у пациентов было от двух до четырех патологических переломов.

Таблица 1

Данные пациентов, тип операции

Пациент	Диагноз	Возраст, в годах	Аспекты остеотомии и армирования телескопическим стержнем	Особенности внешней фиксации, другие элементы операции
С.	Несовершенный остеогенез, тип I	5	Двойная перкутанная остеотомия бедра: на проксимальной остеотомии коррекция варусной и торсионной деформации, на уровне дистальной удлинение, антеградный стержень диаметром 4,2 мм	Аппарат Илизарова
Л.	Болезнь Олье	4	Дистальная клиновидная корригирующая остеотомия бедра, антеградный стержень диаметром 5,5 мм	Аппарат Илизарова, одновременное удлинение голени с интрамедуллярными эластичными стержнями

Таблица 1 (продолжение)

Данные пациентов, тип операции

Пациент	Диагноз	Возраст, в годах	Аспекты остеотомии и армирования телескопическим стержнем	Особенности внешней фиксации, другие элементы операции
Р.	Болезнь Олье	11	Дистальная клиновидная корригирующая остеотомия бедра, ретроградный телескопический стержень диаметром 5,5 мм	Аппарат Илизарова, удаление прежних эластичных стержней
К.	Болезнь Олье	6	Одновременное удлинение бедра и голени, ретроградный стержень диаметром 5,5 мм — в бедренной кости, антеградный стержень диаметром 5,5 мм — в большеберцовой	Аппарат Илизарова
Н.	Болезнь Олье	6	Удлинение бедра, ретроградное введение стержня, одномоментная коррекция варусной деформации	Аппарат Илизарова

Использован стержень интрамедуллярный телескопический, титановый (РУ № РЗН 2017/5875 от 10 июля 2017 г., входит в набор имплантатов для детской ортопедии «ОртоКид» (OrthoKid) по ТУ 9437-001-73747729-2014).

Хирургическая техника удлинения с телескопическим стержнем состояла из нескольких этапов.

У пациентов с болезнью Олье (рис. 1) при необходимости после удаления ранее имплантированного материала (два пациента) выполняли поднадкостничную остеотомию, клиновидную в случае коррекции деформации. Уровень остеотомии и величину одномоментной коррекции определяли в предоперационном периоде исходя из параметров деформации.

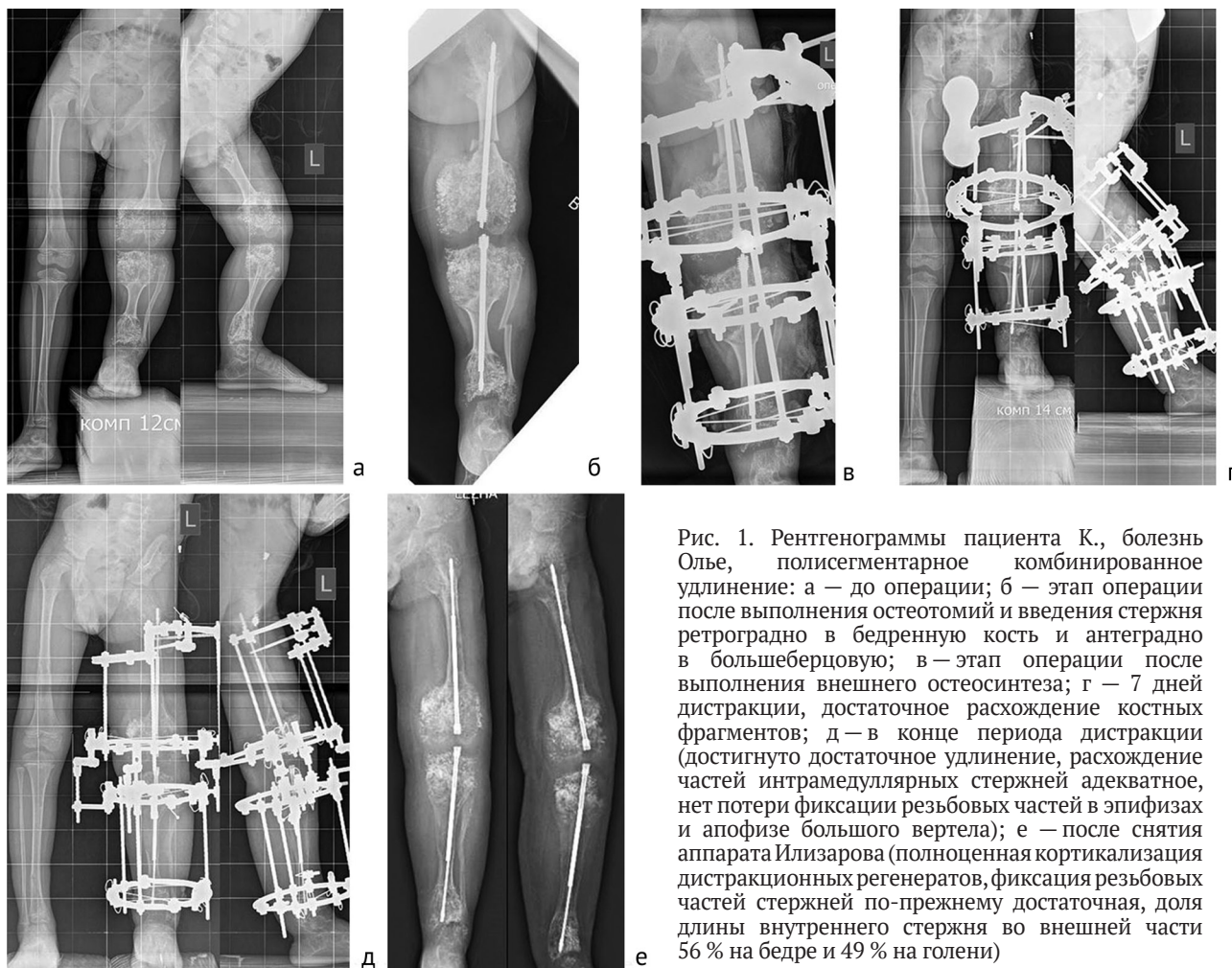


Рис. 1. Рентгенограммы пациента К., болезнь Олье, полисегментарное комбинированное удлинение: а — до операции; б — этап операции после выполнения остеотомий и введения стержня ретроградно в бедренную кость и антеградно в большеберцовую; в — этап операции после выполнения внешнего остеосинтеза; г — 7 дней distraction, достаточное расхождение костных фрагментов; д — в конце периода distraction (достигнуто достаточное удлинение, расхождение частей интрамедуллярных стержней адекватное, нет потери фиксации резьбовых частей в эпифизах и апофизе большого вертела); е — после снятия аппарата Илизарова (полноценная кортикализация distractionных регенератов, фиксация резьбовых частей стержней по-прежнему достаточная, доля длины внутреннего стержня во внешней части 56 % на бедре и 49 % на голени)

Рассверливание канала по спице-направителю производили у всех пациентов с болезнью Олье. Введение спицы было антеградным (через большой вертел) в двух случаях и ретроградным (парапателлярным доступом) также в двух случаях. После рассверливания и извлечения спицы-гида вводили внутреннюю часть телескопического стержня до противоположного метафиза без фиксации резьбовой части в эпифизе/апофизе. Далее внешнюю (полую) часть телескопического стержня при необхо-

димости укорачивали, вводили в канал, ее резьбовую часть вкручивали под рентгеновским контролем в дистальный эпифиз бедра в межмышечковом пространстве (при ретроградном введении стержня) и в большой вертел таким образом, чтобы резьба не заходила за зону роста в метафизарные отделы. И только после этого этапа внутреннюю часть стержня с применением Т-образной рукоятки вкручивали в противоположный эпифиз/апофиз, также избегая расположения части резьбы в метафизе.

Ретроградное введение стержня выполняли в случаях объемных хондроматозных очагов, располагавшихся преимущественно в дистальной части бедренной кости. Внешний диаметр диафизарной части вводимого стержня был 4,2 мм в одном случае (пациент с несовершенным остеогенезом) и 5,5 мм в остальных случаях. На заключительном этапе операции устанавливали аппарат Илизарова с обязательным условием осуществления последующей дистракции с вектором, параллельным интрамедуллярному телескопическому стержню.

Особенностями хирургической техники при удлинении бедра у девочки с несовершенным остеогенезом были чрескожная остеотомия и первоначальная фиксация резьбовой внешней части стержня по рекомендации О. Birke et al. [3] (рис. 2). Отметим, что коррекция варусной деформации была достигнута выполнением чрескожной остеотомии на данном уровне (проксимальная остеотомия) и введением телескопического стержня без рассверливания костномозгового канала, а торсионный компонент деформации – разворотом опор аппарата Илизарова при уже введенном стержне.

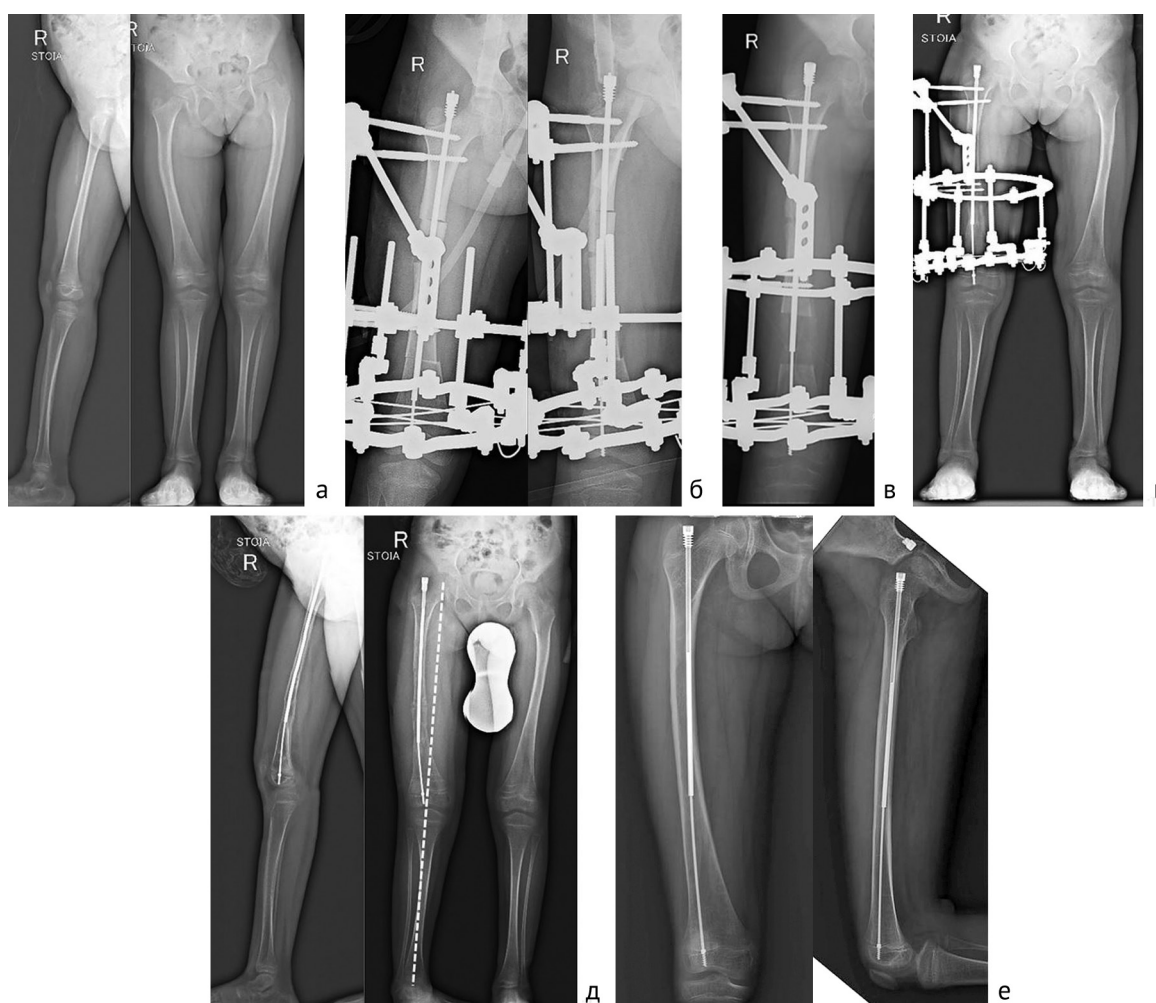


Рис. 2. Рентгенограммы пациентки С. с несовершенным остеогенезом: а — предоперационный период; б — день операции (двойная остеотомия бедренной кости); в — в конце периода дистракции (удлинение интрамедуллярного стержня без потери фиксации резьбовых концов); г — перед снятием аппарата Илизарова (нормальная рентгенанатомия оперированной нижней конечности); д — 3 мес. после снятия аппарата внешней фиксации (правильная позиция анатомической оси конечности относительно центра коленного сустава сохраняется); е — 2,5 года после операции (ось удлиненного сегмента правильная, потери фиксации резьбовых частей нет, части стержня благополучно раздвигаются)

В послеоперационном периоде пациенты были вертикализированы и начали ходить с помощью ходунков или костылей со 2–3 дня. Начинали дистракцию во всех случаях на пятый день, с темпом 1,5 мм/сут. в течение 6–7 дней до первого рентгеновского контроля. Повышенный темп дистракции

был установлен как с целью достижения уверенного расхождения костных фрагментов при наличии телескопического стержня, так и во избежание преждевременной костной консолидации. При констатации адекватного межфрагментарного диастаза при первом рентгеновском контроле темп дистракции снижался до 1 мм/сут. Варьирование темпа дистракции в процессе удлинения зависело от интенсивности костной регенерации. Снятие аппарата внешней фиксации производили при явных признаках костного сращения.

Проведение данного исследования одобрено решением Этического комитета Центра Илизарова (протокол от 29.11.2024 № 1(76)). Полномочные представители пациентов дали письменное информированное согласие на оперативное вмешательство и обработку анонимизированных данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Запланированные величины удлинения и коррекции достигнуты у всех пациентов. После снятия аппарата использовали гипсовую лонгету или циркулярную гипсовую повязку в течение 3-4 недель, когда пациенты вновь переходили к ходьбе с постепенно возрастающей нагрузкой. Результаты удлинения с телескопическим стержнем представлены в табл. 2.

Ни в одном случае в фазу дистракции, наиболее критичную с точки зрения требований к позиции интрамедуллярного стержня, мы не наблюдали осложнений, специфичных для телескопического интрамедуллярного остеосинтеза (потеря фиксации резьбовых частей в эпифизах и апофизе, миграции частей стержня в коленный сустав, изгиб и блокирование стержня с прекращением телескопирования). В период дистракции скольжение частей интрамедуллярного стержня не было заблокировано элементами внешней фиксации, — спицами и стержнями-шурупами. В одном случае наблюдали поверхностную инфекцию возле спицы, которую купировали локальным лечением. Еще у одного пациента произошла преждевременная консолидация малоберцовой кости, что потребовало реостеотомии и проведения дополнительной спицы.

Таблица 2

Результаты удлинения с телескопическим стержнем

Пациент	Величина удлинения		Длительность внешней фиксации, дни	ИВФ, дн/см	Доля длины внутреннего стержня во внешней части, %	Осложнения
	абс., см	%				
С.	4,2	16,7	120	61,8	28,8	Нет
Л.	5,8	35,7	131	43,9	22,6	Поверхностная инфекция
Р.	4,0	15,4	97	69,9	24,3	Нет
К.	12		139		11,6	Преждевременная консолидация малоберцовой кости, реостеотомия
бедро	6	32,6		56		
голень	6	33,1		49		
Н.	5,5	30,2	134	62,5	23,5	Нет

ОБСУЖДЕНИЕ

В детской реконструктивной ортопедии конечностей интрамедуллярный остеосинтез, включая телескопический, оставленный *in situ* после коррекции деформаций при системных заболеваниях (несовершенный остеогенез, X-сцепленная гипофосфатемия, полиоссальная фиброзная дисплазия и проч.) с целью предотвращения или снижения риска патологических переломов и рецидива деформаций, является обязательным элементом [2–7].

Последовательное выполнение удлинения и интрамедуллярного армирования в момент демонтажа аппарата внешней фиксации представляет риски как перелома удлинённой кости в момент операции, так и инфекционных осложнений [8, 9]. Одновременное введение интрамедуллярных элементов (эластичных стержней) с выполнением внешнего остеосинтеза позволяет избежать таких осложнений [10, 25]. Однако этот комбинированный метод также не лишен недостатков: существует риск миграции эластичных стержней, как внутрь кости (вследствие их слабой фиксации), так и наружу с раздражением мягких тканей, необходимость удаления интрамедуллярных стержней [26]. Введение эластичных стержней подразумевает создание каналов в метафизарных отделах, что исключает армирование на всем протяжении кости, а трансфизарное введение исключает центральное расположение стержней относительно плоскости зон роста, что потенциально может вести к угловым деформациям [23, 27]. Наконец, отметим, что телескопирование эластичных стержней в костномозговом канале часто сопровождается их блокированием в процессе роста и потерей эффекта армирования всей кости в отдаленном периоде [23].

Из публикаций по коррекции деформаций конечностей у детей с несовершенным остеогенезом следует, что трансфизарное армирование телескопическим стержнем оказывается надежнее, чем трансфизарное встречное армирование телескопическими стержнями, с точки зрения меньшего количества осложнений и более продолжительного эффекта армирования [20, 23, 24]. Именно с этой точки зрения мы рассматриваем использование телескопического армирования при удлинении конечностей у детей с генетическими заболеваниями, сопровождающимися сниженными прочностными свойствами костей, — комбинации трансфизарного армирования телескопическими стержнями одновременно с выполнением внешнего остеосинтеза для удлинения конечности с последующим оставлением *in situ* уже введенного интрамедуллярного фиксатора, имеющего наименьший потенциальный риск осложнений.

Фактором, ограничивающим возможность сделать детализированное заключение по эффективности метода, является небольшой размер выборки. Тем не менее, помимо доказательства возможности выполнения такого типа комбинированного остеосинтеза мы можем обсудить и иные аспекты. Для телескопических стержней у пациентов с несовершенным остеогенезом характерна потеря фиксации резьбовых частей, изгиб стержня, блокирование и нерасхождение частей [3, 5, 28–30]. K. Holmes et al. подчеркивают, что центральная позиция дистальной фиксации резьбовой части имеет крайне важное значение, при таком расположении увеличивается «выживаемость» остеосинтеза и время до замены стержня [29]. Именно изгиб стержня является ключевым фактором нерасхождения его частей в процессе роста сегмента и потери фиксации резьбовых составляющих [29, 31–33]. Поэтому дополнительная остеотомия, направленная на точное выравнивание анатомической оси сегмента, является важным элементом функционирования телескопической системы в отдаленном периоде [7, 33]. В связи с этим мы проводили как тщательное планирование коррекции деформаций, так и их выполнение, что позволило избежать изгиба стержня на протяжении и его блокирования в период distraction, когда скорость телескопирования была предельно высокой. Другим выводом из данного положения является то, что при использовании телескопических стержней в период distraction необходимо исключать из планирования любую постепенную коррекцию угловых деформаций в аппарате внешней фиксации, что неизбежно может привести к изгибу стержня и блокированию скольжения его частей.

Во избежание протрузии резьбовой части внутреннего стержня в коленный или голеностопный сустав в момент установки телескопического фиксатора мы остаемся приверженцами рекомендаций O. Birke et al. [3], закручивая резьбу внутренней части стержня только после закручивания резьбы внешней части в соответствующий эпифиз (апофиз). При удлинении шести сегментов ни в одном случае мы не наблюдали ни протрузии частей стержня в сустав, ни потери фиксации резьбовых частей, ни блокирования скольжения внутренней части во внешней.

Многими авторами показано, что изолированное использование интрамедуллярных телескопических стержней при коррекции деформаций сопровождается частыми вторичными ротационными и продольными смещениями костных фрагментов [3, 4, 34, 35]. T.J. Cho et al. [4], J.M. Franzone et al. [36] используют короткие блокируемые пластинки с монокортикальной фиксацией, чтобы избежать подобных смещений [4, 36]. Однако такой подход сопровождается достижением сращения лишь в 85,3 % случаев и частотой переломов на уровне пластин или на уровне каналов винтов после их удаления в 18,9 % случаев [37]. В данной ситуации использование внешней фиксации как для коррекции деформации, так и при удлинении позволяет предотвратить вторичные угловые и ротационные смещения и переломы на уровне накостных имплантов.

Наконец, отметим, что мы не наблюдали замедленной костной консолидации ни в одном случае. В нашей серии индекс внешней фиксации был наименьшим при полисегментарном удлинении (11,6 дн/см), а при монолокальном удлинении бедра варьировал от 22,6 дн/см до 28,8 дн/см. Данные результаты сопоставимы с результатами удлинения у детей, которым стимуляцию остеогенеза выполняли эластичным армированием, проведенным через метафизарные зоны [19, 26, 38].

Мы не встретили иных осложнений, которые повлияли бы на результат лечения. Единственным осложнением, требовавшим выполнения незапланированного вмешательства, была преждевременная консолидация малоберцовой кости с необходимостью ее остеотомии для продолжения удлинения.

Использование телескопического стержня при удлинении является перспективной методикой, однако предъявляются высокие требования к ее техническому выполнению: центральное размещение стержней относительно площади зон роста, одномоментная коррекция угловых деформаций, удлинение строго параллельно оси телескопического стержня. Данный подход исключает постепенную коррекцию угловых деформаций во избежание изгиба стержня и недопускания блокирования расхождения его частей в будущем.

Очевидным ограничением данного исследования является малая выборка, а также ее разнородность (две нозологии). Для получения доказательных результатов, обосновывающих предполагаемые сроки лечения и вероятность рисков осложнений, мы планируем расширить выборку до 30 и более пациентов. Кроме того, для определения возможности телескопирования интрамедуллярных стержней отдаленный период наблюдения будет увеличен до двух и более лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдение серии случаев продемонстрировало возможность удлинения длинных трубчатых костей у пациентов с болезнью Олье и нетяжелыми формами несовершенного остеогенеза аппаратом внешней фиксации с одновременным размещением трансфизарного титанового телескопического стержня. Исследование удлинения шести сегментов показало, что «ускоренное» расхождение частей стержня в период distraction не приводит к блокированию скольжения и, соответственно, к потере требуемой фиксации резьбовых частей в эпифизах. Кроме того, ни в одном случае не обнаружена задержка формирования и созревания distractionного регенерата.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

Источник финансирования. Отсутствует

Этическая экспертиза. Проведение данного исследования одобрено решением Этического комитета Центра Илизарова (протокол от 29.11.2024 № 1(76)).

Информированное согласие. Полномочные представители пациентов дали письменное информированное согласие на оперативное вмешательство и обработку анонимизированных данных.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Angelini A, Baracco R, Dolci A, et al. Limb lengthening for deformities in Ollier's disease: a systematic review. *Eur J Orthop Surg Traumatol*. 2020;30(8):1325-1332. doi: 10.1007/s00590-020-02692-5.
- Popkov A, Aranovich A, Popkov D. Results of deformity correction in children with X-linked hereditary hypophosphatemic rickets by external fixation or combined technique. *Int Orthop*. 2015;39(12):2423-2431. doi: 10.1007/s00264-015-2814-7.
- Birke O, Davies N, Latimer M, et al. Experience with the Fassier-Duval telescopic rod: first 24 consecutive cases with a minimum of 1-year follow-up. *J Pediatr Orthop*. 2011;31(4):458-464. doi: 10.1097/BPO.0b013e31821bfb50.
- Cho TJ, Lee K, Oh CW, et al. Locking plate placement with unicortical screw fixation adjunctive to intramedullary rodding in long bones of patients with osteogenesis imperfecta. *J Bone Joint Surg Am*. 2015;97(9):733-737. doi: 10.2106/JBJS.N.01185.
- Popkov D, Dolganova T, Mingazov E, et al. Combined technique of titanium telescopic rods and external fixation in osteogenesis imperfecta patients: First 12 consecutive cases. *J Orthop*. 2020;22:316-325. doi: 10.1016/j.jor.2020.05.017.
- Fassier F. Fassier-Duval Telescopic System: How I Do It? *J Pediatr Orthop*. 2017;37 Suppl 2:S48-S51. doi: 10.1097/BPO.0000000000001024.
- Sułko J, Oberc A. Advantages and Complications Following Fassier-Duval Intramedullary Rodding in Children. Pilot Study. *Ortop Traumatol Rehabil*. 2015;17(5):523-530. doi: 10.5604/15093492.1186830.
- Schiedel F, Elsner U, Goshager G, et al. Prophylactic titanium elastic nailing (TEN) following femoral lengthening (Lengthening then rodding) with one or two nails reduces the risk for secondary interventions after regenerate fractures: a cohort study in monolateral vs. bilateral lengthening procedures. *BMC Musculoskelet Disord*. 2013;14:302. doi: 10.1186/1471-2474-14-302.
- Grill F, Dungal P, Steinwender G, Hosny G. Congenital short femur. *J Pediatr Orthop B*. 1999;(2):35-41.
- Lampasi M, Launay F, Jouve JL, Bollini G. Femoral lengthening over elastic stable intramedullary nailing in children using the monolateral external fixator. *Chir Organi Mov*. 2009;93(2):57-64. doi: 10.1007/s12306-009-0032-4.
- Paley D, Herzenberg JE, Paremian G, Bhav A. Femoral lengthening over an intramedullary nail. A matched-case comparison with Ilizarov femoral lengthening. *J Bone Joint Surg Am*. 1997;79(10):1464-1480. doi: 10.2106/00004623-199710000-00003.
- Black SR, Kwon MS, Cherkashin AM, et al. Lengthening in Congenital Femoral Deficiency: A Comparison of Circular External Fixation and a Motorized Intramedullary Nail. *J Bone Joint Surg Am*. 2015;97(17):1432-1440. doi: 10.2106/JBJS.N.00932.
- Huser AJ, Hoellwarth JS, Coppa V, et al. Lengthening the Lower Extremities of Children with Ollier's and Maffucci's Enchondromatosis Using Implantable Lengthening Nails. *Children (Basel)*. 2021;8(6):502. doi: 10.3390/children8060502.
- Herzenberg JE, Paley D. Tibial Lengthening Over Nails (LON). *Techniques in Orthopaedics*. 1997;12(4):250-259.
- Calder PR, Laubscher M, Goodier WD. The role of the intramedullary implant in limb lengthening. *Injury*. 2017;48 Suppl 1:S52-S58. doi: 10.1016/j.injury.2017.04.028.
- Horn J, Steen H, Huhnstock S, et al. Limb lengthening and deformity correction of congenital and acquired deformities in children using the Taylor Spatial Frame. *Acta Orthop*. 2017;88(3):334-340. doi: 10.1080/17453674.2017.1295706.
- Masci G, Palmacci O, Vitiello R, et al. Limb lengthening with PRECICE magnetic nail in pediatric patients: A systematic review. *World J Orthop*. 2021;12(8):575-583. doi: 10.5312/wjo.v12.i8.575.
- Popkov A, Aranovich A, Antonov A, et al. Lower limb lengthening and deformity correction in polyostotic fibrous dysplasia using external fixation and flexible intramedullary nailing. *J Orthop*. 2020;21:192-198. doi: 10.1016/j.jor.2020.03.014.
- Popkov D, Journeau P, Popkov A, et al. Ollier's disease limb lengthening: should intramedullary nailing be combined with circular external fixation? *Orthop Traumatol Surg Res*. 2010;96(4):348-353. doi: 10.1016/j.otsr.2010.01.002.
- Fassier FR. Osteogenesis Imperfecta-Who Needs Rodding Surgery? *Curr Osteoporos Rep*. 2021;19(3):264-270. doi: 10.1007/s11914-021-00665-z.
- Cox I, Al Mouazzen L, Bleibleh S, et al. Combined two-centre experience of single-entry telescopic rods identifies characteristic modes of failure. *Bone Joint J*. 2020;102-B(8):1048-1055. doi: 10.1302/0301-620X.102B8.BJJ-2020-0131.R1.
- Marini JC, Forlino A, Bächinger HP, et al. Osteogenesis imperfecta. *Nat Rev Dis Primers*. 2017;3:17052. doi: 10.1038/nrdp.2017.52.
- Popkov D, Popkov A, Mingazov E. Use of sliding transphyseal flexible intramedullary nailing in pediatric osteogenesis imperfecta patients. *Acta Orthop Belg*. 2019;85(1):1-11.
- Fassier A. Telescopic rodding in children: Technical progression from Dubow-Bailey to Fassier-Duval™. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2021;107(1S):102759. doi: 10.1016/j.otsr.2020.102759.
- Popkov A, Dučić S, Lazović M, et al. Limb lengthening and deformity correction in children with abnormal bone. *Injury*. 2019;50 Suppl 1:S79-S86. doi: 10.1016/j.injury.2019.03.045.

26. Тропин Д.В., Тропин В.И., Чертищев А.А. и др. Влияние эластичного интрамедуллярного армирования на удлинение нижних конечностей при приобретенных укорочениях: проспективное исследование. *Гений ортопедии*. 2024;30(4):522-532. doi: 10.18019/1028-4427-2024-30-4-522-532.
27. Кононович Н.А., Леончук С.С., Горбач Е.С. и др. Влияние трансфизарного интрамедуллярного стержня на формирование дис-тракционного регенерата голени и ее последующий рост у ягнят. *Гений ортопедии*. 2024;30(6):863-872. doi: 10.18019/1028-4427-2024-30-6-863-872.
28. Ruck J, Dahan-Oliel N, Montpetit K, et al. Fassier-Duval femoral rodding in children with osteogenesis imperfecta receiving bisphosphonates: functional outcomes at one year. *J Child Orthop*. 2011;5(3):217-224. doi: 10.1007/s11832-011-0341-7.
29. Holmes K, Gralla J, Brazell C, et al. Fassier-Duval Rod Failure: Is It Related to Positioning in the Distal Epiphysis? *J Pediatr Orthop*. 2020;40(8):448-452. doi: 10.1097/BPO.0000000000001513.
30. Spahn KM, Mickel T, Carry PM, et al. Fassier-Duval Rods are Associated With Superior Probability of Survival Compared With Static Implants in a Cohort of Children With Osteogenesis Imperfecta Deformities. *J Pediatr Orthop*. 2019;39(5):e392-e396. doi: 10.1097/BPO.0000000000001324.
31. Esposito P, Plotkin H. Surgical treatment of osteogenesis imperfecta: current concepts. *Curr Opin Pediatr*. 2008;20(1):52-57. doi: 10.1097/MOP.0b013e3282f35f03.
32. Lee K, Park MS, Yoo WJ, et al. Proximal migration of femoral telescopic rod in children with osteogenesis imperfecta. *J Pediatr Orthop*. 2015;35(2):178-184. doi: 10.1097/BPO.0000000000000228.
33. Lee RJ, Paloski MD, Sponseller PD, Leet AI. Bent Telescopic Rods in Patients With Osteogenesis Imperfecta. *J Pediatr Orthop*. 2016;36(6):656-660. doi: 10.1097/BPO.0000000000000509.
34. Shin CH, Lee DJ, Yoo WJ, et al. Dual Interlocking Telescopic Rod Provides Effective Tibial Stabilization in Children With Osteogenesis Imperfecta. *Clin Orthop Relat Res*. 2018;476(11):2238-2246. doi: 10.1097/CORR.0000000000000429.
35. Shin CH, Lee DJ, Yoo WJ, et al. Dual Interlocking Telescopic Rod Provides Effective Tibial Stabilization in Children With Osteogenesis Imperfecta. *Clin Orthop Relat Res*. 2018;476(11):2238-2246. doi: 10.1097/CORR.0000000000000429.
36. Franzone JM, Kruse RW. Intramedullary nailing with supplemental plate and screw fixation of long bones of patients with osteogenesis imperfecta: operative technique and preliminary results. *J Pediatr Orthop B*. 2018;27(4):344-349. doi: 10.1097/BPB.0000000000000405.
37. Shuhiamy NNA, Lee W, Didi FI, et al. Outcome of Locking Plate Fixation Adjunctive to Intramedullary Rodding in Osteogenesis Imperfecta Patients. *J Pediatr Orthop*. 2024. doi: 10.1097/BPO.00000000000002860.
38. Popkov A, Pietrzak S, Antonov A, et al. Limb Lengthening for Congenital Deficiencies Using External Fixation Combined With Flexible Intramedullary Nailing: A Multicenter Study. *J Pediatr Orthop*. 2021;41(6):e439-e447. doi: 10.1097/BPO.0000000000001816.

Статья поступила 30.10.2024; одобрена после рецензирования 11.11.2024; принята к публикации 10.12.2024.

The article was submitted 30.10.2024; approved after reviewing 11.11.2024; accepted for publication 10.12.2024.

Информация об авторах:

Авазбек Муроталиевич Абдуллоев — врач — травматолог-ортопед, asadiabdulloev@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-9957-2904>;

Никита Сергеевич Гвоздев — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, gvozdev_n.s@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3428-3742>;

Денис Васильевич Тропин — врач — травматолог-ортопед, i@tropin-1.ru, <https://orcid.org/0009-0001-6719-0959>;

Дмитрий Арнольдович Попков — доктор медицинских наук, профессор Российской Академии Наук, член-корр. Французской Академии медицинских наук, руководитель клиники, dpopkov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8996-867X>.

Information about the authors:

Avazbek M. Abdulloev — orthopaedic surgeon, asadiabdulloev@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-9957-2904>;

Nikita S. Gvozdev — Candidate of Medical Sciences, orthopaedic surgeon, gvozdev_n.s@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3428-3742>;

Denis V. Tropin — orthopaedic surgeon, i@tropin-1.ru, <https://orcid.org/0009-0001-6719-0959>;

Dmitry A. Popkov — Doctor of Biological Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Corresponding Member of the French Academy of Medical Sciences, Head of the Clinic, dpopkov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8996-867X>.

Вклад авторов:

Абдуллоев А.М. — сбор и анализ первичного материала, написание проекта статьи.

Гвоздев Н.С. — написание первоначального варианта манускрипта, дизайна исследования.

Тропин Д.В. — подбор и анализ литературы.

Попков Д.А. — методология, концептуализация, управление проектом, завершение написания статьи.



Первый опыт применения частично биорезорбируемого костнозамещающего материала у больного хроническим остеомиелитом большеберцовой кости 34-летней давности заболевания

А.С. Судницын, А.Л. Шастов, Н.М. Ключин, Г.Х. Рашидов

Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова,
Курган, Россия

Автор, ответственный за переписку: Гаджи-Мурад Хабибович Рашидов, Rashidovg@yandex.ru

Аннотация

Введение. Наиболее частым в лечении остеомиелитических полостей (III тип по Cierny – Mader) является двухэтапный подход, предложенный Masquelet, основной недостаток которого — необходимость выполнения повторного хирургического вмешательства, что приводит к удлинению срока реабилитации, увеличению экономических затрат и дополнительным эмоциональным переживаниям больного. В электронных базах найдено 17 публикаций, посвященных применению частично биорезорбируемых материалов при замещении неосложненных костных дефектов. Опыт лечения больных хроническим остеомиелитом (III тип по Cierny – Mader) с использованием подобных материалов не описан.

Цель работы — демонстрация первого применения частично биорезорбируемого остеозамещающего материала при одноэтапном лечении больного с длительно протекавшим остеомиелитическим процессом после безуспешного использования традиционных методов хирургического лечения.

Материалы и методы. Проведен комплексный анализ лечения больного 54 лет с диагнозом: Хронический посттравматический остеомиелит правой голени, свищевая форма. Комбинированная контрактура правого голеностопного сустава. Укорочение правой нижней конечности 2 см. Впервые применена методика одноэтапного лечения с использованием частично биорезорбируемого остеозамещающего материала в комбинации с антибактериальными препаратами, заранее подобранными в соответствии с микробным пейзажем пациента.

Результаты. В результате исследования удалось оценить возможность применения частично биорезорбируемого материала в комбинации с антибактериальными препаратами при лечении больного с остеомиелитической полостью III типа по Cierny – Mader и достигнуть стойкого купирования гнойно-воспалительного процесса.

Обсуждение. Обязательное при подходе Masquelet выполнение повторного вмешательства увеличивает степень хирургической агрессии, требует забора аутокостного трансплантата, увеличивая риск возможных осложнений. Очевидными преимуществами применения биорезорбируемых материалов, импрегнированных антибактериальными препаратами для заполнения костных дефектов, являются отсутствие необходимости в заборе аутотрансплантата, сокращение до одного числа хирургических вмешательств, возможность постепенного выведения имплантата естественным образом из организма больного за счет биорезорбции.

Заключение. Проведенное исследование демонстрирует возможности применения частично биорезорбируемых материалов в качестве одноэтапной технологии лечения больных с остеомиелитическими полостями (III тип по Cierny – Mader).

Ключевые слова: хронический остеомиелит, остеомиелитическая полость, одноэтапное оперативное лечение остеомиелита

Для цитирования: Судницын А.С., Шастов А.Л., Ключин Н.М., Рашидов Г.Х. Первый опыт применения частично биорезорбируемого костнозамещающего материала у больного хроническим остеомиелитом большеберцовой кости 34-летней давности заболевания. *Гений ортопедии*. 2025;31(1):60-65. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-60-65.

Clinical case

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-1-60-65>



First experience with the use of a partially bioresorbable bone substitution material in a patient with 34-year old chronic osteomyelitis of the tibia

A.S. Sudnitsyn, A.L. Shastov, N.M. Klushin, G.Kh. Rashidov✉

Ilizarov National Medical Research Centre for Traumatology and Orthopedics, Kurgan, Russian Federation

Corresponding author: Gadzhi-Murad Kh. Rashidov, Rashidovg@yandex.ru

Abstract

Introduction The most common approach to the treatment of osteomyelitic cavities (Cierny – Mader type III) is a two-stage approach proposed by Masquelet, the main shortcoming of which is the need to perform a second surgical intervention which results in a longer rehabilitation period, increased economic costs and additional emotional distress of the patient. In electronic databases, we found 17 publications devoted to the use of partially bioresorbable materials for filling in uncomplicated bone defects. The experience of treatment of chronic osteomyelitis (Cierny – Mader type III) using such materials has not been described.

Purpose Demonstration of the first use of a partially bioresorbable osteosubstituting material in a one-stage treatment of a patient with a long-term osteomyelitic process after failures of conventional surgical treatment methods.

Materials and methods We present a case of a 54-year old patient with a diagnosis of chronic post-traumatic osteomyelitis of the right leg, fistulous form, associated with contracture of the right ankle joint, 2-cm shortening of the right lower limb. A one-stage treatment technique was used using a partially bioresorbable osteosubstituting material for the first time in combination with antibacterial drugs, preselected in accordance with the patient's microbial cultures.

Results The study evaluated the use of a partially bioresorbable material impregnated with antibacterial drugs in the treatment of a patient with osteomyelitic cavity Cierny – Mader type III that achieved stable arrest of purulent and inflammatory process.

Discussion The mandatory two-stage Masquelet approach increases the surgical aggression, requires collection of an autologous bone graft, thus the risk of possible complications becomes higher. The obvious advantages of bioresorbable materials impregnated with antibacterial drugs to fill in bone defects are: no need to collect an autograft, a reduction in the number of surgical interventions to one, the possibility of gradual natural degradation of the implant from the patient's body due to bioresorption. **Conclusion** The study demonstrates the potential use of partially bioresorbable materials in a one-stage technology for treating patients with Cierny – Mader type III osteomyelitic cavities.

Keywords: chronic osteomyelitis, osteomyelitis cavity, one-stage surgical treatment of osteomyelitis

For citation: Sudnitsyn AS, Shastov AL, Klushin NM, Rashidov GK. First experience with the use of a partially bioresorbable bone substitution material in a patient with 34-year old chronic osteomyelitis of the tibia. *Genij Ortopedii*. 2025;31(1):60-65. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-60-65.

ВВЕДЕНИЕ

Хронический остеомиелит является социальной, санитарно-медицинской и экономической проблемой современного здравоохранения во всем мире и составляет до 10 % всех патологий костно-мышечной системы. Лечение остеомиелита в большинстве случаев — трудоемкое, длительное, многоэтапное, сопровождается частыми рецидивами [1, 2].

В выборе техники оперативного вмешательства хирургическое сообщество ориентируется на классификацию, предложенную Cierny – Mader, согласно которой полостные формы остеомиелита относятся к III анатомическому типу [3].

Наиболее частым вариантом лечения остеомиелитических полостей, нашедшим отражение в литературе, является двухэтапный метод Masquelet (метод индуцированной мембраны) [4–9]. При этом неотъемлемую часть данного метода составляет выполнение повторной операции, — удаление антибактериального спейсера из полиметилметакрилата с его заменой на остеозамещающий трансплантат, что может привести к медленному заживлению фиброзно-измененных покровных тканей, удлинению срока реабилитации, увеличению экономических затрат и дополнительным эмоциональным переживаниям больного [1, 2, 6, 8, 10].

Применение частично биорезорбируемых материалов, индуцированных антибактериальными препаратами, в лечении больных травматолого-ортопедического профиля слабо освещено в литературе. В базах данных eLIBRARY и PubMed найдено 17 публикаций, посвященных применению частично биорезорбируемых материалов при замещении неосложненных костных дефектов. Опыт лечения больных хроническим остеомиелитом (III тип по Cierny – Mader) с использованием подобных материалов не описан.

Полученный нами опыт применения биорезорбируемого костного цемента демонстрирует потенциальную перспективу дальнейшего изучения совместимости биорезорбируемых материалов и антибактериальных препаратов, сроков и степени эффективного воздействия на микрофлору.

Цель работы — демонстрация первого применения частично биорезорбируемого остеозамещающего материала при одноэтапном лечении больного с длительно протекавшим остеомиелитическим процессом после безуспешного использования традиционных методов хирургического лечения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Больной 54 лет обратился в 2022 г. в клинику костно-суставной инфекции НМИЦ ТО имени академика Г.А. Илизарова с жалобами на длительно функционирующий свищевой ход в средней трети голени с экссудатом, нарушение опороспособности правой нижней конечности.

В предоперационном периоде, наряду со сбором анамнеза и клиническим осмотром, больному выполнили рентгенографию пораженной конечности в двух проекциях, анализ микробного пейзажа в раневом отделяемом.

На момент поступления в клинику общее состояние больного — удовлетворительное, температура тела 36,6 °С. Дыхание — везикулярное, хрипов нет. Частота дыхания — 16 в 1 мин. Тоны сердца — ясные, ритмичные, АД — 120/80 мм рт. ст., пульс — 72 удара в 1 мин. Со стороны других внутренних органов и систем признаков патологии нет.

Из анамнеза: 34 г. назад в результате автоаварии больной получил открытый многооскольчатый перелом костей нижней трети голени со смещением, осложнившийся развитием компартмент-синдрома и обширным раневым дефектом. В связи с полученной травмой и развившимся осложнением больной многократно оперирован: пластика раневого дефекта; БИОС; наkostный МОС; остеосинтез по Илизарову. В результате полученного лечения достигнута консолидация перелома, однако остеомиелитический процесс купирован не был.

Объективно: больной передвигается без использования средств дополнительной опоры и иных ортопедических изделий, прихрамывая на правую нижнюю конечность. Укорочение правой нижней конечности за счет голени — 2 см. Кожный покров по передней поверхности правой голени представлен рубцово-измененными тканями с функционирующими свищевыми ходами (рис. 1, а) и гнойным экссудатом в средней трети. Функция смежных суставов не нарушена.

При анализе микробного пейзажа в экссудате отмечен рост *Staphylococcus aureus* (10/4 КОЕ/мл. MSSA).

Рентгенологически выявлена варусно-рекурвационная деформация 10/15° с признаками остеосклероза в зоне полостного дефекта на уровне верхней и средней третей метадиафизарной зоны, неправильной формы и с четкими контурами (рис. 1, б).

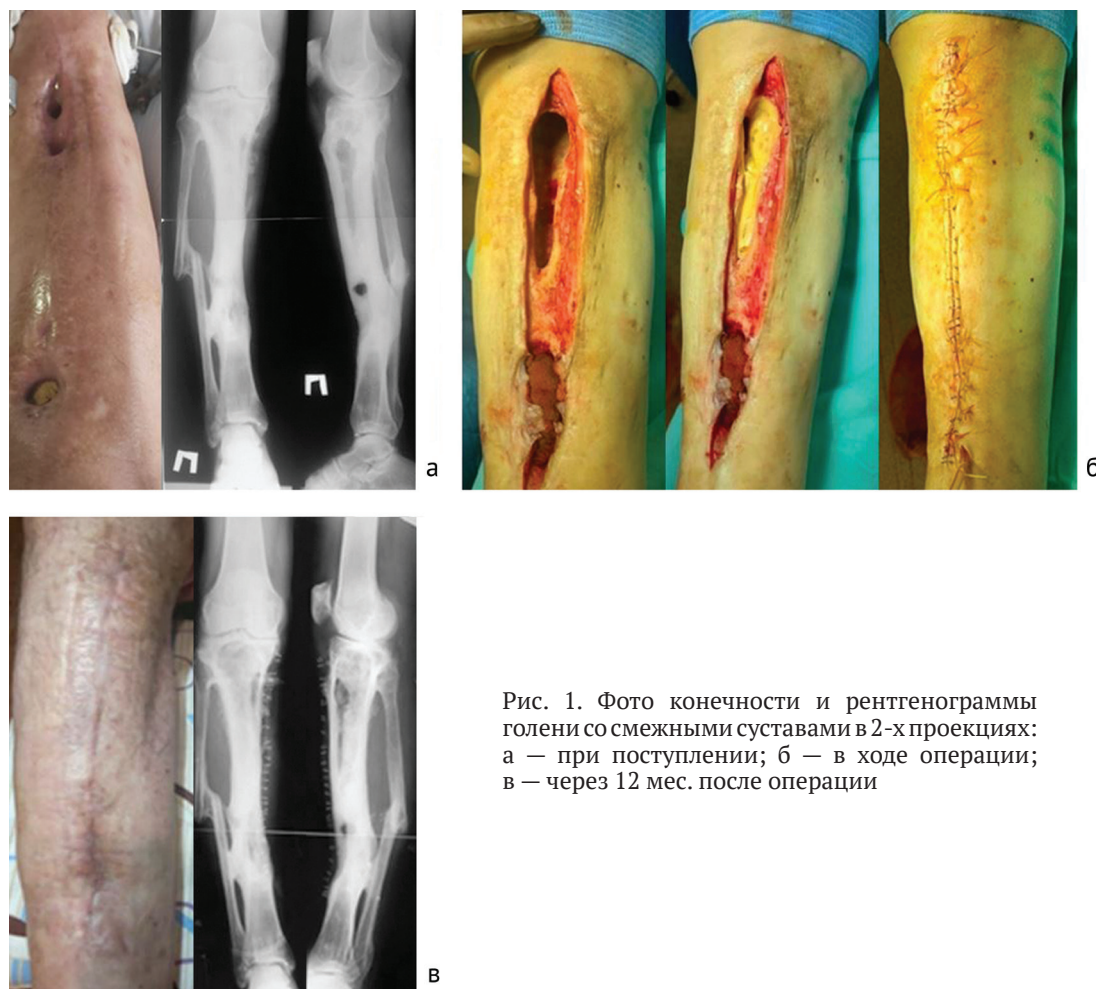


Рис. 1. Фото конечности и рентгенограммы голени со смежными суставами в 2-х проекциях: а — при поступлении; б — в ходе операции; в — через 12 мес. после операции

На основе полученной клинико-рентгенологической картины больному проведено хирургическое вмешательство (рис. 1, в), в ходе которого после контрастирования свищевых ходов введением раствора бриллиантовой зелени с осуществлением гемостаза за счет наложения кровоостанавливающего жгута на уровне нижней трети бедра выполняли продольное рассечение кожного покрова, иссекая попутно свищевые ходы по передней поверхности голени. После обнажения остеомиелитической полости выполняли радикальную секвестрнекрэктомию с последующим лаважем костной раны пульсирующей струей раствора антисептика в объеме 5 л. Затем выполняли имплантацию частично биорезорбируемого спейсера на основе пенополиуретана, импрегнированного антибактериальными препаратами, заранее подобранными в соответствии с микробным пейзажем пациента.

За счет свойств материала (увеличивается в объеме при низкотемпературной полимеризации, продолжающейся в течение 20 мин.) удалось заполнить все свободные участки костной полости, обеспечить гемотампонаду костной раны и создать повышенную концентрацию антибактериального препарата в остеомиелитическом очаге. В завершение хирургического вмешательства операционную рану герметично ушили, установили временную дренажную систему.

В послеоперационном периоде проводили этиотропную антибактериальную терапию (Цефтазидим 2,0 в сут., в течение 20 дн.), медикаментозную коррекцию показателей гомеостаза, в соответствии с традиционной схемой лечения больных хроническим остеомиелитом, местный уход за раной.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Послеоперационный период протекал благоприятно, на 14-ые сутки выполнено удаление швов с послеоперационной раны, а спустя 20 дней больной выписан на амбулаторное наблюдение у хирурга по месту жительства.

На дистанционном контроле спустя 12 мес. после лечения достигнутый результат сохраняется (рис. 1, в), больной ходит с полной нагрузкой на оперированную конечность, без использования средств дополнительной опоры, рецидива гнойно-воспалительного процесса не отмечено.

ОБСУЖДЕНИЕ

По данным мировой литературы, в современной практике лечения больных с полостной формой хронического остеомиелита (III тип по Cierny – Mader) наибольшее распространение получил биоинертный полимер (полиметилметакрилат). Существует два варианта его применения: одноэтапный и двухэтапный. Одноэтапный подход лечения подразумевает имплантацию антибактериального носителя без последующего его удаления в случае ликвидации гнойного процесса. Следует отметить осложнения, возникающие вследствие применения такой тактики: остеолит параимплантной зоны, развитие болевого синдрома, рецидив гнойно-воспалительного процесса с формированием биопленок на спейсере. Двухэтапная технология лечения предполагает имплантацию антибактериального носителя на непродолжительный срок (до 2–4 мес.) с последующим его удалением и заполнением сформировавшегося дефекта ауто-, алло-, ксенотрансплантатами, биодеградируемыми материалами и т.д. Спейсер в данном случае за счет реакции на инородное тело (спейсер) не допускает прорастания фиброзной ткани в зоне костного дефекта и индуцирует развитие окружающей псевдосиновиальной мембраны (эффект Masquelet) [11–19].

Описанные в литературе [20–23] и выявленные нами в ходе исследования частично биорезорбируемого остеозамещающего материала свойства следующие: заполнение всего пространства костного дефекта за счет расширения в период полимеризации, сохранение опорной функции пораженного сегмента вследствие адгезии к окружающим тканям, возможность использования термостабильных антибактериальных препаратов.

Дальнейшее изучение совместимости биорезорбируемого материала и антибактериальных препаратов с анализом сроков и эффективности воздействия на лабораторную микрофлору является перспективным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленное клиническое наблюдение демонстрирует успешный опыт применения частично биорезорбируемого остеозамещающего материала в качестве спейсера при одноэтапном лечении большого с хроническим, длительно протекающим остеомиелитом (III тип по Cierny – Mader).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Не заявлен.

Этическая экспертиза. Исследование проведено в соответствии с этическими стандартами и нормами законодательства РФ.

Информированное согласие. Пациент дал информированное согласие на участие в исследовании и публикацию данных.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Винник Ю.С., Шишацкая Е.И., Маркелова Н.М. и др. Применение биодеградируемых полимеров для замещения костных полостей при хроническом остеомиелите. *Вестник экспериментальной и клинической хирургии*. 2013;6(1):51–57. doi: 10.18499/2070-478X-2013-6-1-51-57.
2. Губин А.В., Ключин Н.М. Проблемы организации лечения больных хроническим остеомиелитом и пути их решения на примере создания клиники гнойной остеологии. *Гений ортопедии*. 2019;25(2):140–148. doi: 10.18019/1028-4427-2019-25-2-140-148.
3. Конев В.А., Божкова С.А., Нетьлько Г.И. и др. Результаты применения фосфомицина для импрегнации остеозамещающих материалов при лечении хронического остеомиелита. *Травматология и ортопедия России*. 2016;22(2):43–56. doi: 10.21823/2311-2905-2016-0-2-43-56.
4. Morelli I, Drago L, George DA, et al. Masquelet technique: myth or reality? A systematic review and meta-analysis. *Injury*. 2016;47 Suppl 6:S68–S76. doi: 10.1016/S0020-1383(16)30842-7.
5. Дзюба Г.Г., Резник Л.Б., Ерофеев С.А., Одарченко Д.И. Эффективность использования локальных цементных армирующих антибактериальных имплантов в комплексе оперативного лечения больных хроническим остеомиелитом длинных костей. *Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова*. 2016;(5):31–36. doi:10.17116/hirurgia2016531-36.
6. Пугаев Э.М., Кондратенко А.А., Кривенцов А.В. Возможные стратегии остеопластики длинных трубчатых костей. *Известия Российской военно-медицинской академии*. 2020;39(S3-5):114–117.
7. Bor N, Dujovny E, Rinat B, et al. Treatment of chronic osteomyelitis with antibiotic-impregnated polymethyl methacrylate (PMMA) – the Cierny approach: is the second stage necessary? *BMC Musculoskelet Disord*. 2022;23(1):38. doi: 10.1186/s12891-021-04979-y.
8. Штофин А.С., Щеголев М.Б., Трушин П.В. и др. К выбору пломбирующего секвестральную полость материала у больных хроническим остеомиелитом. *Acta biomedica scientifica*. 2017;2(6):76–81. doi: 10.12737/article_5a0a8717eae886.30878537.
9. Taylor BC, Hancock J, Zitzke R, Castaneda J. Treatment of Bone Loss With the Induced Membrane Technique: Techniques and Outcomes. *J Orthop Trauma*. 2015;29(12):554–557. doi: 10.1097/BOT.0000000000000338.
10. Борзунов Д.Ю., Гильманов Р.Т. Перспективные костно-пластические материалы и хирургические технологии при реконструктивно-восстановительном лечении больных с псевдоартрозами и дефектами костной ткани. *Гений ортопедии*. 2024;30(2):263–272. doi: 10.18019/1028-4427-2024-30-2-263-272.
11. Osaki T, Hasegawa Y, Tamura R, et al. Combined treatment using cross-leg free flap and the Masquelet technique: a report of two cases. *Case Reports Plast Surg Hand Surg*. 2022;9(1):99–104. doi: 10.1080/23320885.2022.2039667.
12. Klein C, Monet M, Barbier V, et al. The Masquelet technique: Current concepts, animal models, and perspectives. *J Tissue Eng Regen Med*. 2020;14(9):1349–1359. doi: 10.1002/term.3097.
13. Masquelet A, Kanakaris NK, Obert L, et al. Bone Repair Using the Masquelet Technique. *J Bone Joint Surg Am*. 2019;101(11):1024–1036. doi: 10.2106/JBJS.18.00842.
14. Andrzejowski P, Masquelet A, Giannoudis PV. Induced Membrane Technique (Masquelet) for Bone Defects in the Distal Tibia, Foot, and Ankle: Systematic Review, Case Presentations, Tips, and Techniques. *Foot Ankle Clin*. 2020;25(4):537–586. doi: 10.1016/j.fcl.2020.08.013.

15. Toth Z, Roi M, Evans E, et al. Masquelet Technique: Effects of Spacer Material and Micro-topography on Factor Expression and Bone Regeneration. *Ann Biomed Eng*. 2019;47(1):174-189. doi: 10.1007/s10439-018-02137-5.
16. Li Z, Tang S, Wang J, et al. Masquelet technique combined with tissue flap grafting for treatment of bone defect and soft tissue defect. *Zhongguo Xiu Fu Chong Jian Wai Ke Za Zhi*. 2016;30(8):966-970. (In Chin.) doi: 10.7507/1002-1892.20160196.
17. Mathieu L, Mourtialon R, Durand M, et al. Masquelet technique in military practice: specificities and future directions for combat-related bone defect reconstruction. *Mil Med Res*. 2022;9(1):48. doi: 10.1186/s40779-022-00411-1.
18. Ren C, Li M, Ma T, et al. A meta-analysis of the Masquelet technique and the Ilizarov bone transport method for the treatment of infected bone defects in the lower extremities. *J Orthop Surg (Hong Kong)*. 2022;30(2):10225536221102685. doi: 10.1177/10225536221102685.
19. Ступина Т.А., Дюрягина О.В., Моховиков Д.С. и др. Гистоморфометрические изменения синовиальной оболочки коленного сустава при комбинированном применении несвободной костной пластики по Илизарову и технологии Masquelet (экспериментальное исследование). *Гений ортопедии*. 2021;27(2):249-253. doi: 10.18019/1028-4427-2021-27-2-249-253.
20. Щербаков Д.А., Красножен В.Н., Покровская Е.М. Восстановление крючковидного отростка решетчатой кости биоматериалом "Рекост". *Практическая медицина*. 2019;17(1):64-66. doi: 10.32000/2072-1757-2019-1-64-66.
21. Колмогоров Ю.Н., Успенский И.В., Маслов А.Н. и др. Костнозамещающие имплантаты из материала «рекост-м» на основе 3d-моделирования для закрытия посттравматических дефектов черепа: доклинические и клинические исследования. *Современные технологии в медицине*. 2018;10(3):95-103. doi: 10.17691/stm2018.10.3.11.
22. Смоленцев Д.В., Лукина Ю.С., Бионисhev-Абрамов Л.Л. и др. Модели создания гнойно-септического воспаления большеберцовой кости у крысы для оценки действия биорезорбируемых материалов с антимикробными препаратами. *Гений ортопедии*. 2023;29(2):190-203. doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-2-190-203.
23. Афанасьев А.В., Божкова С.А., Артюх В.А. и др. Применение синтетических заменителей костной ткани при одноэтапном лечении пациентов с хроническим остеомиелитом. *Гений ортопедии*. 2021;27(2):232-236. doi: 10.18019/1028-4427-2021-27-2-232-236.

Статья поступила 13.05.2024; одобрена после рецензирования 03.12.2024; принята к публикации 10.12.2024.

The article was submitted 13.05.2024; approved after reviewing 03.12.2024; accepted for publication 10.12.2024.

Информация об авторах:

Анатолий Сергеевич Судницын — кандидат медицинских наук, заведующий лабораторией, врач — травматолог-ортопед, anatol_anatol@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2602-2457>;

Александр Леонидович Шастов — кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, врач — травматолог-ортопед, alshastov@yandex.ru;

Николай Михайлович Ключин — доктор медицинских наук, главный специалист, врач — травматолог-ортопед, klyushin_nikolay@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1601-9713>;

Гаджи-Мурад Хабибович Рашидов — врач — травматолог-ортопед, Rashidovg@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-2513-1199>.

Information about the authors:

Anatoliy S. Sudnitsyn — Candidate of Medical Sciences, Head of Laboratory, orthopaedic surgeon, anatol_anatol@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2602-2457>;

Alexander L. Shastov — Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher, orthopaedic surgeon, alshastov@yandex.ru;

Nikolay M. Klushin — Doctor of Medical Sciences, Chief Specialist, orthopaedic surgeon, klyushin_nikolay@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1601-9713>;

Gadji-Murad Kh. Rashidov — orthopaedic surgeon, Rashidovg@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-2513-1199>.



Замещение тотального дефекта таранной кости с использованием индивидуального 3D-имплантата из пористого титана при нейроостеоартропатии Шарко у пациентки с нейросифилисом

С.А. Оснач¹✉, В.Г. Процко^{1,2}, В.Н. Оболенский^{3,4}, А.В. Мазалов¹, В.Б. Бреговский⁵, В.В. Кузнецов¹, С.К. Тамоев¹

¹ Городская клиническая больница им. С.С. Юдина, Москва, Россия

² Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия

³ Городская клиническая больница № 13 ДЗ г. Москвы, Москва, Россия

⁴ Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова, Москва, Россия

⁵ Территориальный диабетологический центр, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Станислав Александрович Оснач, stas-osnach@yandex.ru

Аннотация

Введение. Нейропатическая артропатия, или артропатия Шарко, характеризуется быстро прогрессирующей деструкцией костей на фоне нарушения ноцицептивной и проприоцептивной иннервации пораженной конечности. В последние годы появились публикации о применении 3D-моделирования и 3D-печати имплантатов из пористого титана для замещения крупных костных дефектов в области стопы, но нами найдено всего два описания клинических случаев применения 3D-имплантатов из пористого титана у пациентов с артропатией Шарко.

Цель работы — продемонстрировать и проанализировать результаты выполнения резекционного пяточно-большеберцового артродеза с пластикой дефекта индивидуальным 3D-имплантатом из пористого титана у пациентки с манифестацией артропатии Шарко как осложнения третичного сифилиса.

Материалы и методы. Женщина 50 лет, с сифилисом в анамнезе в течение 26 лет, через 2 мес. после выполнения тотального эндопротезирования левого коленного сустава отметила появление признаков воспаления в области голеностопного сустава во время увеличения нагрузки. По данным обследования выявлено тотальное разрушение таранной кости, установлен диагноз: нейроостеоартропатия Шарко стопы, активная стадия. Через 2,5 мес. разгрузки по результатам проведенного КТ-исследования левого голеностопного сустава выполнено 3D-моделирование и изготовлен индивидуальный 3D-имплантат из пористого титана. Пациентке произведен резекционный пяточно-большеберцовый артродез с забором аутооттрансплантата из канала большеберцовой кости и пластикой дефекта 3D-имплантатом, осуществлена фиксация аппаратом Илизарова. Через 5 мес. после операции выполнен демонтаж аппарата Илизарова.

Результаты. В отдаленном периоде наблюдений, по данным контрольных рентгенограмм, наступила консолидация.

Обсуждение. Предлагаемый способ оперативного лечения при тотальном разрушении таранной кости и образующемся вследствие этого дефект-диастазе позволяет произвести реконструктивное вмешательство с одномоментной компенсацией укорочения, вне зависимости от формы и величины дефекта, избежать вторичного укорочения конечности с сохранением ее опороспособности, тем самым, предупреждая возникновение вторичных перегрузочных изменений в смежных суставах. Требуются дополнительные исследования для уточнения показаний к применению данного метода и определения критериев отбора пациентов.

Заключение. В клиническом наблюдении результаты применения метода резекционного пяточно-большеберцового артродеза с пластикой дефекта индивидуальным 3D-имплантатом из пористого титана представляются обнадеживающими.

Ключевые слова: артропатия Шарко, тотальный дефект таранной кости, индивидуальный 3D-пористый титановый имплантат, резекционный пяточно-большеберцовый артродез

Для цитирования: Оснач С.А., Процко В.Г., Оболенский В.Н., Мазалов А.В., Бреговский В.Б., Кузнецов В.В., Тамоев С.К. Замещение тотального дефекта таранной кости с использованием индивидуального 3D-имплантата из пористого титана при нейроостеоартропатии Шарко у пациентки с нейросифилисом. *Гений ортопедии*. 2025;31(1):66-73. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-66-73.

Clinical case

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-1-66-73>



Management of a total defect of the talus with a customized 3D-implant made of porous titanium for Charcot neuroosteoarthropathy in a patient with neurosyphilis: a case report

S.A. Osnach^{1✉}, V.G. Protsko^{1,2}, V.N. Obolensky^{3,4}, A.V. Mazalov¹, V.B. Bregovsky⁵, V.V. Kuznetsov¹, S.K. Tamoev¹

¹ Yudin City Clinical Hospital, Moscow, Russian Federation

² Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russian Federation

³ City Clinical Hospital No. 13, Moscow, Russian Federation

⁴ Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russian Federation

⁵ SPb Territorial Diabetology Center, St. Petersburg, Russian Federation

Corresponding author: Stanislav A. Osnach, stas-osnach@yandex.ru

Abstract

Introduction Neuropathic arthropathy, or Charcot arthropathy, is characterized by rapid progressive bone destruction due to impaired nociceptive and proprioceptive innervation of the affected limb. In recent years, there have been publications on the use of 3D modeling and 3D printing of porous titanium implants for filling large bone defects in the foot, but we found only two descriptions of clinical cases of 3D porous titanium implants in patients with Charcot arthropathy.

The **aim** of the work is to demonstrate and analyze the results of performing resection calcaneotibial arthrodesis with defect plasty using a customized 3D implant made of porous titanium in a patient with manifestation of Charcot arthropathy as a complication of tertiary syphilis.

Materials and methods A 50-year-old woman, with a history of syphilis for 26 years, noted the signs of inflammation in the ankle joint during increased loading two months after total knee arthroplasty on the left joint. The examination revealed total destruction of the talus. The diagnosis was Charcot neuroosteoarthropathy of the foot, active stage. After 2.5 months of unloading, based on the results of a CT study of the left ankle joint and 3D modeling, a 3D porous titanium customized implant was fabricated; resection calcaneotibial arthrodesis with autograft harvesting from the tibial canal and plastic surgery of the defect with a 3D implant and fixation with the Ilizarov apparatus were performed. Five months after the operation, consolidation was determined based on the results of control radiographs, and the Ilizarov apparatus was dismantled.

Discussion The proposed method of surgical treatment for total destruction of the talus and the resulting defect-diastasis allows for reconstructive intervention with immediate compensation of shortening, regardless of the shape and size of the defect, to avoid secondary shortening of the limb while maintaining its ability to support, thereby preventing the occurrence of secondary overload changes in the adjacent joints.

Conclusion The initial results in this clinical case seem encouraging, but additional research is required to clarify the indications and patient selection criteria for this treatment method.

Keywords: Charcot arthropathy, total defect of the talus, 3D porous titanium customized implant, resection calcaneotibial arthrodesis

For citation: Osnach SA, Protsko VG, Obolensky VN, Mazalov AV, Bregovsky VB, Kuznetsov VV, Tamoev SK. Management of a total defect of the talus with a customized 3D-implant made of porous titanium for Charcot neuroosteoarthropathy in a patient with neurosyphilis: a case report. *Genij Ortopedii*. 2025;31(1):66-73. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-66-73.

ВВЕДЕНИЕ

Нейропатическая артропатия, или артропатия Шарко, характеризуется быстро прогрессирующей деструкцией костей на фоне тяжелого нарушения ноцицептивной и проприоцептивной иннервации пораженной конечности. Jean-Martin Charcot в 1868 г. выявил взаимосвязь между поражением спинного мозга (tabes dorsalis), формой третичного нейросифилиса, которая может развиваться от месяцев до десятилетий после первоначального заражения пациента, и специфической деформацией стопы, в основе которой лежит асептическая деструкция ее костно-суставного аппарата и/или голеностопного сустава [1]. В настоящее время наиболее часто артропатия Шарко встречается у больных сахарным диабетом [2]. Известны случаи развития артропатии Шарко и при других поражениях периферической и центральной нервной системы, при этом на современном этапе развития общества и здравоохранения сифилитическая этиология артропатии встречается достаточно редко [3].

Нейроостеоартропатия Шарко может приводить к некрозу и патологическому разрушению костной ткани голеностопного сустава, в том числе таранной кости, в связи с чем эндопротезирование голеностопного сустава в данном случае недопустимо [4]. Также наличие движений и нагрузки в пораженной области является триггером, обостряющим патологический процесс. Поэтому одним из основных компонентов лечения является исключение нагрузки на пораженный сегмент и иммобилизация, достигаемые при консервативном лечении с помощью полимерных индивидуальных разгрузочных повязок ТСС (англ.: Total Contact Cast) или различных ортезов, при оперативном лечении — с использованием различных вариантов артродезирования суставов [5, 6].

Вопрос замещения тотальных дефектов таранной кости при проведении реконструктивных оперативных вмешательств всегда стоял остро. Поиск материалов для замещения обширных дефектов приводил к пластике последних имплантатами из пористого титана или никелид-титана [7–10], применяли имплантаты разных форм, как с полостями для интеграции гетеротопического аутотрансплантата, так и без них.

С 2015 г. с развитием 3D-моделирования и 3D-печати из пористого титана начали появляться публикации о внедрении данной технологии в области хирургии стопы. Применение индивидуальных имплантов додекаэдрической формы ознаменовало новое направление в замещении дефектов заднего отдела стопы [11, 12]. Однако, несмотря на рост числа публикаций на эту тему, в литературе нами найдено всего два описания клинических случаев о применении 3D-имплантатов из пористого титана у пациентов с артропатией Шарко [13, 14]. Поиск в электронном ресурсе PubMed (ключевые слова — neuropathic arthropathy; syphilis) показал, что за последние 15 лет опубликовано лишь 10 наблюдений о развитии артропатии Шарко различных суставов как осложнения третичного сифилиса. Тем не менее, исходя из анализа опубликованных клинических случаев и обзоров литературы, можно предположить, наиболее частой локализацией артропатии при третичном сифилисе является коленный сустав [3, 15].

Цель работы — продемонстрировать и проанализировать результаты выполнения резекционного пяточно-большеберцового артродеза с пластикой дефекта индивидуальным 3D-имплантатом из пористого титана у пациентки с манифестацией артропатии Шарко как осложнения третичного сифилиса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Женщина 50 лет, без сахарного диабета, ИМТ — 22 кг/м²; в анамнезе — впервые диагностированный сифилис в 1997 г., лечилась курсом пеницилина, повторный курс антибиотикотерапии — в 2008 г., после этого специфическую терапию не получала. В анализах от 31.03.2016: РМП 4+, РПГА 4+, ИФА + 10,9; от 11.08.2016: РМП 2+, РПГА 4+, ИФА 10,9; от 23.03.2020: РМП +1, РПГА 4+, ИФА 13,3. Состоит на учете в кожно-венерологическом диспансере по месту жительства. Контрольный анализ от 21.09.2023: Syphilis RPR (+) в титре 1:2.

За 2 мес. до обращения выполнено тотальное эндопротезирование левого коленного сустава по поводу артроза 3 степени. Во время реабилитации после увеличения продолжительности ходьбы с помощью костылей и нагрузки на левую нижнюю конечность отметила появление отека, незначительную локальную гипертермию и гиперемию в области левого голеностопного сустава и стопы. Болевая чувствительность при пассивных и активных движениях отсутствовала. Травмы отрицала. Амбулаторно выполнено КТ-исследование левого голеностопного сустава, выявлен патологический перелом и деструкция таранной кости с ее фрагментацией и смещением фрагментов.

По результатам исследования пациентка консультирована в Центре хирургии стопы и диабетической стопы ГКБ им. С.С. Юдина, госпитализирована. При первичном осмотре: стопа и голень отечны, умеренная гиперемия в области левого голеностопного сустава (рис. 1). По данным лабораторных исследований отмечено увеличение скорости оседания эритроцитов (СОЭ по Панченкову) — 42 мм/ч; количество лейкоцитов в общем анализе крови — $7,6 \times 10^9/\text{л}$; уровень С-реактивного белка — 6,52 мг/л.

При рентгенографии выявлено разрушение подтаранного сустава, соответствующее 2 стадии по классификации Eichenholtz [16–18]. При магнитно-резонансной томографии подтверждены масштабы поражения, а также выявлен отек костного мозга ладьевидной и большеберцовой костей и явления синовита сопряженных суставов (рис. 2).



Рис. 1. Внешний вид конечности при первичном осмотре, отмечены плотный отек и гиперемия стопы, голеностопного сустава и голени



Рис. 2. Рентгенограмма и МРТ голеностопного сустава и стопы при поступлении: а — на рентгенограмме видны нечеткие края остеодеструкции и облаковидные очаги остеопротекции; б — на МРТ в режиме жироподавления — выраженный отек костного мозга таранной кости, ладьевидной, головки большеберцовой кости и пяточной кости, деструкция таранной, пяточной и в меньшей степени ладьевидной костей

Установлен диагноз: Нейроостеоартропатия Шарко левой стопы с поражением голеностопного и подтаранного суставов, стадия 2 по классификации Eichenholtz, варусная деформация [19].

После осмотра выполнено наложение задней гипсовой иммобилизирующей повязки от пальцев стопы до верхней трети голени, разрешена ходьба без нагрузки на левую ногу с помощью костылей. В дальнейшем осуществлялось амбулаторное наблюдение пациентки в ГКБ им. С.С. Юдина.

Через 2,5 мес. после иммобилизации конечности с помощью гипсовой повязки и разгрузки посредством дополнительных средств опоры пациентка госпитализирована в ГКБ им. С.С. Юдина. По результатам КТ-исследования левого голеностопного сустава выполнено 3D-моделирование индивидуального имплантата с учетом необходимости замещения костного дефекта. По 3D-модели изготовлен индивидуальный 3D-имплантат из пористого титана (рис. 3).

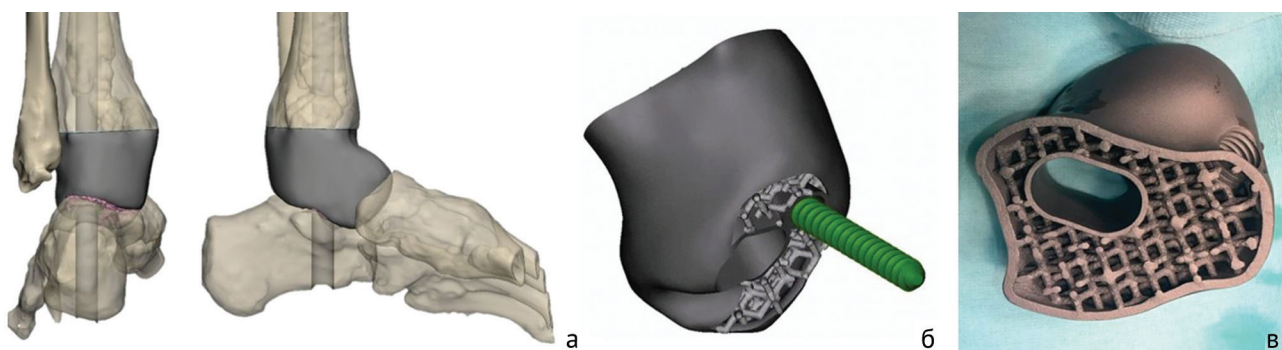


Рис. 3. Модель расположения имплантата в голеностопном суставе (а); 3D-модель (б) и внешний вид (в) имплантата

Интраоперационно выявлена деструкция таранной кости левой стопы, произведено удаление ее фрагментов, суставных поверхностей пяточной и большеберцовой костей. Далее системой RIA (англ.: Reamer Irrigator Aspirator) произведен забор аутотрансплантата из канала большеберцовой кости ретроградным доступом (рис. 4). После выведения стопы в нормокоррекцию произведена пластика дефекта, образованного после удаления таранной кости, индивидуальным 3D-имплантатом из пористого титана с предварительной интеграцией костного аутотрансплантата в межбалочное пространство и фиксация аппаратом Илизарова [7, 19].

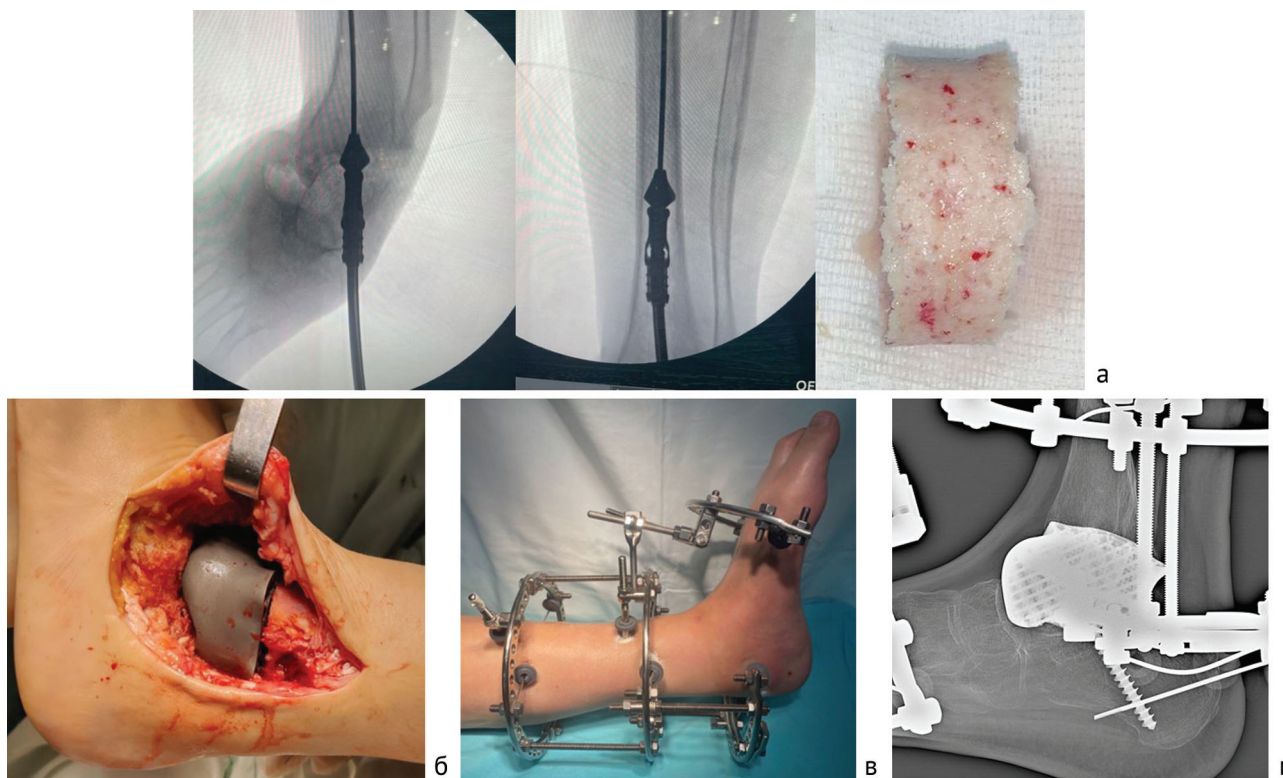


Рис. 4. Этапы хирургического вмешательства: с помощью системы RIA произведен забор аутотрансплантата из канала большеберцовой кости (а); расположение 3D-пористого титанового индивидуального имплантата (б); фиксация аппаратом Илизарова, окончательный вид стопы и голеностопного сустава после операции (в); рентгенограмма стопы и голеностопного сустава после операции (г)

После выписки на 12-е сут. пациентка наблюдалась амбулаторно; швы сняты через 6 нед. Этапную поддерживающую компрессию в аппарате проводили ежемесячно по 1 мм. Через 5 мес. после операции по результатам контрольных рентгенограмм и компьютерной томографии определены перестройка костного трансплантата в межбалочном пространстве имплантата, отсутствие явлений лизиса и нестабильности импланта. В плановом порядке выполнен демонтаж аппарата Илизарова (рис. 5).

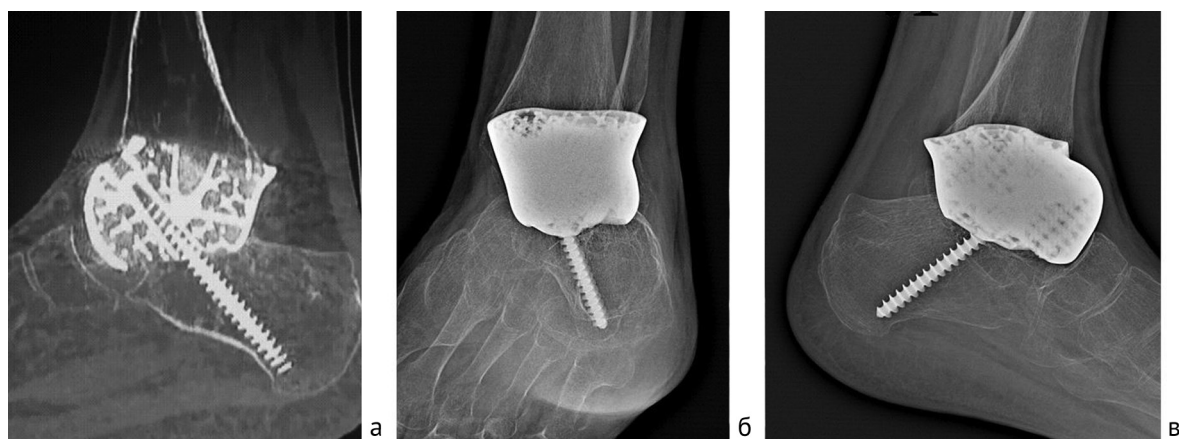


Рис. 5. Результаты лечения: КТ-снимок после демонтажа аппарата с явлениями костной перестройки (а); контрольные рентгенограммы голеностопного сустава (б) и стопы (в) через полгода после операции

В дальнейшем в течение 6 мес. разгрузку левого голеностопного сустава осуществляли с помощью индивидуальной полимерной разгрузочной повязки. Пациентку активизировали с помощью дополнительных средств опоры с дозированной нагрузкой на оперированную нижнюю конечность до 20 % от веса с последующим постепенным ее увеличением до полной нагрузки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На контрольном осмотре через 10 мес. клинически и рентгенологически ранней нестабильности компонентов эндопротеза и 3D-пористого титанового имплантата не наблюдали (рис. 6). Пациентка ходит без использования средств дополнительной опоры в ортопедической диабетической обуви с индивидуальными ортопедическими стельками.

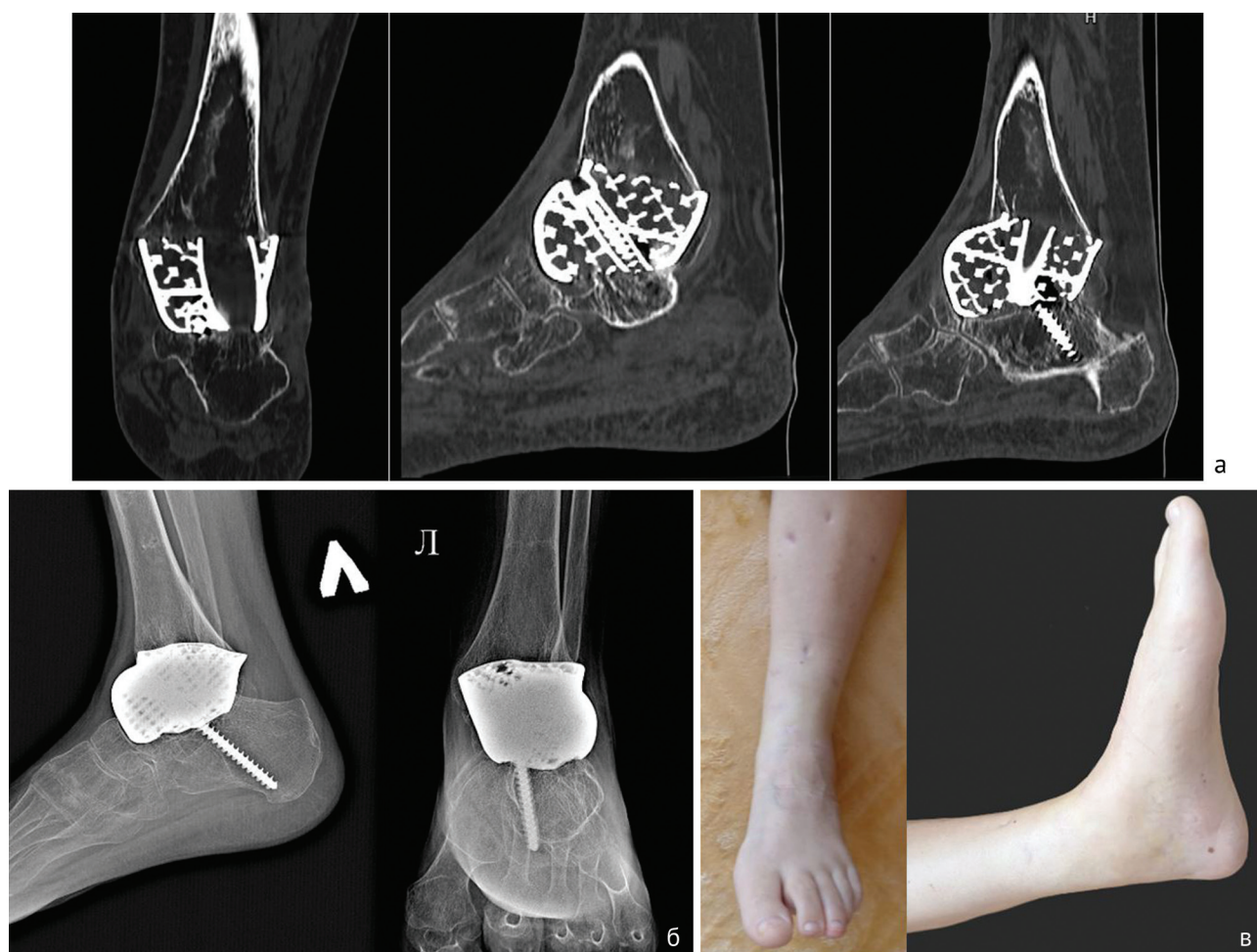


Рис. 6. КТ-срезы (а); рентгенограммы (б) и фото стопы (в) через 10 мес. после демонтажа аппарата

ОБСУЖДЕНИЕ

Данный клинический случай демонстрирует необходимость тщательного сбора анамнеза и предоперационного обследования для верификации сопутствующих заболеваний и связанных с ними возможных осложнений.

Консервативные методы до сих пор являются преобладающими в лечении диабетической нейроостеоартропатии, но не могут быть применимы для пациентов с полным или частичным нарушением опорной функции стопы, что, в свою очередь, существенно увеличивает актуальность ортопедической реконструкции [20].

Данный способ оперативного лечения используют при тотальном разрушении таранной кости и образующем вследствие этого дефект-диастезе в процессе выполнения резекционного пяточно-большеберцового артродеза. Способ позволяет произвести реконструктивное вмешательство с одномоментной и точной компенсацией укорочения, вне зависимости от формы и величины дефекта, избежать вторичного укорочения конечности с сохранением ее опороспособности, тем самым профилируя возникновение вторичных перегрузочных изменений в смежных суставах. Вместе с тем, одной из клю-

чевых задач ортопедического лечения пациентов с нейроостеоартропатией Шарко является снижение риска высокой ампутации и сохранение двигательной активности пациента. Проведение стабилизации стопы аппаратом внешней фиксации является фактором, способствующим стиханию процесса и, как следствие, положительно влияет на состоятельность выполняемого артродеза. Следует также отметить, что результат проводимого лечения во многом зависит от комплаентности и приверженности к лечению пациента, а также соблюдению им назначений и рекомендаций [21].

Для уточнения показаний к данному методу лечения и критериев отбора пациентов требуется увеличение группы пациентов и проведение дополнительных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполнения резекционного пяточно-большеберцового артродеза с пластикой дефекта 3D-пористым титановым индивидуальным имплантатом, продемонстрированные у пациентки с манифестацией артропатии Шарко как осложнения третичного сифилиса, являются обнадеживающими. Учитывая персонализированный подход, данный метод представляется перспективной концепцией лечения, позволяющей восстановить опороспособность нижней конечности без ее укорочения.

Конфликт интересов. Не заявлен.

Источник финансирования. Не заявлен.

Этическая экспертиза. Исследование проведено в соответствии с этическими стандартами и нормами законодательства РФ.

Информированное согласие. Пациентка дала письменное информированное согласие на участие в исследовании и публикацию данных.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Charcot JM. On some arthropathies which seem to depend on a lesion of the brain or spinal cord. *Arch Physiol Norm Pathol*. 1868;1:161-178. (in French).
2. Rogers LC, Frykberg RG, Armstrong DG, et al. The Charcot foot in diabetes. *Diabetes Care*. 2011;34(9):2123-2129. doi: 10.2337/dc11-0844.
3. Wang M, Huang R, Wang L, et al. Syphilis with Charcot arthropathy: A case report. *Dermatol Ther*. 2019;32(3):e12862. doi: 10.1111/dth.12862.
4. Bonasia DE, Dettoni F, Femino JE, et al. Total ankle replacement: why, when and how? *Iowa Orthop J*. 2010;30:119-130.
5. Klaue K, Zwipp H, Mittlmeier T, Espinosa N. Internal circular arc osteosynthesis of tibiototalcalcaneal arthrodesis. *Unfallchirurg*. 2016;119(10):885-9. (In German). doi: 10.1007/s00113-016-0210-4.
6. Belczyk RJ, Rogers LC, Andros G, et al. External fixation techniques for plastic and reconstructive surgery of the diabetic foot. *Clin Podiatr Med Surg*. 2011;28(4):649-660. doi: 10.1016/j.cpm.2011.07.001.
7. Kreulen C, Lian E, Giza E. Technique for Use of Trabecular Metal Spacers in Tibiototalcalcaneal Arthrodesis With Large Bony Defects. *Foot Ankle Int*. 2017;38(1):96-106. doi: 10.1177/1071100716681743.
8. Henricson A, Rydholm U. Use of a trabecular metal implant in ankle arthrodesis after failed total ankle replacement. *Acta Orthop*. 2010;81(6):745-747. doi: 10.3109/17453674.2010.533936.
9. Long WJ, Scuderi GR. Porous tantalum cones for large metaphyseal tibial defects in revision total knee arthroplasty: a minimum 2-year follow-up. *J Arthroplasty*. 2009;24(7):1086-1092. doi: 10.1016/j.arth.2008.08.011.
10. Frigg A, Dougall H, Boyd S, Nigg B. Can porous tantalum be used to achieve ankle and subtalar arthrodesis?: a pilot study. *Clin Orthop Relat Res*. 2010;468(1):209-216. doi: 10.1007/s11999-009-0948-x.
11. Dekker TJ, Steele JR, Federer AE, et al. Use of Patient-Specific 3D-Printed Titanium Implants for Complex Foot and Ankle Limb Salvage, Deformity Correction, and Arthrodesis Procedures. *Foot Ankle Int*. 2018;39(8):916-921. doi: 10.1177/1071100718770133.
12. Bejarano-Pineda L, Sharma A, Adams SB, Parekh SG. Three-Dimensional Printed Cage in Patients With Tibiototalcalcaneal Arthrodesis Using a Retrograde Intramedullary Nail: Early Outcomes. *Foot Ankle Spec*. 2021;14(5):401-409. doi: 10.1177/1938640020920947.
13. Hsu AR, Ellington JK. Patient-Specific 3-Dimensional Printed Titanium Truss Cage With Tibiototalcalcaneal Arthrodesis for Salvage of Persistent Distal Tibia Nonunion. *Foot Ankle Spec*. 2015;8(6):483-489. doi: 10.1177/1938640015593079.
14. Wang G, Lin J, Zhang H, et al. Three-dimension correction of Charcot ankle deformity with a titanium implant. *Comput Assist Surg (Abingdon)*. 2021;26(1):15-21. doi: 10.1080/24699322.2021.1887356.
15. Lu V, Zhang J, Tahir A, et al. Charcot knee - presentation, diagnosis, management - a scoping review. *Clin Rheumatol*. 2021;40(11):4445-4456. doi: 10.1007/s10067-021-05775-8.
16. Eichenholtz SN. Charcot Joints. Springfield, IL, USA: Charles C. Thomas; 1966.
17. Shibata T, Tada K, Hashizume C. The results of arthrodesis of the ankle for leprotic neuroarthropathy. *J Bone Joint Surg Am*. 1990;72(5):749-756.
18. Chantelau EA, Richter A. The acute diabetic Charcot foot managed on the basis of magnetic resonance imaging--a review of 71 cases. *Swiss Med Wkly*. 2013;143:w13831. doi: 10.4414/sm.w.2013.13831.
19. Оснач С.А., Оболенский В.Н., Процко В.Г. и др. Метод двухэтапного лечения пациентов с тотальными и субтотальными дефектами стопы при нейроостеоартропатии Шарко. *Гений ортопедии*. 2022;28(4):523-531. doi: 10.18019/1028-4427-2022-28-4-523-531.
20. Wukich DK, Schaper NC, Gooday C, et al. Guidelines on the diagnosis and treatment of active Charcot neuro-osteoarthropathy in persons with diabetes mellitus (IWGDF 2023). *Diabetes Metab Res Rev*. 2024;40(3):e3646. doi: 10.1002/dmrr.3646.
21. Демина А.Г., Бреговский В.Б., Карпова И.А. Ближайшие результаты лечения активной стадии стопы Шарко в амбулаторных условиях. *Сахарный диабет*. 2020;23(4):316-323. doi: 10.14341/DM10363.

Статья поступила 21.10.2024; одобрена после рецензирования 30.10.2024; принята к публикации 10.12.2024.

The article was submitted 21.10.2024; approved after reviewing 30.10.2024; accepted for publication 10.12.2024.

Информация об авторах:

Станислав Александрович Оснач — врач — травматолог-ортопед, stas-osnach@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4943-3440>;

Владимир Николаевич Оболенский — кандидат медицинских наук, врач-хирург, врач — травматолог-ортопед, заведующий Центром гнойной хирургии, gkb13@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1276-5484>;

Вадим Борисович Бреговский — доктор медицинских наук, врач-эндокринолог, dfoot.tdc@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5285-8303>;

Василий Викторович Кузнецов — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, vkuznecovniito@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6287-8132>;

Алексей Витальевич Мазалов — врач — травматолог-ортопед, footdoctor@inbox.ru;

Саргон Константинович Тамоев — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, заведующий отделением, sargonik@mail.ru;

Виктор Геннадьевич Процко — доктор медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, руководитель Центра хирургии стопы и диабетической стопы, 89035586679@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5077-2186>.

Information about the authors:

Stanislav A. Osnach — orthopaedic surgeon, stas-osnach@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4943-3440>;

Vladimir N. Obolenskiy — Candidate of Medical Sciences, orthopaedic surgeon, Head of the Center for Purulent Surgery, gkb13@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1276-5484>;

Vadim B. Bregovskiy — Doctor of Medical Sciences, endocrinologist, dfoot.tdc@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5285-8303>;

Vasiliy V. Kuznetsov — Candidate of Medical Sciences, orthopaedic surgeon, vkuznecovniito@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6287-8132>;

Alexey V. Mazalov — orthopaedic surgeon, footdoctor@inbox.ru;

Sargon K. Tamoev — Candidate of Medical Sciences, orthopaedic surgeon, Head of the Department, sargonik@mail.ru;

Victor G. Protsko — Doctor of Medical Sciences, orthopaedic surgeon, Head of the Center for Foot and Diabetic Foot Surgery, 89035586679@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5077-2186>.



Эффективное сочетание методов артроскопической и малоинвазивной хирургии при хронической заднелатеральной нестабильности локтевого сустава

А.Е. Медведчиков^{1,2}, Е.А. Анастасиева^{1✉}, Б.А. Олейник², А.А. Симонян²,
Т.Е. Прокопович¹, И.А. Кирилова¹

¹ Новосибирский научно-исследовательский институт травматологии и ортопедии им. Я.Л. Цивьяна, Новосибирск, Россия

² Клинический госпиталь «MD Group Мичуринский» (ООО «ХАВЭН»), Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Евгения Андреевна Анастасиева, evgeniya.anastasieva@gmail.com

Аннотация

Введение. В результате травм и экстремальных физических нагрузок нередко возникают классические модели вывиха костей предплечья, которые составляют 10–25 % всех повреждений локтевого сустава у взрослого населения. Хорошие долгосрочные результаты устранения дислокации сустава после консервативного лечения неоднократно описаны, однако у 8 % пациентов наблюдаются симптомы хронической нестабильности. В данном клиническом наблюдении представлен случай успешного артроскопического лечения связочных стабилизаторов локтевого сустава с использованием эффективного сочетания имплантатов при его заднелатеральной модели нестабильности. В отечественной литературе нами не найдено публикаций о подобном опыте.

Цель работы — представление клинического случая эффективного сочетания методов артроскопической и малоинвазивной хирургии в объеме реконструкции связочного аппарата при хронической заднелатеральной нестабильности локтевого сустава.

Материалы и методы. Пациент Н., 31 г., с хронической заднелатеральной ротационной нестабильностью левого локтевого сустава после вывиха костей предплечья давностью более 10 лет. Оперативная методика основана на принципах малоинвазивной реконструктивно-пластической хирургии и отвечает задачам бережного отношения к мягким тканям, позволяя визуализировать повреждение и избежать контакта с нейро-вазальными структурами. Отражены исходные клинические тесты (O'Driscoll, Regan/Larner, Pollock), данные анкетирования по шкалам (VAS, DASH, MEPS, SF-36) и томограммы нарушения целостности динамических стабилизаторов на МРТ, 1,5 Тл. Оценку производили в двух контрольных точках (45 и 180 сут.).

Результаты. Первый контроль: сгибание/разгибание — 50/175°, пронация/супинация — 90/90°, VAS 2, DASH 24.2, MEPS — 80 баллов соответственно. Второй контроль: VAS 1, DASH 9.2, MEPS — 95 баллов, сравнительные амплитуды движений соответствовали здоровому суставу. МРТ-исследование подтвердило ход аутогенотрансплантата и лигаментизации сухожилия области реинсерции, отсутствие воспалительных изменений и гетеротопической оссификации.

Обсуждение. Совершенствование и прогресс хирургии ориентированы на малоинвазивные вмешательства, в то время как артроскопия локтевого сустава по-прежнему технически сложна из-за ограниченного пространства. И все же это эффективный метод лечения, в результате которого можно избежать широкого спектра осложнений (14,7 %), а пациенты быстрее, чем при открытых подходах хирургии с большим процентом рисков (52 %), могут приступить к реабилитации и, как следствие, выздороветь.

Заключение. Комбинация артроскопической и малоинвазивной хирургии в данном клиническом наблюдении позволила избежать конфликта с нейро-вазальными структурами, обеспечила визуальный контроль имплантации якорных фиксаторов.

Ключевые слова: локтевой сустав, артроскопическое лечение, вывих костей предплечья, спортивная медицина, заднелатеральная нестабильность, коллатеральные связки

Для цитирования: Медведчиков А.Е., Анастасиева Е.А., Олейник Б.А., Симонян А.А., Прокопович Т.Е., Кирилова И.А. Эффективное сочетание методов артроскопической и малоинвазивной хирургии при хронической заднелатеральной нестабильности локтевого сустава. *Гений ортопедии*. 2025;31(1):74-82. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-74-82.

Clinical case

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-1-74-82>



Effective combination of arthroscopic and minimally invasive surgery for chronic posterolateral elbow instability

A.E. Medvedchikov^{1,2}, E.A. Anastasieva^{1✉}, B.A. Oleynik², A.A. Simonyan²,
T.E. Prokopovich¹, I.A. Kyrilova¹

¹ Tsiv'yan Novosibirsk Research Institute of Traumatology and Orthopedics, Novosibirsk, Russian Federation

² Clinical Hospital MD Group Michurinsky, Moscow, Russian Federation

Corresponding author: Evgeniya A. Anastasieva, evgeniya.anastasieva@gmail.com

Abstract

Introduction Trauma and extreme physical activity may result in common patterns of forearm dislocation, which account for 10 to 25 % of all elbow injuries in the adult population. Good long-term results of eliminating joint dislocation with the use of conservative treatment have been much described, but 8 % of patients experience symptoms of chronic instability. We present a case of successful arthroscopic treatment of ligamentous stabilizers of the elbow joint using an effective combination of implants for its posterolateral instability. We found no publications on such an experience in the Russian literature.

The **purpose** of the work is to present a clinical case of an effective combination of arthroscopic and minimally invasive surgery methods for reconstruction of the ligamentous apparatus in chronic posterolateral instability of the elbow joint.

Material and methods Patient N., 31 years old, suffered chronic posterolateral rotational instability of the left elbow joint after dislocation of the forearm bones for more than 10 years. The operative technique was based on the principles of minimally invasive reconstructive plastic surgery and meets the objectives of gentle treatment of soft tissues, allowing visualization of the lesion and avoiding the contact with neuro-vascular structures. Baseline clinical tests (O'Driscoll, Regan/Lapner, Pollock), questionnaires (VAS, DASH, MEPS, SF-36), and MRI, 1.5 Tesla MRI scans of dynamic stabilizer disruption are reflected. Evaluation was performed at two control points (45 and 180 days).

Results The assessment was carried out at two control points. First follow-up (45 days): flexion/extension 50/175°, pronation/supination 90/90°, VAS 2, DASH 24.2, MEPS 80 points, respectively. Second follow-up (180 days): VAS 1, DASH 9.2, MEPS 95 points, comparative ranges of motion corresponded to a healthy joint. An MRI study confirmed the progress of the autotenograft and tendon ligamentization in the area of reinsertion, the absence of inflammatory changes and no heterotopic ossification.

Discussion Improvements in elbow surgery and technical progress are focused on minimally invasive interventions, while arthroscopy of the elbow joint is still technically difficult due to a limited space. And yet, this is an effective treatment method, as a result of which specialists can avoid a wide range of complications (14.7 %), and patients start rehabilitation faster and, as a result, recover faster than with open surgical approaches with a higher percentage of risks (52 %).

Conclusion The combination of the above techniques avoids conflict with neurovascular structures, provides visual control of the implantation of anchors and, as a result, reduces the overall risk of complications in the treatment of a rare group of patients with instability of the elbow joint.

Keywords: elbow joint, arthroscopic treatment, dislocation of the forearm bones, sports medicine, posterolateral elbow instability, collateral ligaments

For citation: Medvedchikov AE, Anastasieva EA, Oleynik BA, Simonyan AA, Prokopovich TE, Kyrilova IA. Effective combination of arthroscopic and minimally invasive surgery for chronic posterolateral elbow instability. *Genij Ortopedii*. 2025;31(1):74-82. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-74-82.

ВВЕДЕНИЕ

Локтевой сустав состоит из комплекса костных и связочных стабилизаторов, которые обеспечивают как механическое, так и динамическое ограничение вывиха костей предплечья. В результате травм и экстремальных физических нагрузок нередко возникают классические модели вывиха, которые составляют 10–25 % всех повреждений локтевого сустава у взрослого населения, в то время как заболеваемость составляет 7 случаев на 100 тыс. человек в год. Четверть этих состояний сопровождается переломом костных структур, составляющих локтевой сустав, в 60 % случаев вовлечена недоминантная конечность [1–4].

Падения на разогнутый локтевой сустав в результате низкоэнергетических травм являются наиболее частым механизмом вывиха костей предплечья (56,5 %) бытового характера и крайне редко происходят в результате занятий спортом (4 %) [1, 4]. Подобные дислокации в возрасте 10–19 лет чаще встречаются у мужчин (53 % к 47 % у женщин) и нередко сочетаются с травмами плечевого или лучезапястного суставов (10–15 %) [5]. Сообщается, что 6 из 58 (10 %) вывихов костей предплечья у детей требуют открытого варианта хирургии, и что интерпозиция внутрисуставными фрагментами медиального надмыщелка плечевой кости является наиболее распространенной причиной препятствий к вправлению [5, 6]. Результативность терапевтических мероприятий обусловлена знанием анатомии и биомеханики сустава так же, как и векторов силы, предшествовавшей первичному вывиху.

Классически выделяют три первичных статических стабилизатора: плечелоктевой сустав, передняя порция медиальной локтевой коллатеральной связки (МЛКС) и комплекс латеральной коллатеральной связки (КЛКС). К вторичным стабилизаторам можно отнести плечелучевой сустав, сухожилия групп мышц сгибателей и разгибателей кисти (*m. flexor carpi radialis et ulnaris*, *m. extensor carpi radialis longus et brevis* etc.), капсулу. Мышцы, которые пересекают локтевой сустав (*m. pronator teres*, *m. brachialis*, *m. anconeus* etc.), являются динамическими стабилизаторами. КЛКС обеспечивает варусную стабильность локтевого сустава, он представлен кольцевидной связкой, волокнами добавочной латеральной коллатеральной связки, локтевой латеральной коллатеральной связкой (ЛокЛКС) и лучевой коллатеральной связкой (ЛучКС). Антагонистом комплекса латеральной коллатеральной связки является МЛКС, которая состоит из передней косой, задней и поперечной порций (связка Cooper'a) [7].

На текущий момент определены три вида посттравматической нестабильности локтевого сустава, ассоциированные с механизмом травмы и нарушением анатомических структур [8]:

- заднелатеральная ротационная нестабильность (ЗЛРН) — развивается после повреждения КЛКС при падении на вытянутую руку и является наиболее распространенной (80 %);
- вальгусная нестабильность (ВН) — обусловлена травмой МЛКС циклического тракционного механизма, часто встречается у спортсменов, регулярно бросающих мяч;
- заднемедиальная варусная нестабильность (ЗМВН) — характерна для травм локтевого сустава, сопровождающихся повреждением связки совместно с переломом в области локтевой кости.

В диагностическом плане посттравматическую нестабильность локтевого сустава можно определить инструментальными методами визуализирующей диагностики и с помощью провокационных тестов. Динамический вальгус-стресс тест O'Driscoll на 100 % чувствителен и на 75 % специфичен для травм медиального стабилизирующего комплекса при ВН так же, как и латеральный pivot-shift тест, подходящий для ЗЛРН. W. Regan и P.C. Larner представили нагрузочный тест на отжимание и с упором на стул с чувствительностью 87,5 % (100 % при последовательном использовании обоих тестов) для выявления ЗЛРН [9]. Гравитационный стресс-тест Pollock наиболее чувствителен и специфичен для ЗМВН [1, 3]. Важно знать, что часть тестов может быть проведена только после развития у пациентов проводниковой или общей анестезии, в ином случае чувствительность не будет превышать 38 % и будет затруднена болевым синдромом.

КТ обладает чувствительностью 71–86 % и специфичностью 91 %, ее рутинно используют для оценки нарушения архитектуры костных стабилизаторов в модели вывиха костей предплечья, осложненного переломом. В аспектах хронической посттравматической нестабильности локтевого сустава провокация венечного отростка лучше всего видна при ВН [1, 3]. МРТ позволяет оценить структуры мягкотканых стабилизаторов, включая КЛКС/ЛокЛКС/МЛКС, и визуализировать костно-хрящевые фрагменты *trochlea humeri* или *fossa olecrani* [3, 6, 10]. Визуализация методом магнитного резонанса при выявлении ВН обладает чувствительностью 57–79 % и в 100 % специфична для повреждений структур связочного аппарата [1]. Рентгенография локтевого сустава в стандартных проекциях при данной нозологии не обладает высокой степенью специфичности, повысить которую возможно, задействовав ЭОП для динамической рентгеноскопии [1]. Метод позволяет отображать отрывные переломы, внутрисуставные хондральные тела или гетеротопические остеофиты отростков локтевой кости, являющиеся косвенными признаками посттравматической нестабильности локтевого сустава.

В академическом плане интерес представляют классификации Albert (1881 г.), Gui (1957 г.) и Morrey (1996 г.), однако, по мнению авторов, наиболее актуальными в практическом плане являются классификации O'Driscoll (2000 г.) и SICSeG (*англ.*: Italian Society of Shoulder and Elbow Surgery, 2015 г.) [11]. Классификация O'Driscoll определяет сложность вывиха костей предплечья и посттравматической нестабильности локтевого сустава по критериям: время, вовлеченные суставы, направление, степень, сопутствующие переломы. Классификация SICSeG разделяет патологию по типам: «А» — острая и «В» — хроническая (с травмой кости / кости и мягких тканей).

Неоднократно описаны хорошие долгосрочные результаты устранения вывиха костей предплечья после консервативного лечения, однако исход оказывается неудовлетворительным у 10 % пациентов, из которых 2 % требуется хирургическое вмешательство, и примерно у 8 % будут наблюдаться симптомы посттравматической нестабильности локтевого сустава [8, 12].

Совершенствование хирургии и технический прогресс ориентированы на малоинвазивные вмешательства, в то время как артроскопия локтевого сустава по-прежнему технически сложна из-за ограниченного пространства и близости нейро-вазальных структур. И все же это — эффективный метод лечения, в результате которого можно избежать широкого спектра осложнений: ятрогенная нейропатия (3,4 %), поверхностная и глубокая раневая инфекция (2,0 % и 0,7 % соответственно), осложнения заживления ран (1,5 %), контрактура и нестабильность сустава (4,5 % и 2,6 %), необходимость ревизионной хирургии (4,1 %). Пациенты смогут приступить к реабилитации и, как следствие, выздороветь быстрее, чем при открытых подходах хирургии (общий процент осложнений, — 52 %; туннельная и контузионная нейропатия локтевого и срединного нервов, псевдоартроз локтевого или венечного отростка, гетеротопические оссификации) [13–18]. Комплексных исследований последствий вывиха костей предплечья со значительным количеством случаев и большим объемом данных не проводили, и даже единичный эпизод представляет академический интерес.

Цель работы — представление клинического случая эффективного сочетания методов артроскопической и малоинвазивной хирургии в объеме реконструкции связочного аппарата при хронической заднелатеральной нестабильности локтевого сустава.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пациент Н., 31 года, в прошлом профессиональный сноубордист, обратился на амбулаторный прием травматолога-ортопеда в Новосибирский научно-исследовательский институт травматологии и ортопедии им. Я.Л. Цивьяна (ННИИТО) 03.11.2023 с жалобами на боль, заднелатеральную нестабильность левого локтевого сустава, акустические элементы («щелчки»), транзиторные блоки и мышечную слабость конечности. В анамнезе: первичная спортивная организованная травма (2006 г.): падение на распрямленную левую верхнюю конечность при выполнении спортивного элемента в half-pipe.

Экстренная медицинская помощь оказана за пределами РФ в течение суток, выполнена рентгенография левого локтевого сустава в двух проекциях и установлен диагноз: Свежий осложненный задний вывих костей левого предплечья с повреждением локтевой коллатеральной и медиальной коллатеральной связок локтевого сустава, ненапряженный гемартроз. Проведено ручное вправление под местной анестезией Sol. Novocaini 0,5 % 40 мл, без осложнений в виде дисконгруэнтности или переломов на контрольных рентгенограммах. В последующем зарегистрировано три эпизода вывиха костей предплечья (в 2011, 2018, 2023 гг.) с развитием хронической ЗЛРН левого локтевого сустава. Клинические тесты (без проводниковой анестезии): динамический вальгус-стресс тест O'Driscoll «+», O'Driscoll латеральный pivot-shift тест «-», Regan/Lapner «+», гравитационный стресс-тест Pollock «-». Морфометрия: сгибание/разгибание — 55/160°, пронация/супинация — 80/45°. Оценка силы механическим динамометром: Dex. 90; Sin. 65 (2daN). Учитывая противоречие адресных клинических тестов, выполнено инструментальное исследование в объеме МРТ 1,5 Тл локтевого сустава с выявлением повреждения области «анатомического оттиска» МЛКС/КЛКС (рис. 1). Дополнительно визуализированы дефект суставной поверхности trochlea humeri и fossa olecrani, интралигаментарная оссификация МЛКС с провокацией кортикального слоя медиального надмыщелка левой плечевой кости и КЛКС, экзостоз олекранона локтевой кости.

Анкетирование ортопедическими шкалами: VAS (*англ.*: Visual Analogue Scale) < 3, DASH (*англ.*: Disabilities of the Arm, Shoulder, and Hand) — 30.8, MEPS (*англ.*: Mayo Elbow Performance Score) — 45 баллов соответственно; SF-36 (*англ.*: 36-item Short Form Health Survey): физическое состояние — 25 %; ограничения по физическому здоровью — 0 %; ограничения из-за эмоциональных состояний — 0 %; энергия/усталость — 60 %; эмоциональное благополучие — 32 %; социализация — 50 %; боль — 45 %; общее состояние здоровья — 25 %; изменение здоровья — 25 %.

По классификации SICSeG — тип «В», рецидивирующая, кость + мягкие ткани; по классификации O'Driscoll — рецидивирующая, лучелоктевой/плечевой, ЗЛРН, подвывих, венечный отросток.

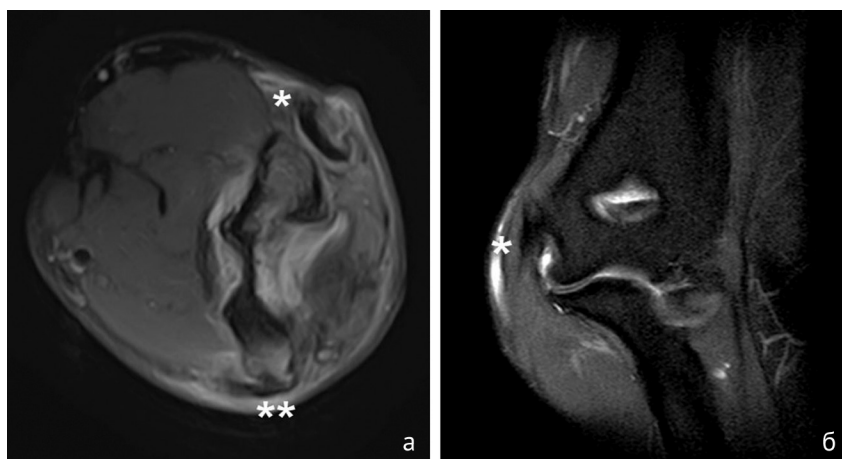


Рис. 1. Томограммы зоны интереса: посттравматическая нестабильность локтевого сустава левой верхней конечности в коронарном (а) и сагиттальном (б) срезах T1-взвешенного режима МРТ с измерением структур МЛКС (*) и ЛЛКС (**)

Anamnesis morbi: травма — бытовая, хроническая посттравматическая нестабильность локтевого сустава больше 17 лет, рука — левая, сторона — недоминантная.

В день госпитализации (03.11.2023) проведено лечение в объеме: артроскопия левого локтевого сустава, резекция патологических плечелучевых складок; удаление хондральных тел; реинсерция ЛучКС и ЛокЛКС; реконструкция МЛКС аутогенотрансплантатом расщепленной *m. peroneus longus*; реинсерция безтельными мягкотканными якорными фиксаторами; дебридмент.

Укладка пациента на ортопедическом столе в положении лежа на животе, с рукой, отведенной 90° в плечевом суставе и согнутой под 90° в локтевом суставе, в свешанном состоянии. Перед драпировкой операционного поля на уровне верхней трети плеча выполнено наложение пневматического турникета, нагнетание давления — 250 мм рт. ст. До использования инцизионной пленки проведена маркировка анатомических ориентиров (медиальный, латеральный надмыщелок левой плечевой кости, олекранон локтевой кости) с разметкой *p. ulnaris* и основных портов (проксимальный супер-медиальный порт, супер-латеральный порт, антеро-медиальный порт, антеро-латеральный порт, прямой латеральный порт, заднецентральный порт) [19] (рис. 2).



Рис. 2. Фото положения пациента на операционном столе с наложением пневматического турникета (а) и разметкой основных портов (б)

Хирургическое вмешательство осуществляли под комбинированным наркозом: регионарная межлестничная анестезия (блокада плечевого сплетения из надключичного доступа Ропивакаином 0,5 % 20 мл под УЗ-навигацией, стимулплекс ток 0,36 mA) в сочетании с интубационным наркозом.

Стандартным переднемедиальным доступом произведен центез локтевого сустава, при ревизии выявлен посттравматический кубартроз 1–2 ст., вторичный хондроматоз *trochlea humeri* и *fossa olecrani*, гетеротопическая оссификация. Тесты O'Driscoll, Regan/Lapner, Pollock «+» после развития анестезии позволили подтвердить ЗЛРН. Под артроскопическим контролем выполнен латеральный доступ, и манипулятором произведена оценка суставных поверхностей. Гиалиновый хрящ местами отслоен. Удалены хондральные тела в количестве больше 2 шт., около 3×2 мм. Произведена обработка холодно-плазменной кобляцией разросшихся синовиальных складок (пликальный синдром разрешен). Отдельным задним доступом введен артроскоп под трицепс в зону локтевой ямки. Ямка запяная и представлена рубцовой тканью и остеофитами. Произведен дебридмент шейвер-системой и аблятором. Определена дегенерация сухожилия трицепса у места прикрепления (foot print). Объем движений после удаления

артролиза локтевого сустава увеличен в среднем больше чем на $10-15^\circ$. Визуализирован разрыв МЛКС с провокацией кортикального слоя медиального надмыщелка левой плечевой кости и ЛучКС, дегенерация головки лучевой кости (хондромалиция 2 ст.). Рассечены синовиальные складки.

Через кожный доступ 1 см области латеральной лодыжки левой голени выделено и извлечено инструментом сухожилие *m. peroneus longus sin*, разделено $2/3$ на два пучка и открытым экстрактором *pig tail* выполнен забор части сухожилия 5×260 мм для последующей подготовки и формирования аутоотенотрансплантата. В медиальном компартменте визуализирован медиальный надмыщелок плечевой кости (рис. 3, а, рис. 4, а), отведен проксимально *p. ulnaris* в кубитальном канале с целью предотвращения конфликта и нейропатии и произведена обработка кортикального слоя буровой фрезой до «кровяной росы». Через доступ 5 мм имплантирован 1 безтельный мягкотканый якорный фиксатор 2,7 мм с погружением заранее подготовленного аутоотенотрансплантата под артроскопическим контролем. Второй якорный фиксатор 2,7 мм установлен дистальнее *incisura trochlearis*.

Локтевой сустав разогнут, и в положении максимального натяжения прошита и фиксирована сформированная из трансплантата ЛучКС. В латеральном компартменте визуализирован латеральный надмыщелок плечевой кости, произведена обработка кортикального слоя до «кровяной росы» (рис. 3, б, рис. 4, б). Аналогичным способом имплантирован безтельный мягкотканый якорный фиксатор 2,7 мм, пенетратором выполнено чрезсухожильное прошивание лучевой коллатеральной связки по методу «парашют», и затянуты скользящие узлы в нейтральном положении локтевого сустава. Повторение тестов O'Driscoll 1/2, Regan/Lapner, Pollock «–» выявило устранение хронической ЗЛРН локтевого сустава под ЭОП-контролем. Наложены швы на кожу. Левая верхняя конечность иммобилизована косыночной повязкой.

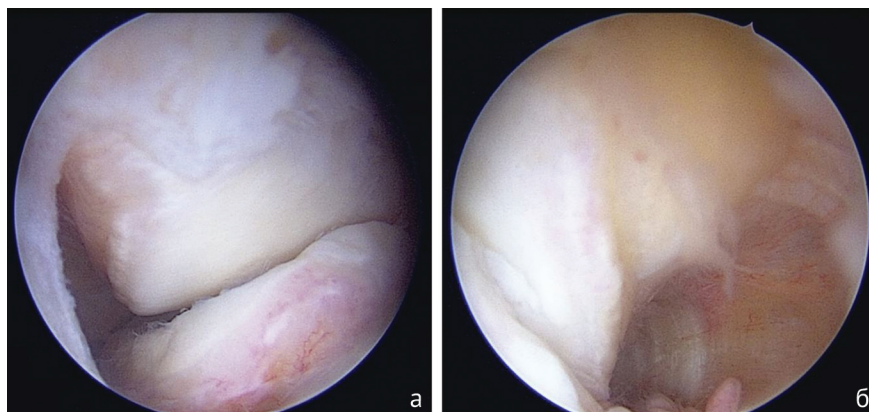


Рис. 3. Артроскопическая картина через заднецентральный порт с визуализацией провокации кортикального слоя медиального надмыщелка «анатомического отпечатка» МЛКС (а) и нарушения структур КЛКС (б) во время проведения адресных клинических тестов

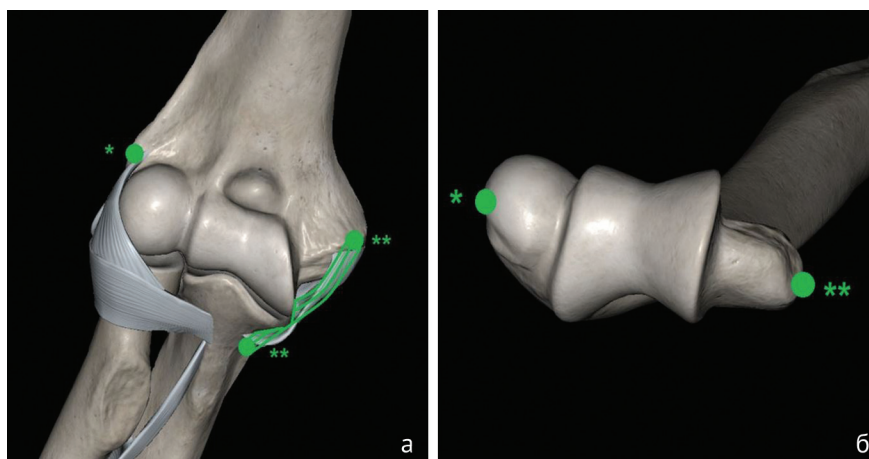


Рис. 4. 3D-модель локтевого сустава (а, б — визуализация в разных плоскостях) с расположением основных реконструктивных элементов при хирургическом лечении хронической ЗЛРН: якорных фиксаторов при реинсерции (*) и аутоотенотрансплантата (**)

Пациент выписан 05.11.2023 без признаков септических осложнений под наблюдение врача амбулаторного подразделения. Протокол реабилитации подразумевал иммобилизацию косыночной повязкой в течение четырех недель, криотерапию (Kryotur), прием нестероидных противовоспалительных препаратов и миорелаксантов *per os*, ЛФК. В I периоде рекомендована аппаратная механотерапия локтевого сустава: ручная кинезиотерапия, ранние, со второй недели, пассивные движения (Kinetec Centura) и активные движения с четвертой недели. Во II периоде — занятия с инструктором по восстановлению сложных двигательных стереотипов с пятой недели, ограничение осевой и тракционной нагрузки (турник, брус) на верхнюю конечность в течение 12 недель [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ результатов лечения хронической ЗЛРН локтевого сустава методом артроскопической реконструкции связочного аппарата проведен с помощью универсального способа персонифицированной оценки методом анкетирования шкалами амбулаторно в ННИИТО через 6 и 24 нед. Отсутствие стойкого болевого синдрома, значимой разницы показателей сравнительной динамометрии, тестов O'Driscoll 1/2, Regan/Lapner, Pollock «–» расценивали как положительный результат (рис. 5).



Рис. 5. Фотофиксация амплитуды движений и адресных клинических тестов левого локтевого сустава после артроскопической реконструкции МЛКС и реинсерции КЛКС при хронической ЗЛРН локтевого сустава

Первый клинический осмотр (6 нед.): сгибание/разгибание — 50/175°, пронация/супинация — 90/90°, VAS 2, DASH 24.2, MEPS — 80 баллов соответственно, SF-36: 60 %; 50 %; 66.7 %; 55 %; 64 %; 62.5 %; 77.5 %; 65 %; 50 %, динамометрия: Dex. 85; Sin. 90 (2daN),

Второй контрольный осмотр (24 нед.): VAS 1, DASH 9.2, MEPS 95 и SF-36: 85 %; 75 %; 66.7 %; 70 %; 84 %; 75 %; 67.5 %; 80 %; 75 %, сравнительные амплитуды движений соответствовали здоровому суставу.

Послеоперационные осложнения оценивали в двух контрольных точках. Первая точка 45 сут. (18.12.2023): гетеротопическая оссификация «–», нейропатия «–», контрактура «+», гипотрофия мышц «+». Вторая точка 180 сут. (03.03.2024): гетеротопическая оссификация «–», нейропатия «–», контрактура «–», гипотрофия мышц «–».

Инструментальная оценка результативности: МРТ 1,5 Тл оперированного сустава с визуализацией хода аутоотенотрансплантата МЛКС до «анатомического отпечатка» (рис. 6, а) и лигаментизации ЛучКС, отсутствие воспалительных изменений, признаков оссификации, гетеротопической оссификации (рис. 6, б). Пациент вернулся к бытовым нагрузкам через 6 нед. и профессиональным — через 12 нед. после прохождения курса вышеописанной реабилитации.



Рис. 6. Контрольное МРТ-исследование посттравматической нестабильности локтевого сустава левой верхней конечности в сагиттальном (а) и коронарном (б) срезах Т1-взвешенного режима МРТ, с визуализацией состоятельности аутоотенотрансплантата МЛКС (**) и лигаментизации КЛКС (*) через 6 нед. после хирургического лечения

ОБСУЖДЕНИЕ

Исходы лечения пациентов с неосложненным вывихом костей предплечья обычно считаются благоприятными. Однако исследования показывают, что 60 % этих пациентов теряют более чем один костный или связочный стабилизатор и могут иметь остаточные симптомы: рецидивирующий вариант посттравматической нестабильности локтевого сустава, контрактуру сустава, боль, связанную с развитием дегенеративно-дистрофических процессов, явления транзиторной ульнарной нейропатии [4, 10, 20].

Имеющиеся данные о частоте возникновения осложнений, приводящих к ревизионному хирургическому лечению, составляют в среднем 12–15 %, однако они ограничены тем, что большинство исследований включают небольшие когорты [14, 16].

Учитывая трудоспособный возраст, проблема лечения травмированных пациентов с посттравматической нестабильностью локтевого сустава и вывихом костей предплечья, а также последующих реабилитационных мероприятий несет значимый социально-экономический характер. В данном клиническом наблюдении представлен случай успешного артроскопического лечения связочных стабилизаторов локтевого сустава с использованием эффективного сочетания имплантатов при его заднелатеральной модели нестабильности. Методика ориентирована на принципы малоинвазивной реконструктивно-пластической хирургии с целью восстановления биомеханики крупного сустава пояса верхних конечностей и отвечает задачам бережного отношения к мягким тканям, позволяя визуализировать повреждение и избежать контакта с нейро-вазальными структурами. В отечественной литературе нами не найдено публикаций о подобном опыте. Диагностическая и лечебная артроскопия — общепринятый метод лечения широкого спектра заболеваний локтевого сустава. Редкость использования метода, отнюдь, не продиктована его сложностью или наличием большого количества осложнений. Необходимый опыт хирурга, уровень квалификации, знание анатомии и биомеханики определяются сложностью клинических случаев. Описанная методика, выполненная по показаниям, представляется эффективной в лечении пациентов с хронической заднелатеральной ротационной нестабильности локтевого сустава. Однако, безусловно, большее количество пациентов с наблюдением их в более отдаленном периоде полноценно раскроет ее преимущества и выявит возможные недостатки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комбинация артроскопической и малоинвазивной хирургии в данном клиническом наблюдении позволила избежать конфликта с нейро-вазальными структурами, обеспечила визуальный контроль имплантации якорных фиксаторов. Представленный клинический случай демонстрирует успешное сочетание методов артроскопической и малоинвазивной хирургии в объеме реконструкции связочного аппарата при нестабильности локтевого сустава.

Конфликт интересов. Авторы сообщают об отсутствии явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией материалов.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания № 122032200266-8.

Этическая экспертиза. Исследование проведено в соответствии с этическими стандартами и нормами законодательства РФ.

Информированное согласие. Пациент добровольно подписал информированное согласие на публикацию персональной медицинской информации в обезличенной форме.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Karbach LE, Elfar J. Elbow Instability: Anatomy, Biomechanics, Diagnostic Maneuvers, and Testing. *J Hand Surg Am.* 2017;42(2):118-126. doi: 10.1016/j.jhsa.2016.11.025.
- Calderazzi F, Garzia A, Leigheb M, et al. Simple and stable elbow dislocations: results after conservative treatment. *Acta Biomed.* 2020;91(4-S):224-231. doi: 10.23750/abm.v91i4-S.9637.
- Rezaie N, Gupta S, Service BC, Osbahr DC. Elbow Dislocation. *Clin Sports Med.* 2020;39(3):637-655. doi: 10.1016/j.csm.2020.02.009.
- Wilk KE, Arrigo CA, Bagwell MS, et al. Repair of the Ulnar Collateral Ligament of the Elbow: Rehabilitation Following Internal Brace Surgery. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2019;49(4):253-261. doi: 10.2519/jospt.2019.8215.
- Isobe F, Nakamura K, Yamazaki H, et al. Difficult closed reduction of elbow dislocations: two case reports from a multicenter retrospective chart review. *JSES Rev Rep Tech.* 2021;2(1):113-116. doi: 10.1016/j.xrrt.2021.10.006.
- Cho CH, Kim BS, Yi J, et al. Common extensor complex is a predictor to determine the stability in simple posterolateral elbow dislocation: analysis of MR images of stable vs. unstable dislocation. *J Clin Med.* 2020;9(10):3094. doi: 10.3390/jcm9103094.
- Егизарян К.А., Ратъев А.П., Данилов М.А., Бадриев Д. А. Лечение простой травматической нестабильности локтевого сустава. *Кафедра травматологии и ортопедии.* 2021;(4):69-79. doi: 10.17238/2226-2016-2021-4-69-79.
- Pederzini LA, Di Palma F, Safran MR, Bain GI. Elbow arthroscopy: state of the art. *J ISAKOS.* 2017;2(5):279-294. doi: 10.1136/jisakos-2016-000089.
- Regan W, Lapner PC. Prospective evaluation of two diagnostic apprehension signs for posterolateral instability of the elbow. *J Shoulder Elbow Surg.* 2006;15(3):344-346. doi: 10.1016/j.jse.2005.03.009.
- Luokkala T, Temperley D, Basu S, et al. Analysis of magnetic resonance imaging-confirmed soft tissue injury pattern in simple elbow dislocations. *J Shoulder Elbow Surg.* 2019;28(2):341-348. doi: 10.1016/j.jse.2018.08.010.
- Marinelli A, Guerra E, Rotini R. Elbow instability: Are we able to classify it? Review of the literature and proposal of an all-inclusive classification system. *Musculoskelet Surg.* 2016;100(Suppl 1):61-71. doi: 10.1007/s12306-016-0424-1.
- Adams JE. Elbow Instability: Evaluation and Treatment. *Hand Clin.* 2020;36(4):485-494. doi: 10.1016/j.hcl.2020.07.013.
- Ahmed AF, Alzobi OZ, Hantouly AT, et al. Complications of elbow arthroscopic surgery: a systematic review and meta-analysis. *Orthop J Sports Med.* 2022;10(11):23259671221137863. doi: 10.1177/23259671221137863.
- Schnetzke M, Porschke F, Kneser U, et al. Functional outcomes and complications of open elbow dislocations. *Oberg Extremit.* 2018;13(3):204-210. doi: 10.1007/s11678-018-0466-0.

15. Hackl M, Müller LP, Wegmann K. The circumferential graft technique for treatment of chronic multidirectional ligamentous elbow instability. *JBJS Essent Surg Tech*. 2017;7(1):e6. doi: 10.2106/JBJS.ST.16.00078.
16. Goretti C, Pari C, Puzzo A, et al. Injury of the brachial artery accompanying simple closed elbow dislocation: a case report. *Acta Biomed*. 2020;91(14-S):e2020030. doi: 10.23750/abm.v91i14-S.8507.
17. Ратьев А.П. Лечение повреждений области локтевого сустава: дис. ... д-ра мед. наук. М.; 2015:252. Доступно по: <https://sechenov.ru/upload/222331.pdf>. Ссылка активна на 02.10.2024.
18. Егиазарян К.А., Ратьев А.П., Лазишвили Г.Д. и др. *Локтевой сустав. Учебное пособие*. Под ред. Егиазаряна К.А., Ратьева А.П. М.: Медицинское информационное агентство; 2019:464. Доступно по: https://medkniga.ru/files/book_fragments_files/33678int.pdf. Ссылка активна на 02.10.2024.
19. Burnham J, Murr K, Kamineni S. Arthroscopy of the Elbow: The Basics. In: Kulkarni SB. (ed.) *Textbook of Orthopedics and Trauma* (4 Volumes). 2016:2008-2014.
20. Robinson PM, Griffiths E, Watts AC. Simple elbow dislocation. *Shoulder Elbow*. 2017;9(3):195-204. doi: 10.1177/1758573217694163.

Статья поступила 01.08.2024; одобрена после рецензирования 16.09.2024; принята к публикации 10.12.2024.

The article was submitted 01.08.2024; approved after reviewing 16.09.2024; accepted for publication 10.12.2024.

Информация об авторах:

Артем Евгеньевич Медведчиков — кандидат медицинских наук, младший научный сотрудник, врач — травматолог-ортопед, medikea@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1271-9026>;

Евгения Андреевна Анастасиева — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, evgeniya.anastasieva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9329-8373>;

Борис Анатольевич Олейник — врач — травматолог-ортопед, b_oleynik@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9231-1380>;

Амаяк Арменович Симонян — врач — травматолог-ортопед, hamo199118@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3457-1031>;

Тимофей Евгеньевич Прокопович — клинический ординатор, timp2354@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-8687-0866>;

Ирина Анатольевна Кирилова — доктор медицинских наук, заместитель директора по научной работе, irinakirilova71@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1911-9741>.

Information about the authors:

Artem E. Medvedchikov — Candidate of Medical Sciences, junior researcher, orthopaedic surgeon, medikea@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1271-9026>;

Evgeniya A. Anastasieva — Candidate of Medical Sciences, orthopaedic surgeon, evgeniya.anastasieva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9329-8373>;

Boris A. Oleynik — orthopaedic surgeon, b_oleynik@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9231-1380>;

Amayak A. Simonyan — orthopaedic surgeon, hamo199118@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3457-1031>;

Timofey E. Prokopovich — clinical resident, timp2354@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-8687-0866>;

Irina A. Kirilova — Doctor of Medical Sciences, Deputy Director for Research, irinakirilova71@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1911-9741>.

Вклад авторов:

Медведчиков А.Е. — концепция и дизайн исследования; сбор, анализ и интерпретация данных, написание и редактирование статьи.

Анастасиева Е.А. — сбор, анализ и интерпретация данных, редактирование и написание статьи.

Олейник Б.А. — редактирование и написание статьи.

Симонян А.А. — редактирование и написание статьи.

Прокопович Т.Е. — сбор, анализ и интерпретация данных, редактирование статьи.

Кирилова И.А. — редактирование статьи.

Все авторы прочли и одобрили финальную версию рукописи статьи. Все авторы согласны нести ответственность за все аспекты работы, чтобы обеспечить надлежащее рассмотрение и решение всех возможных вопросов, связанных с корректностью и надежностью любой части работы.

Обзорная статья

УДК 621.926.76:617.57-001(048.8)

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-1-83-90>

Травмы рук, полученные при контакте с работающими электрическими мясорубками (обзор литературы, иллюстрированный собственными клиническими наблюдениями)

И.К. Супрунов¹, Е.Г. Скрыбин^{1,2}✉¹ Областная клиническая больница № 2, Тюмень, Россия² Тюменский государственный медицинский университет, Тюмень, РоссияАвтор, ответственный за переписку: Евгений Геннадьевич Скрыбин, skryabineg@mail.ru

Аннотация

Введение. Травмы верхних конечностей, полученные детьми и взрослыми при контакте с работающими электрическими мясорубками, относят к категории калечащих. Данные повреждения приводят к физической инвалидизации пострадавшего, а также к тяжёлым психологическим последствиям не только для травмированного субъекта, но и для членов его семьи.

Цель работы — на основании анализа современной научно-медицинской литературы рассмотреть вопросы эпидемиологии, этиопатогенеза, особенностей клинической симптоматики, оперативного лечения, реабилитации, профилактики травм верхних конечностей, получаемых пациентами при контакте с работающими электрическими мясорубками, проиллюстрировав материал собственными клиническими наблюдениями.

Материалы и методы. Поиск научных публикаций осуществлен в электронных базах данных и библиотеках PubMed, eLIBRARY, КиберЛенинка. Глубина поиска составила 47 лет. В общей сложности проанализированы 49 научных статей: отечественных литературных источников использовано 9 (18,36 %), иностранных — 40 (81,64 %).

Результаты и обсуждение. Эпидемиологические данные свидетельствуют, что в структуре открытых повреждений верхних конечностей доля травм, полученных пациентами при контакте с работающими электромясорубками, составляет от 1,4 до 11,1 %. Основными причинами данного вида повреждений у детей является отсутствие контроля со стороны взрослых, у самих же взрослых — несоблюдение мер безопасности. Основные повреждающие механизмы при этом — тракционный и ротационный. Чаще всего травмируют правую кисть, а именно её II, III и IV пальцы. Повреждения характеризуются травматическими ампутациями, отрывами и разможениями сегментов кисти. Оперативное лечение пострадавших включает остановку кровотечения, иссечение нежизнеспособных тканей, формирование культей фаланг пальцев и пястных костей и/или остеосинтез сломанных костей, шов сосудов и нервов, максимально возможное закрытие мягкотканной раны сохранившимися кожными лоскутами. В качестве меры профилактики необходимо более широкое информирование населения о важности соблюдения мер безопасности при работе с электромясорубками. Положительный эффект приносят усиление контроля со стороны взрослых за малолетними детьми при нахождении их в местах приготовления пищи и использование труда профессиональных мясников.

Заключение. На основании данных 49 научных статей получены сведения о частоте встречаемости, причинах, механизмах, особенностях клинической картины, оперативного лечения, реабилитации и профилактики калечащих травм рук, получаемых пациентами при контакте с работающими электрическими мясорубками.

Ключевые слова: калечащие травмы верхних конечностей, работающие электрические мясорубки, обзор литературы, собственные клинические наблюдения

Для цитирования: Супрунов И.К., Скрыбин Е.Г. Травмы рук, полученные при контакте с работающими электрическими мясорубками (обзор литературы, иллюстрированный собственными клиническими наблюдениями). *Гений ортопедии*. 2025;31(1):83-90. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-83-90.



Hand injuries sustained while contacting operating electric meat grinders (literature review illustrated with authors' clinical cases)

I.K. Suprunov¹, E.G. Skryabin^{1,2}✉

¹ Regional Clinical Hospital No. 2, Tyumen, Russian Federation

² Tyumen State Medical University, Tyumen, Russian Federation

Corresponding author: Evgeny G. Skryabin, skryabineg@mail.ru

Abstract

Introduction Upper limb injuries sustained by children and adults with electric meat grinders in motion are mutilating. These injuries may lead to physical disability and severe psychological consequences not only for the injured subjects, but also for their family members.

Aim Based on current medical literature, to analyze the issues of incidence, etiopathogenesis, clinical symptoms, surgical treatment, rehabilitation, prevention of injuries to the upper limbs sustained with electric meat grinders and to illustrate the material with authors' own clinical cases.

Material and methods The search for scientific publications was carried out in the electronic databases and libraries PubMed, eLIBRARY, CyberLeninka. The search depth was 47 years. In total, 49 scientific articles were analyzed and studied: 9 domestic sources (18.36 %) and 40 foreign ones (81.64 %).

Results and discussion Epidemiological data show that the incidence of injuries sustained by individuals while contacting with electric meat grinders in motion is 1.4 % to 11.1 % of open injuries to the upper limbs,. The main cause of this type of injury in children is the lack of control by adults, and in adults it is failure to comply with safety measures. The main mechanisms of trauma are traction and rotation. The right hand is most often injured, namely its fingers II, III and IV. Injuries are characterized by traumatic amputations, ruptures and crushing of hand segments. The most important goals of surgical treatment is excision of non-viable tissue, arrest of bleeding, shaping stumps of finger phalanges and metacarpal bones and / or osteosynthesis of broken bones, suturing of vessels and nerves, the maximum possible closure of the soft tissue wound with preserved skin flaps. As preventive measures, it is proposed to inform the population on safety measures by operating electric meat grinders. There should be careful supervision by adults over young children if they are in places where food is prepared. Services of professional butchers are highly recommended.

Conclusion Based on data from 49 scientific articles, information was obtained on the frequency of occurrence, causes, mechanisms, clinical features, surgical treatment, rehabilitation and prevention of severe hand injuries sustained by individuals contacting with operation electric meat grinders.

Keywords: mutilating injuries, upper limb, electric meat grinder, literature review, own case series

For citation: Suprunov IK, Skryabin EG. Hand injuries sustained while contacting operating electric meat grinders (literature review illustrated with authors' clinical cases). *Genij Ortopedii*. 2025;31(1):83-90. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-83-90.

ВВЕДЕНИЕ

Травмы верхних конечностей, полученные при контакте с работающими электрическими мясорубками, относят к категории калечащих [1, 2]. Данные повреждения приводят к инвалидизации пострадавших вследствие потери пальцев кисти или самой кисти [3, 4]. Актуальность проблемы обусловлена и тем, что калечащие травмы рук имеют крайне тяжёлые психологические последствия не только для травмированного субъекта, но и для членов его семьи [5].

Цель работы — на основании анализа современной научно-медицинской литературы рассмотреть вопросы эпидемиологии, этиопатогенеза, особенностей клинической симптоматики, оперативного лечения, реабилитации, профилактики травм верхних конечностей, получаемых пациентами при контакте с работающими электрическими мясорубками, проиллюстрировав материал собственными клиническими наблюдениями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Поиск публикаций по проблеме травм верхних конечностей, полученных от работающих электромясорубок, осуществлен в электронных базах данных и библиотеках PubMed, eLIBRARY, КиберЛенинка. Глубина поиска составила 47 лет.

Поиск литературных источников проведен по следующим ключевым словам: калечащие травмы верхних конечностей (crippling injuries of the upper limbs), работающие электрические мясорубки (working electric meat grinders).

В ходе исследования использованы следующие критерии включения научных публикаций в обзор литературы: систематические обзоры, посвященные открытым травмам кисти, моноцентровые когортные исследования и клинические случаи, описывающие предпринятую лечебную тактику и исходы лечения пациентов, получивших травмы верхних конечностей в результате попадания рук в работающие электромясорубки. В общей сложности проанализированы 49 научных статей, в которых отражены самые актуальные проблемы и аспекты изучаемой темы: отечественных литературных источников использовано 9 (18,36 %), иностранных — 40 (81,64 %).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Научных статей, посвященных травмам верхних конечностей от работающих электромясорубок, в современной медицинской литературе представлено мало. Достаточно сказать, что группа узбекских авторов в научной работе, опубликованной в 2017 г., сообщает, что им не удалось обнаружить в современных поисковых системах научной информации публикаций, посвященных данной тематике [6]. Вместе с тем, сообщений в электронных средствах массовой информации различных стран о случаях травмирования рук детьми и взрослыми, работающими с электромясорубками, большое количество. Так, только в 2013 г. в США «Управлением по охране труда и здоровья» официально зафиксировано более 4 000 случаев данного вида повреждений [7].

Об актуальности освещаемой темы говорит хотя бы тот факт, что на сегодняшний день достоверно неизвестен удельный вес повреждений верхней конечности, получаемых при травмировании электромясорубками, в структуре причин открытых травм кисти. Об этом показателе можно судить по косвенным данным, приводимым в публикациях. Так, российские авторы информируют читателей о том, что среди 70 детей с открытыми переломами и ранами кисти 1,4 % пострадавших получили травмы при контакте с работающими электромясорубками [8]. По данным греческих авторов, 7 % детей в возрасте до четырех лет получают тяжелые травмы кисти при воздействии на них различных машин и инструментов [9]. Группа китайских хирургов сообщает, что в 11,1 % случаев причиной гнойного теносиновита кисти и предплечья у наблюдаемых ими больных явились травмы, полученные в ходе неосторожного обращения с электромясорубками [10].

В табл. 1 представлены сведения о научных публикациях, в которых авторы описывают свой опыт оказания медицинской помощи пациентам с травмами верхних конечностей, полученными в результате контакта с работающими электромясорубками.

Как следует из представленных в таблице сведений, четыре статьи посвящены описанию полученных травм только среди детей [6, 12, 13, 21], четыре публикации описывают полученные повреждения у детей и взрослых [2, 14, 15, 16] и восемь научных работ характеризуют раны конечностей, лечебную тактику и исходы лечения у пациентов старше 18 лет [17–24]. В общей сложности авторы научных статей описывают клинические наблюдения 94 детей среднего возраста (39 ± 6) мес. и 111 взрослых пострадавших среднего возраста ($32 \pm 1,8$) года.

Таблица 1

Научные публикации, посвященные травмам верхних конечностей у детей и взрослых, полученным при контакте с электромясорубками

№	Авторы статьи и номер источника	Количественные характеристики по возрастным категориям пациентов			
		дети		взрослые	
		количество случаев	средний возраст, мес.	количество случаев	средний возраст, г.
1.	K. Al-Arabi et al. [11]	22	21		
2.	H.S. Ibrahim et al. [12]	1	24		
3.	A.A. Ежов с соавт. [13]	1	33		
4.	С.Ю. Новрузов с соавт. [6]	13	29		
5.	E. Cardoso et al. [14]	20	–	5	–
6.	B.G. Kassa [2]	2	36	1	24
7.	G. Yaldiran et al. [15]	13	–	49	–
8.	I.G. Duman [16]	22	132	42	42
9.	A. Al-Hassani et al. [17]			1	23
10.	M. Brandner et al. [18]			3	37
11.	P.F. Gearing et al. [19]			2	35
12.	D.P. Green et al. [20]			1	45
13.	H. Kinoschito et al. [21]			1	39
14.	N.R. Lubis [22]			3	24
15.	T. Patial et al. [23]			2	25
16.	S. Maajiid et al. [24]			1	29
Итого		94		111	

Основной причиной травм маленьких детей является их любопытство и интерес, когда при отсутствии контроля со стороны взрослых они опускают пальцы рук в горловину работающей электромясорубки [12, 18]. Подростки, как правило, травмируют кисти рук в случаях, когда вместо специального приспособления (пушера) для проталкивания кусков мяса на вращающийся шнек используют свои пальцы [15]. Травмирование взрослых пациентов в основном связано с нарушением техники безопасности в пищевой промышленности и в быту [7, 25, 26]. Так, иранские авторы сообщают о 49 вскрытых ими типичных ошибках, обусловленных личностными, управленческими и организационными факторами, способными привести к тяжелейшим травмам рук персонала во время работы с электромясорубками [27].

Чаще повреждается правая рука [17, 22, 28], поскольку именно правая рука у большинства людей является доминирующей и, следовательно, вовлеченной в большинство выполняемых функций [2, 29]. Вместе с тем, нередко случаи, когда травмируется и левая верхняя конечность [30, 31].

В лечебные учреждения всех травмированных пациентов доставляют с руками, зажатыми в электромясорубках [6]. Авторы практически всех научных статей, представленных в табл. 1, приводят иллюстрации этих больных до момента извлечения покалеченных рук из электромясорубок.

Первым и важнейшим этапом оказания медицинской помощи этой категории пациентов является адекватное обезболивание, позволяющее не только облегчить страдания пострадавшего, но и приступить к скорейшему извлечению рук из электроприборов [21]. Большинство авторов использует для этих целей опыт специальных служб, нередко вызывая их прямо в операционные. Так, A. Al-Hassani et al. привлекли для этих целей региональную службу гражданской обороны Катара [17], P.F. Gearing et al. — пожарную команду австралийского города, в котором они работали [19], турецкие врачи — спасателей со специальной циркулярной пилой [12], а индийские хирурги для освобождения зажатой руки использовали сварочный аппарат, с помощью которого разрезали мясорубку [23]. Отечественные хирурги для освобождения зажатой в электромясорубке руки девочки в возрасте 2-х лет 9 мес. привлекли специалистов Министерства чрезвычайных ситуаций, владеющих специальным силовым оборудованием [13]. Группа травматологов из Узбекистана, оказывая экстренную медицинскую помощь 13 детям с руками, зажатыми в электромясорубках, в 8 (61,5 %) случаях применили бытовые электропилы типа «болгарка», а в 5 (38,5 %) клинических наблюдениях использовали прием ручного реверса (обратного раскручивания) с помощью разводного ключа [6]. Еще более высокий процент применения методики обратного раскручивания мясорубки приводят египетские микрохирургии. Так, по данным A.G. Abdelmegeed et al., эффективной эта методика оказалась у 80 % ($n = 4$) пострадавших, и лишь у одного подростка потребовалось применение циркулярной пилы [32].

Этот же прием ручного реверса оказался эффективен для освобождения зажатых рук двух детей и одного взрослого в клинических наблюдениях B.G. Kassa [2]. В единичном случае его применили, а затем и описали в научной статье D.P. Green et al. [20]. Индонезийские хирурги с успехом использовали

ручной реверс разводным ключом у трех работниц мясоперерабатывающего цеха 23, 24 и 25 лет [22]. Не совсем обычный способ освобождения зажатой в электромясорубке руки использовали индийские врачи, доставившие 29-летнего мужчину из больницы в рядом расположенную автомобильную мастерскую, где автомеханики смогли извлечь покалеченную руку из электромясорубки. Такое решение было принято после проведения врачебного консилиума и предварительного согласования вопроса с работниками автомастерской. Транспортировку больного и процесс разрезания электромясорубки проводили под адекватным анестезиологическим обеспечением и врачебным контролем [6, 24].

После того, как травмированные конечности извлекают из электромясорубок, врачи оценивают тяжесть полученных повреждений [33]. Исходя из устройства и принципа действия работающих электромясорубок, становится понятным, что основными повреждающими руку механизмами являются тракционно-ротационный и измельчающе-раздавливающий [1, 25, 34]. А. Sharma et al. такое комбинированное действие травмирующих сил на верхнюю конечность называют «уникальным» (терминология в статье авторов, — *англ.*: unique mechanism) [36]. Разнонаправленные и в то же время скоординированные действия повреждающих сил приводят к тяжелым многочисленным контузиям, раздавливаниям, размозжениям и отрывам кожных покровов, мышц, связок, сухожилий, сосудов и нервов зажатой в мясорубке конечности, открытым многоуровневым переломам фаланг пальцев, пястных костей, костей запястья, в некоторых случаях – дистального метаэпифиза костей предплечья [23, 34].

Р.П. Матвеев с соавт. в научной статье, посвященной открытым ранам кисти, приводят более 30 существующих и используемых в клинической практике классификаций, посвященных данным видам повреждений [37]. В отечественной травматологии наиболее широкое распространение получила классификация М.В. Громова с соавт., в соответствии с которой повреждения, полученные в результате действия работающих электромясорубок, следует относить к V группе — травматическим ампутациям (полным и неполным), отрывам и размозжениям пальцев и других сегментов кисти [38].

Этапами оперативного лечения пострадавших являются остановка кровотечения, иссечение нежизнеспособных тканей, санация раны, формирование культей фаланг пальцев и пястных костей и/или остеосинтез сломанных костей, шов сосудов и нервов, максимально возможное «закрытие» мягкотканной раны неповрежденными или минимально травмированными простыми или комбинированными кожными лоскутами [33, 35]. Хирургическую обработку раны необходимо проводить экономно с целью сохранения максимально возможного объема анатомических структур кисти [13, 39]. Нарушение кровообращения и иннервации, развитие воспаления являются основными причинами некроза тех анатомических образований кисти, которые хирурги пытаются сохранить при проведении первичной хирургической обработки ран [14]. Тотчас после формирования культей всем травмированным пациентам назначают курс антибактериальной терапии. В качестве медикаментозных средств используют цефалоспорины 1–3 поколений (цефтриаксон, цефазолин, цефутоксим и др.) в возрастных дозировках [8]. В случаях особо тяжелых повреждений верхней конечности пациентам назначают противомикробные и противопаразитарные препараты. Так, например, С.Ю. Наврузов с соавт. из этой группы препаратов предпочтение отдавали метронидазолу, вводимому внутривенно капельно в течение 6–7 сут. [6].

При контакте с вращающимся электрическим оборудованием, в том числе с мясорубками, чаще других из анатомических структур кисти страдают фаланги пальцев и пястные кости [19, 40, 41, 42]. Анализ литературных источников показывает, что ампутации на уровне фаланг пальцев или дезартикуляции на уровне межфаланговых, пястно-фаланговых суставов и проксимальнее чаще всего выполняют применительно к II, III и IV пальцам [12, 17] (рис. 1). Реже, в комбинации с перечисленными пальцами, страдает V палец [2, 13].

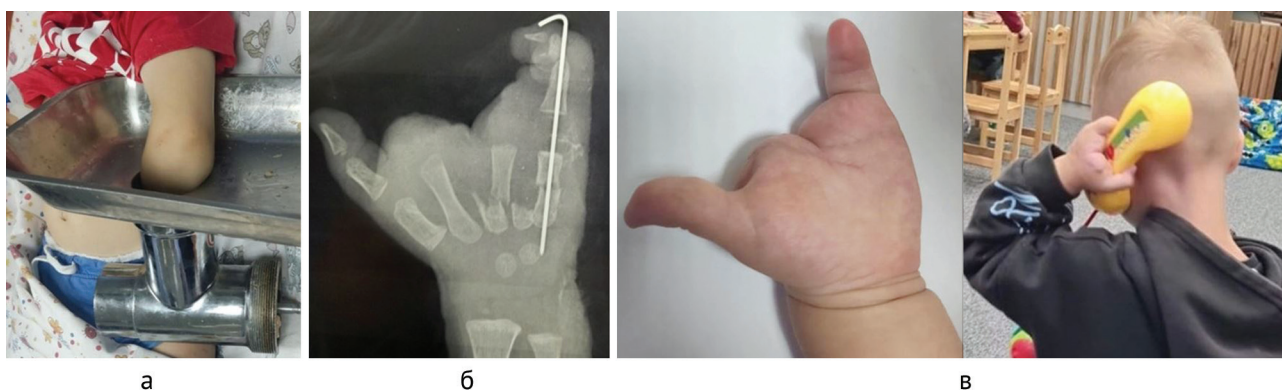


Рис. 1. Калечащая травма левой верхней конечности у 1,5-летнего ребенка: а — левая рука ребёнка находится в электромясорубке; б — рентгенограмма левой кисти в прямой проекции; в — левая кисть ребёнка через год с момента травмы (собственное клиническое наблюдение, август 2022 г.)

I.G. Duman, основываясь на опыте лечения 22 детей и 42 взрослых с открытыми травмами кисти, полученными в результате контакта пациентов с электромясорубками, сообщает о том, что в детской когорте частота дезартикуляций на уровне пястно-фаланговых и лучезапястных суставов статистически достоверно выше по сравнению с группой взрослых больных [16] (рис. 2). Но и среди взрослых пациентов встречаются случаи «высокой» ампутации. Так, T. Patial et al. описывают клиническое наблюдение 22-летнего мужчины, которому в экстренном порядке была выполнена дезартикуляция на уровне лучезапястного сустава. Травму руки он получил при перемалывании мяса на электромясорубке. Авторы статьи особо выделяют тот факт, что после заживления раны руки пациент отказался от протезирования кисти [23].



Рис. 2. Сформированная культя правого предплечья четырехлетнего ребёнка, получившего калечашую травму в результате попадания руки в работающую электромясорубку (собственное клиническое наблюдение, сентябрь 2023 г.)

F. del Pinal сформулировал цель, к которой, по его мнению, нужно стремиться при оказании помощи травмированным электромясорубкой пациентам — это, так называемая, «приемлемая рука» (англ.: the acceptable hand). Этим термином автор описывает «кисть с тремя пальцами, один из которых первый, пальцы при этом имеют почти нормальную длину и сохраняют почти нормальную чувствительность». Но автор ничего не сообщает о требованиях пациентов к функциональному состоянию кисти с ампутированными пальцами [43]. При этом большинство авторов, занимающихся проблемой травм кисти, придает первостепенное значение именно остаточному функциональному состоянию травмированной конечности [44, 45]. По мнению китайских хирургов Y.-J. Tsai et al., для достижения удовлетворительного функционального состояния травмированной конечности у педиатрических пациентов необходимо применять агрессивные методы лечения (терминология авторов в статье, — англ.: aggressive treatment including), включая раннюю реконструкцию и реабилитацию [46]. M.D. Sozbilen et al. убеждены в том, что конечные результаты лечения у детей с травмами рук лучше, чем у взрослых с аналогичными по тяжести повреждениями [47].

Для некоторых стран, преимущественно мусульманского мира, травмы верхних конечностей, полученные в результате контакта с работающими электромясорубками, как в прошлом, так и в настоящее время считаются национальной проблемой здравоохранения [16, 48]. По утверждению G. Yildiran et al., это связано с многовековыми традициями, когда в праздники население приносит жертвоприношения домашними животными, и именно в эти дни частота различных повреждений конечностей, в том числе работающими электромясорубками, возрастает [15].

В качестве меры профилактики необходимо более широко информировать население о важности соблюдения мер безопасности при работе с электромясорубками и иллюстрировать последствия получаемых травм, какими бы шокирующими для населения они не были [2, 19, 23]. Усиление контроля со стороны взрослых за малолетними детьми при нахождении их в местах приготовления пищи [9, 49] и широкое использование труда профессиональных мясников на общенародных праздниках также являются эффективными способами профилактики повреждений рук работающими электромясорубками [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализуя поставленную в исследовании цель, мы проанализировали 49 современных научных публикаций, в которых освещены вопросы эпидемиологии, этиопатогенеза, особенностей клинической симптоматики, оперативного лечения, реабилитации и профилактики травм рук, получаемых пациентами при контакте с работающими электрическими мясорубками. В структуре открытых травм верхних конечностей на долю повреждений, полученных в результате контакта с мясорубками, приходится от 1,4 до 11,1 % случаев. Травмируются преимущественно II, III и IV пальцы правой кисти. Важнейшими этапами оперативного лечения пострадавших является остановка кровотечения, иссечение нежизнеспособных тканей, формирование культей фаланг пальцев и пястных костей и/или остеосинтез сломанных костей, шов сосудов и нервов, максимально возможное закрытие мягкотканной раны сохранившимися кожными лоскутами. В качестве профилактических мер предлагается информирование населения о соблюдении мер безопасности при работе с электромясорубками, усиление контроля со стороны взрослых за малолетними детьми при нахождении их в местах приготовления пищи, использование труда профессиональных мясников.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по представленной статье.

Источник финансирования. Исследование не имело спонсорской поддержки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Ahmad RS, Heng PRW. Crush Injuries of the Hand Part I: History, Mechanism and Pathomechanics [Internet]. In: Salgado AA. (ed.) *Essentials of Hand Surgery*. 2018. doi: 10.5772/intechopen.76658.
- Kassa BG. Meat grinder Hand injuries: serial cases. *MOJ Clin Med Case Rep*. 2017;6(6):135-137. doi: 10.15406/mojcr.2017.06.00179.
- Корюков А.А. Дефекты кисти у детей. Часть I: этиология, клинко-рентгенологические особенности и патофизиологические нарушения. *Вестник Санкт-Петербургского университета*. 2010;(2):99-111.
- Shengxiang W. Clinical comprehend of hand injury caused by meat grinder with microsurgery techniques. *China Modern Medicine*. 2011;1:1-6.
- Thirkannad SM. Mutilating Hand Injuries in Children. *Hand Clin*. 2016;32(4):477-489. doi: 10.1016/j.hcl.2016.07.007.
- Наврузов С.Ю., Низов О.Н., Мусаев Т.С. и др. К вопросу о лечении открытых травм кисти и пальцев у детей при тракционно-раздавляющих повреждениях винтами электромясорубки. *Вестник экстренной медицины*. 2017;X(1):23-28.
- United States. Occupational Safety and Health Administration, issuing body. *Preventing Cuts and Amputations from Food Slicers and Meat Grinders*. Occupational Safety and Health Administration, U.S. Department of Labor, 2015. Available from: <https://www.osha.gov/Publications/OSHA3794.pdf>. Accessed Aug 11, 2024.
- Гордиенко И.И., Цап Н.А., Сосновских А.К., Борисов С.А. Лечение открытых повреждений кисти у детей. *Медицинский вестник Северного Кавказа*. 2018;13(3):482-485. <http://doi.org/10.14300/mnnc.2018.1308>.
- Panagoulou P, Antonopoulos CN, Iakovakis I, et al. Traumatic hand amputations among children in Greece: epidemiology and prevention potential. *Inj Prev*. 2012;18(5):309-314. doi: 10.1136/injuryprev-2011-040121.
- Wang H, Xia F, Xing DM, et al. Effects of vacuum sealing drainage technique in acute and chronic suppurative tenosynovitis of hand. *Zhonghua Wai Ke Za Zhi*. 2017;55(5):384-388. (In Chin.) doi: 10.3760/cma.j.issn.0529-5815.2017.05.015.
- Al-Arabi KM, Sabet NA. Severe mincer injuries of the hand in children in Saudi Arabia. *J Hand Surg Br*. 1984;9(3):249-250. doi: 10.1016/0266-7681(84)90034-2.
- Ibrahim HS, Ilker E, Taskoparan H. Meat grinder hand injury; case report. *Int J Surg Case Rep*. 2022;91:106768. doi: 10.1016/j.ijscr.2022.106768.
- Ежов А.А., Довгаль Д.А. Клинический случай посттравматического восстановления функциональных возможностей кисти у ребенка. *Политравма*. 2016;(3):68-78.
- Cardoso E, Husain MT, Kumar P, et al. Mutilating meat mincer injuries of the hand. *Injury*. 1990;21(2):113-114. doi: 10.1016/0020-1383(90)90068-6.
- Yidiran G, Selimoglu M, Karamese M, et al. A periodical increase in hand injures: The sacrifice feast. *Hand Microsurg*. 2015;4(2):28-31. doi: 10.5455/handmicrosurg.176227.
- Duman IG. Prevalence of household meat grinder-induced severe hand injuries: A retrospective clinical study. *Ulus Travma Acil Cerrahi Derg*. 2022;28(11):1622-1626. doi: 10.14744/tjtes.2021.55866.
- Al-Hassani A, Wahlen BM, Ayasa MAM, et al. Meat grinder injury of the arm: how to extract an arm safe, fast and pain free: case report and literature review. *J Surg Case Rep*. 2022;2022(2):rjac001. doi: 10.1093/jscr/rjac001.
- Brandner M, Bunkis J, Trengove-Jones G. Meat grinder injuries to the upper extremity. *Ann Plast Surg*. 1985;14(5):454-457. doi: 10.1097/0000637-198505000-00009.
- Gearing PF, Goldie S, Barton R, Ramakrishnan A. Handy extrication methods for meat grinder injuries: a case series. *ANZ J Surg*. 2023;93(3):743-745. doi: 10.1111/ans.17959.
- Green DP, Terry GC, Whittemore AK. Extrication of the hand from a meat grinder. *J Trauma*. 1975;15(1):32-35. doi: 10.1097/00005373-197501000-00005.
- Kinoshita H, Sato N, Mimura S, et al. Anesthetic induction and endotracheal intubation in the sitting position due to the fixed forearm caught by a meat grinder. *Braz J Anesthesiol*. 2023;73(2):227-229. doi: 10.1016/j.bjane.2021.07.030.
- Lubis NR. Meat grinder injury to the hand: serial cases. *J Indonesian Orthop*. 2012;40(3):29-34.
- Patil T, Mittal RK, Garg R, Shah S, Kaur A. Grinder Injury of the Hand: A Rare but Devastating Occupational Hazard. *Surg J (N Y)*. 2021;7(4):e297-e300. doi: 10.1055/s-0041-1735902.
- Maajid S, Lal T, Bhat TA, et al. Salvaging an entrapped hand unusual injury, unusual management. *MOJ Orthop Rheumatol*. 2017;7(6):11-12. doi: 10.15406/mojor.2017.07.00293.
- Kringstad O, Dahlin LB, Rosberg HE. Hand injuries in an older population - a retrospective cohort study from a single hand surgery centre. *BMC Musculoskelet Disord*. 2019;20(1):245. doi: 10.1186/s12891-019-2617-x.
- Smith GS, Wellman HM, Sorock GS, et al. Injuries at work in the US adult population: contributions to the total injury burden. *Am J Public Health*. 2005;95(7):1213-1219. doi: 10.2105/AJPH.2004.049338.
- Mohammadian M, Choobineh AR, Nave ARM. Human errors identification in operation grinder using TAFEL technique. *J Occup Health and Epidemiol*. 2012;1(3):171-181. doi: 10.18869/acadpub.johe.1.3.171.
- Bhatti DS, Ain NU, Fatima M. Occupational Hand-Related Injuries at a Major Tertiary Care Burn and Reconstructive Center in Pakistan. *Cureus*. 2020;12(9):e10444. doi: 10.7759/cureus.10444.
- Abebe MW. Common causes and types of hand injuries and their pattern of occurrence in Yekatit 12 Hospital, Addis Ababa, Ethiopia. *Pan Afr Med J*. 2019;33:142. doi: 10.11604/pamj.2019.33.142.18390.
- Frank M, Lange J, Napp M, Hecht J, Ekkernkamp A, Hinz P. Accidental circular saw hand injuries: trauma mechanisms, injury patterns, and accident insurance. *Forensic Sci Int*. 2010;198(1-3):74-78. doi: 10.1016/j.forsciint.2010.01.003.
- Hey HW, Seet CM. Hand injuries seen at an emergency department in Singapore. *Eur J Emerg Med*. 2010;17(6):343-345. doi: 10.1097/MEJ.0b013e32833777c4.
- Abdelmegeed AG, Saied S, Hifny MA. Meat grinder hand injury in children: A report of 5 cases. *Ann Chir Plast Esthet*. 2023;68(3):275-278. doi: 10.1016/j.anplas.2022.12.001.
- Georgescu AV, Battiston B. Mangled upper extremity: Our strategy of reconstruction and clinical results. *Injury*. 2021;52(12):3588-3604. doi: 10.1016/j.injury.2021.04.004.
- Низов О.Н., Минаев Т.Р., Юлдашев А.А. и др. Выбор тактики лечения при тракционных и раздавливающих травмах кисти и пальцев. *Вестник экстренной медицины*. 2013;(2):10-15.
- Минаев Т.Р., Юлдашев А.А., Низов О.Н. и др. Комбинированная этапная кожная пластика при скальпированном (перчаточном) кожном дефекте I-V пальцев кисти. *Вестник экстренной медицины*. 2017;10(1):62-68.
- Sharma A, Sankhe M. A Proposed Classification for Sugarcane Crusher Injuries of the Hand and Its Correlation with Patient Rated Outcome Scores at 6 Months. *J Hand Surg Asian Pac Vol*. 2022;27(2):267-275. doi: 10.1142/S2424835522500382.
- Матвеев Р.П., Петрушин А.Л. Вопросы классификации и терминологии открытых повреждений кисти (обзор литературы). *Травматология и ортопедия России*. 2011;17(2):191-198. doi: 10.21823/2311-2905-2011-0-2-191-198.

38. Громов М.В., Лазарев А.А., Коршунов В.Ф. К вопросу о классификации открытых повреждений кисти. *Ортопедия и травматология*. 1977;(6):84-85.
39. Miranda BH, Spilsbury ZP, Rosala-Hallas A, Cerovac S. Hand trauma: A prospective observational study reporting diagnostic concordance in emergency hand trauma which supports centralised service improvements. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*. 2016;69(10):1397-402. doi: 10.1016/j.bjps.2016.06.030.
40. Шевцов В.И., Шабалин Д.А., Попова Л.А., Данилкин М.Ю. Способы формирования первого пальца и луча кисти методом управляемого чрескостного остеосинтеза, разработанного в РНЦ «ВТО». *Гений ортопедии*. 2009;(2):17-21.
41. Abu-Sittah GS, El Khatib AM, Dibo SA. Thermal injury to the hand: review of the literature. *Ann Burns Fire Disasters*. 2011;24(4):175-185.
42. Harris C, Madonic D, Hartka TR. Lawn mower injuries presenting to the emergency department: 2005 to 2015. *Am J Emerg Med*. 2018;36(9):1565-1569. doi: 10.1016/j.ajem.2018.01.031.
43. del Piñal F. Severe mutilating injuries to the hand: guidelines for organizing the chaos. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*. 2007;60(7):816-827. doi: 10.1016/j.bjps.2007.02.019.
44. Gordon AM, Malik AT, Goyal KS. Trends of hand injuries presenting to US emergency departments: A 10-year national analysis. *Am J Emerg Med*. 2021;50:466-471. doi: 10.1016/j.ajem.2021.08.059.
45. Neumeister MW, Brown RE. Mutilating hand injuries: principles and management. *Hand Clin*. 2003;19(1):1-15, v. doi: 10.1016/s0749-0712(02)00141-5.
46. Tsai YJ, Carvajal CF, Flores NM, et al. Reconstruction of pediatric hand injuries caused by automatic cup-sealing machines in Taiwan. *J Int Med Res*. 2019;47(11):5855-5866. doi: 10.1177/0300060519874540.
47. Sozbilen MC, Dastan AE, Gunay H, Kucuk L. One-year prospective analysis of hand and forearm injuries in children. *J Pediatr Orthop B*. 2021;30(4):364-370. doi: 10.1097/BPB.0000000000000802.
48. Hagie FE. Meat grinder accidents in children. *J Indiana State Med Assoc*. 1949;42:234.
49. Shah SS, Rochette LM, Smith GA. Epidemiology of pediatric hand injuries presenting to United States emergency departments, 1990 to 2009. *J Trauma Acute Care Surg*. 2012;72(6):1688-1694. doi: 10.1097/TA.0b013e31824a4c5b.

Статья поступила 25.10.2024; одобрена после рецензирования 06.11.2024; принята к публикации 20.01.2025.

The article was submitted 25.10.2024; approved after reviewing 06.11.2024; accepted for publication 20.01.2025.

Информация об авторах:

Игорь Константинович Супрунов — травматолог-ортопед, <https://orcid.org/0000-0002-4128-6127>;

Евгений Геннадьевич Скрыбин — доктор медицинских наук, профессор, врач — травматолог-ортопед, профессор кафедры, skryabineg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4128-6127>.

Information about the authors:

Igor K. Suprunov — orthopaedic surgeon, <https://orcid.org/0000-0002-4128-6127>;

Evgeny G. Skryabin — Doctor of Medical Sciences, Professor, orthopaedic surgeon, Professor of the Department, skryabineg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4128-6127>.

Обзорная статья

УДК 616.717.71-001.58-073.7-089-035(048.8)

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-1-91-100>

Несращения переломов ладьевидной кости и методы лечения при SNAC-синдроме

Н.А. Щудло, Ш.К. Куттыгул✉

Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова, Курган, Россия

Автор, ответственный за переписку: Шынгыс Кайырбекулы Куттыгул, artana.kaz@gmail.com

Аннотация

Введение. Несращение ладьевидной кости может приводить к развитию прогрессирующего коллапса запястья, — SNAC-синдрому (*англ.*: Scaphoid Nonunion Advanced Collapse), существенно снижающему качество жизни молодых пациентов. Высокая социальная значимость данного патологического состояния обуславливает актуальность дальнейших оригинальных исследований и анализа литературы.

Цель работы — определение методов профилактики несращений ладьевидной кости и улучшения результатов лечения пациентов со SNAC-синдромом на основании анализа литературы об этиологии, диагностике и лечении заболевания.

Материалы и методы. Поиск, проведённый в электронных базах eLIBRARY и Pubmed по запросам: несращение ладьевидной кости, ладьевидная кость, костная пластика, scaphoid nonunion, scaphoid, bone graft, vascularized bone graft, дал 355 результатов. Критерии включения: оригинальные статьи, систематические обзоры, мета-анализы, соответствующие теме поиска, на русском и английском языках. Критерии невключения: клинический случай, случай/контроль, а также статьи, доступные только на платной основе. Отобрано 67 статей. Хронологические рамки публикаций — с 1984 до 2024 гг.

Результаты и обсуждение. Топография ладьевидной кости обуславливает высокую частоту аваскулярного некроза, замедленного сращения и несращения перелома. Для улучшения диагностики переломов ладьевидной кости в остром периоде травмы необходимо использовать комплекс клинических тестов и лучевых методов, а для определения показаний к операции — учитывать критерии нестабильности перелома. Известна тактическая классификация несращений ладьевидной кости для выбора метода хирургического лечения (остеосинтез компрессирующими винтами, некрэктомия и костные трансплантаты, либо «спасительные» операции). Единичные публикации посвящены эффективности применения аппарата Илизарова в лечении несращений ладьевидной кости без применения открытых доступов и трансплантатов. Лечение пациентов со SNAC-синдромом традиционно определяется стадией заболевания: 1 — реконструкция ладьевидной кости, резекция шиловидного отростка лучевой кости; 2–3 — четырехугольный артродез или резекция проксимального ряда костей запястья. Мета-анализы отмечают необходимость дальнейших исследований эффективности различных методов лечения. В хирургии запястья всё более широкое применение находит артроскопическая техника, улучшающая возможности диагностики и малоинвазивных операций.

Заключение. Своевременное достижение сращения перелома ладьевидной кости — основной путь профилактики карпальной нестабильности и SNAC-синдрома. При выборе метода лечения пациентов с SNAC-синдромом, наряду со стадией заболевания, необходимо учитывать функциональные потребности пациента.

Ключевые слова: несращение ладьевидной кости, ладьевидная кость, чрескожная фиксация, костный трансплантат, кровоснабжаемый костный трансплантат, SNAC-синдром

Для цитирования: Щудло Н.А., Куттыгул Ш.К. Несращения переломов ладьевидной кости и методы лечения при SNAC-синдроме. *Гений ортопедии*. 2025;31(1):91-100. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-91-100.



Scaphoid nonunion and SNAC treatment

N.A. Shchudlo, Sh.K. Kuttygul✉

Ilizarov National Medical Research Centre for Traumatology and Orthopedics, Kurgan, Russian Federation

Corresponding author: Shyngys K. Kuttygul, artana.kaz@gmail.com

Abstract

Introduction Scaphoid nonunion can result in progressive scaphoid nonunion advanced collapse (SNAC) and have an impact on the quality of life in younger patients. The social significance of the pathological condition induces original research and literature analysis.

The **objective** was to identify methods for preventing scaphoid nonunion and improving treatment outcomes for SNAC patients based on the literature on etiology, diagnosis and treatment of the disease.

Material and methods The original literature search was conducted on key resources including Scientific Electronic Library (www.elibrary.ru) and the National Library of Medicine (www.pubmed.org) and using the keywords: scaphoid nonunion, scaphoid, bone grafting, scaphoid nonunion, vascularized bone graft. The search yielded 355 results. Literature searches included both Russian and English studies published between 1984 and 2024. Inclusion criteria included original articles, systematic reviews, meta-analyses relevant to the search topic. Non-inclusion criteria included a case report, case/control, and articles available only on a fee-paying basis. There were 67 articles identified.

Results and discussion The topography of the scaphoid is associated with a high incidence of avascular necrosis, delayed healing and fracture nonunion. Clinical testing and imaging are essential for diagnosis of scaphoid fractures in the acute period of injury, and fracture instability would be important for surgical indications. There is a classification of scaphoid nonunions that is practical for the choice of a surgical treatment (osteosynthesis with compression screws, debridement and bone grafts or “salvage” operations). Scaphoid nonunions treated with the Ilizarov method employing no open approaches or grafts was reported in a few publications. Treatment of SNAC patients is traditionally based on the stage of the disease: 1 – scaphoid reconstruction, resection of the styloid process of the radius; 2–3 – 4-corner arthrodesis or the proximal row carpectomy. Meta-analyses highlight the need for the research into the effectiveness of various treatments. Arthroscopic techniques are common in wrist surgery improving diagnostic capabilities and minimally invasive interventions.

Conclusion Timely healing of a scaphoid fracture is essential for preventing carpal instability and SNAC. The choice of SNAC treatment is associated with the stage of the disease and functional needs of the patient.

Keywords: scaphoid nonunion, scaphoid, percutaneous fixation, bone graft, vascularized bone graft, SNAC

For citation: Shchudlo NA, Kuttygul ShK. Scaphoid nonunion and SNAC treatment. *Genij Ortopedii*. 2025;31(1):91-100. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-91-100.

ВВЕДЕНИЕ

Травма запястья часто приводит к переломам дистального метаэпифиза лучевой кости у пожилых людей. Молодые наиболее часто получают переломы костей запястья (ладьевидной, трёхгранной и крючковидной) либо шиловидного отростка локтевой кости. Данные переломы сопровождаются повреждениями связок, что усугубляет нарушения анатомии и биомеханики запястья и усложняет диагностику [1], а также выбор лечебной тактики [2].

Ладьевидная кость является самой крупной костью запястья, критичной для его стабилизации. Переломы ладьевидной кости нередко случаются у спортсменов и военных [3]. Несращения переломов ладьевидной кости — часто встречающееся осложнение, которое приводит к развитию SNAC-синдрома (англ.: Scaphoid Nonunion Advanced Collapse), — артроза кистевого сустава. Как свидетельствуют обзоры последних лет, проблемы выбора методов лечения пациентов с несращением ладьевидной кости и артрозом кистевого сустава остаются дискуссионными [4, 5].

Поскольку рассматриваемые патологические состояния существенно снижают качество жизни молодых пациентов, их социальная значимость высока, что определяет актуальность дальнейших оригинальных исследований и анализа литературы.

Цель работы — определение методов профилактики несращений ладьевидной кости и улучшения результатов лечения пациентов со SNAC-синдромом на основании анализа литературы об этиологии, диагностике и лечении заболевания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Поиск, проведённый в электронных базах eLIBRARY и Pubmed по запросам: несращение ладьевидной кости, ладьевидная кость, костная пластика, scaphoid nonunion, scaphoid, bone graft, vascularized bone graft, дал 355 результатов.

Критерии включения: оригинальные статьи, систематические обзоры, мета-анализы, соответствующие теме поиска, на русском и английском языках.

Критерии не включения: клинический случай, случай/контроль, а также статьи, доступные только на платной основе.

Для анализа отобрано 67 статей. Хронологические рамки публикаций — с 1984 до 2024 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Эпидемиология переломов ладьевидной кости

Частота переломов ладьевидной кости составляет 2–7 % от всех переломов и почти 90 % от переломов костей запястья [6]. Среди пациентов с переломами ладьевидной кости преобладают молодые мужчины в возрасте от 10 до 29 лет [7, 8]. У пожилых людей переломы такой локализации встречаются редко [9]. Обзоры последних лет свидетельствуют, что данные по эпидемиологии переломов и несращений ладьевидной кости неоднородны [10].

Функциональная анатомия и особенности кровоснабжения ладьевидной кости

Ладьевидная кость — самая крупная кость запястья, которая сочленяется с пятью соседними костями посредством преимущественно хрящевой поверхности и имеет сложную сеть креплений связочного аппарата; эти особенности предопределяют разнообразие нарушений кинематики запястья после переломов и играют существенную роль в развитии синдрома карпальной нестабильности [11].

Форма, размеры, расположение ладьевидной кости и рентгеновская плотность разных её частей индивидуальны и варьируемы [12]. Сужение ладьевидной кости в области талии в сочетании со сниженной костной плотностью предопределяют высокую частоту переломов (75 %) именно этой локализации [13].

Ладьевидная кость участвует в кинематике как проксимального, так и дистального ряда костей запястья, при продольной нагрузке происходит ладонная флексия ладьевидной кости, резкое разгибание и локтевая девиация запястья в сочетании с продольной нагрузкой предрасполагают к переломам, особенно при разрывах связок, переломы проксимальнее талии способствуют смещениям и ишемизации проксимального фрагмента [14]. Основным механизмом переломов ладьевидной кости — падение на вытянутую руку. Форсированное тыльное разгибание или локтевая девиация запястья при осевой нагрузке приводят к тыльному подвывиху средне-запястных суставов и повышенному напряжению коркового слоя ладьевидной кости с ладонной стороны [15].

Переломы ладьевидной кости относят к переломам с компрометированным кровоснабжением [16]. Они характеризуются высокой частотой осложнений, таких как аваскулярный некроз, замедленное сращение и несращение, остеоартроз, существенно снижающих качество жизни пациентов.

Особенности кровоснабжения ладьевидной кости заключаются в том, что ладонная ветвь лучевой артерии кровоснабжает дистальный полюс, а ветвь тыльной запястной ветви лучевой артерии вступает в ладьевидную кость также дистально (рис. 1), являясь единственным источником кровоснабжения проксимального полюса через ретроградный внутрикостный кровоток [17].

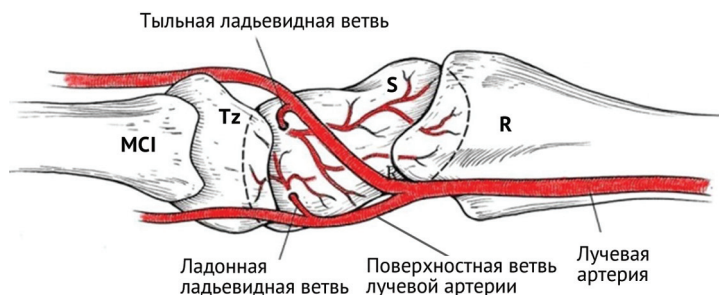


Рис. 1. Схема кровоснабжения ладьевидной кости: MCI — первая пястная кость, Tz — трапеция, S — ладьевидная кость, R — лучевая кость. Воспроизведено по T.E. Trumble et al. [18] с изменениями

Проблемы диагностики переломов ладьевидной кости

Существуют проблемы диагностики переломов ладьевидной кости, так как у 40 % пациентов в остром периоде травмы такие переломы не выявляются рентгенологически [19]. Поэтому особое значение приобретают клинические тесты, имеющие высокую чувствительность и низкую специфичность. В частности, боль при надавливании на область «анатомической табакерки» или бугорок ладьевидной кости, а также осевая нагрузка на первую пястную кость имеют 100 % чувствительность при переломах ладьевидной кости. Однако их специфичность составляет всего 9 %, 30 % и 48 % соответственно. Ограничение движений большого пальца имеет чувствительность 69 % и специфичность 66 %, поэтому при клинической диагностике важно использовать комбинацию признаков [20]. По мнению R. Grover, наиболее важными признаками являются болезненность ладьевидной кости и отёк запястья, который при переломах бывает более выраженным, чем при повреждениях мягких тканей [21].

Предпринимаются попытки разработать прогностическую формулу, включающую пять параметров: мужской пол, отёк «анатомической табакерки», болезненность «анатомической табакерки», болезненность локтевой девиации, болезненность компрессии большого пальца. Этот способ прогнозирования перелома имеет чувствительность 97 % и специфичность всего 20 % [22]. Однако, по мнению авторов, применение этой прогностической формулы снижает вероятность гиподиагностики переломов ладьевидной кости.

В последние годы при подозрении на перелом ладьевидной кости предлагается выполнять рентгенографию костей запястья в четырёх проекциях, — помимо стандартных для кисти трёх проекций, выполняется передне-задняя проекция в положении локтевой девиации [23]. Авторы указывают, что при таком методе рентгенографии не диагностируются 21,5 % переломов ладьевидной кости, но, поскольку чувствительность компьютерной томографии (КТ) составляет 81,5 %, чувствительность рентгенографии в четырёх проекциях оказывается приближенной к КТ. Алгоритм диагностики, разработанный авторами (рис. 2), наряду с рентгенографией в четырёх проекциях включает КТ и магнитную резонансную томографию (МРТ).

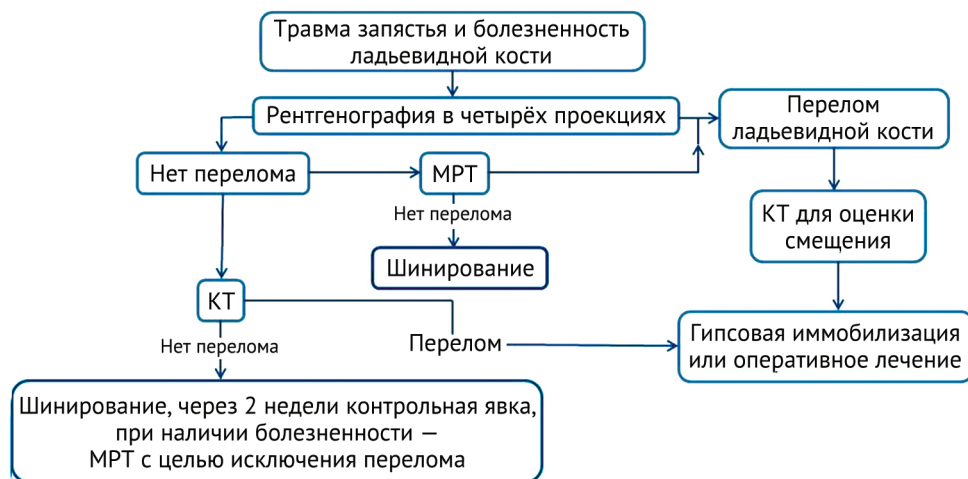


Рис. 2. Алгоритм диагностики переломов ладьевидной кости по H.C. Bäcker, C.H. Wu, R.J. Strauch [23]

Ранее для повышения информативности метода рентгенографии в выявлении нестабильных переломов ладьевидной кости предлагалось выполнять четыре проекции обоих запястий, причём обе прямые проекции в девиантном положении кисти — локтевом и лучевом [24].

Классификации переломов ладьевидной кости

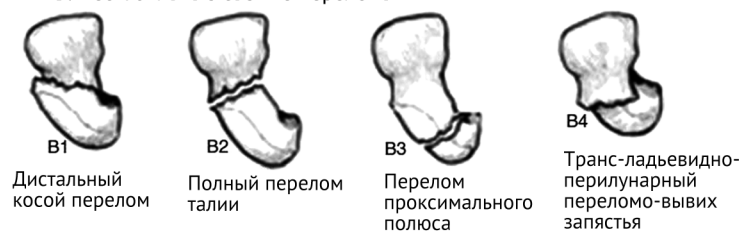
В мировой литературе выявлено 13 классификаций переломов ладьевидной кости, которые учитывают локализацию перелома, ориентацию его плоскости, стабильность или смещение [25]. По данным авторов, наиболее цитируемой является классификация Herbert. Согласно этой классификации, большинство переломов ладьевидной кости нестабильны, к стабильным относятся только переломы типа А (рис. 3).

По мнению других авторов, в клинической практике целесообразно использовать более упрощённый классификационный подход разделения переломов ладьевидной кости на проксимальные, дистальные и переломы талии, при этом необходимо указывать наличие и величину смещения, а также давность травмы [17]. В соответствии с упрощённой классификацией локализации переломов разработано три алгоритма их лечения [26].

Тип А: Стабильные свежие переломы



Тип В: Нестабильные свежие переломы



Тип С: Замедленное сращение



Тип D: Несращение



Рис. 3. Зарисовка классификационной схемы переломов костей запястья по Herbert. Воспроизведена с изменениями по T.G. Sommerkamp [8]

Смещения более 1 мм ассоциированы с 55 %-ной частотой несращений и 50 %-ной частотой аваскулярных некрозов; смещённые переломы, которые срастаются спонтанно, требуют длительной иммобилизации; неправильные сращения или несращения часто сопровождаются болевым синдромом и приводят к остеоартрозу запястья [27]. Смещённые переломы ладьевидной кости условно классифицируют на минимально смещённые ($\leq 0,5$ мм), средне смещённые (0,5–1,5 мм), сильно смещённые ($\geq 1,5$ мм) [28]. Смещение перелома, как правило, является признаком его нестабильности, но нестабильными могут быть и несмещённые переломы. Основные критерии нестабильности: смещения более 1 мм, синдром разгибательной нестабильности вставочного сегмента (DISI), — ладьевидно-полулунный угол более 60° и латеральный внутри-ладьевидный угол более 35° , а также оскольчатые переломы и переломы ладьевидной кости как часть перилунарного повреждения [26]. Артроскопически верифицированные разрывы ладьевидно-полулунной связки более чем в 25 % сочетаются с несмещёнными переломами ладьевидной кости, которые также относят к нестабильным [29].

Причины несращения переломов ладьевидной кости и методы их лечения

Если сращение перелома ладьевидной кости не достигается в течение 3 месяцев, это расценивается как замедленное сращение, если же не достигается через 6 месяцев — как несращение. Основными причинами несращения переломов ладьевидной кости считают несвоевременную диагностику и нарушения васкуляризации [30], а также неадекватную по качеству и срокам иммобилизацию перелома [31].

Среди причин несращения переломов ладьевидной кости авторы выделяют факторы, связанные с пациентом (подразумевая его некомплаентность), ятрогенные и биологические факторы [32].

При анализе эпидемиологии несращений переломов 18 локализаций более чем у 300 тыс. пациентов установлено, что при средней частоте несращений 4,9 % частота несращений переломов ладьевидной кости была наибольшей и составила 15,5 %; риск несращения был повышен при открытых и множественных переломах, большом массо-ростовом коэффициенте, курении и алкоголизме [33].

При лечении пациентов с переломами ладьевидной кости методом открытой репозиции и внутренней фиксации установлено, что факторами несращения являются срок оперативного лечения более 31 дня с момента травмы и объём фрагмента ладьевидной кости менее 38 % от объёма кости в целом [34].

Клиника несращений переломов ладьевидной кости характеризуется вариабельностью, наиболее часто регистрируют выраженный болевой синдром, проявления капсулита, контрактуры кистевого сустава и снижение высоты кистевого сустава. Патоморфологические изменения кистевого сустава проявляются в виде дистрофически-деструктивных, продуктивно-репаративных и воспалительных процессов [35].

Предложена тактическая классификация несращений переломов ладьевидной кости [36] (табл. 1).

Таблица 1

Тактическая классификация несращений J.F. Slade et al., 2005 [36]

Группа	Характеристика
I	Пациенты с переломами, пролеченные через 4–12 недель после травмы
II	Фиброзное сращение: линия перелома минимальна, нет кист и склероза
III	Минимальный склероз: костная резорбция занимает ≤ 1 мм интерфейса несращения
IV	Кисты и склероз: костная резорбция $> 1 \leq 5$ мм интерфейса несращения
V	Деформация и псевдоартроз — костная резорбция > 5 мм интерфейса
VI	Артроз запястья — несращение с признаками лучезапястного и среднелучезапястного артроза

Согласно этой классификации, пациентам I–III групп показан остеосинтез компрессирующими винтами, пациентам IV–V групп — некрэктомия и костные трансплантаты, пациентам VI группы — «спасительные» операции.

Имеются единичные публикации, посвящённые применению компрессирующих кортикальных винтов из человеческой аллокости в лечении пациентов с переломами и псевдоартрозами ладьевидной кости. Винты из аллокости обеспечивают высокий процент сращения, низкую частоту осложнений и не требуют удаления [37].

Для лечения несращений ладьевидной кости применяют различные костные трансплантаты: традиционные некровоснабжаемые, и несвободные или свободные кровоснабжаемые (на сосудистой ножке). По данным некоторых авторов, несвободные кровоснабжаемые трансплантаты в лечении пациентов с псевдоартрозами и дефектами костей дают очень высокий процент сращений — 96,3 % [38]. Однако эти данные противоречивы: по данным M.A. Chang et al., сращение достигалось у 68 % пациентов [39], по данным C. Hirsche — у 75 % [40]. Некоторые авторы указывают на ещё более низкую частоту сращения — 27 %, что, по их мнению, связано с аваскулярным некрозом проксимального полюса ладьевидной кости у многих пациентов [41].

Систематический обзор 48 публикаций [42] показал, что частота сращений при применении кровоснабжаемых и некровоснабжаемых трансплантатов при данной патологии достоверно не различалась. Практически одинаковый процент сращений достигнут при применении трансплантатов из лучевой кости и гребня подвздошной кости, однако последний давал большее количество осложнений. Фиксация винтами и спицами Киршнера также приводила к одинаковым показателям частоты сращения, но пациентов с фиксацией винтами мобилизовали раньше.

По данным мета-анализа публикаций на материале от 1500 пациентов [43], кровоснабжаемые трансплантаты не имеют достоверных преимуществ в плане повышения частоты сращения по сравнению с некровоснабжаемыми, то есть сопоставимые результаты достигаются при применении менее инвазивного варианта операции.

Анализ результатов лечения и операционного гистологического материала 35 пациентов, у которых применяли некровоснабжаемые трансплантаты, показал, что «инфаркт» проксимального полюса развивается экстремально редко, поэтому и кровоснабжаемые трансплантаты показаны также редко [44].

Сообщается об успешном применении артроскопической техники в лечении несращений переломов ладьевидной кости костными трансплантатами, фиксированными спицами Киршнера [45], однако процедура имеет ограничения, — несращения проксимальной и средней трети ладьевидной кости без интракарпальной деформации и остеоартрита.

В последние годы в качестве первого этапа лечения пациентов с несращениями используют фиксацию двумя винтами без применения костных трансплантатов, даже при наличии кист и большом внутри-ладьевидном угле («горбатой деформации») [30].

Пациентам, которые по тем или иным причинам не соглашаются на операцию, назначают консервативное лечение, — электрическую или ультразвуковую костную стимуляцию в сочетании с гипсовой иммобилизацией [46].

В обзоре данных Embase и Pubmed за 2000–2023 гг. отмечены отличные результаты применения артроскопических способов фиксации костных трансплантатов и способа Fisk – Fernandez (трансплантата гребня подвздошной кости с внутренней фиксацией). Ультразвуковое лечение также показывает эффективность, хотя доказательства ограничены [47].

Единичные публикации посвящены лечению несращений ладьевидной кости с применением аппарата и метода Илизарова. В группе из 18 пациентов у 14 получены хорошие и отличные результаты, продолжительность иммобилизации в аппарате не превышала 9 недель [31]. Аналогичные результаты получены другой группой авторов, применявших компрессирующие спицы с напайками, период иммобилизации в этом исследовании не превышал 6 недель [48]. Преимущества данного подхода состоит в том, что он не требует применения открытых хирургических доступов и костных трансплантатов. Следует отметить, что у пациентов этих групп не было «горбатой деформации», карпальной нестабильности, прогрессирующего коллапса или аваскулярного некроза.

Независимо от того, какой метод лечения несращений ладьевидной кости выбран, для успешного результата он должен обеспечить сохранение кровоснабжения, стабильную фиксацию, костный трансплантат для замещения дефекта и стимуляции сращения, которое должно быть достигнуто до наступления дегенеративных изменений [49].

Прогрессирующий коллапс на фоне несращения ладьевидной кости (SNAC-синдром)

Отсутствие лечения у пациентов с несращениями ладьевидной кости неизбежно приводит к дегенеративным изменениям суставов запястья. По данным более чем 30-летнего наблюдения пациентов с последствиями переломов ладьевидной кости, установлено, что при сросшихся переломах остеоартроз развился только у одного пациента из 57 (менее 2 %), а при несращениях многократно чаще — у 5 пациентов из 9 [50].

Остеоартроз лучезапястного и среднезапястного суставов обозначается как прогрессирующий коллапс запястья или SNAC-синдром, который в первую очередь поражает лучезапястный сустав в области шиловидного отростка, вызывая сужение суставной щели (стадия 1). Затем развиваются костные кисты ладьевидной кости и поражается вся ладьевидная ямка (стадия 2), средне-запястный остеоартроз и сужение щели полулунно-головчатого сустава (стадия 3) и диффузное поражение головчатой кости (стадия 4) [51].

Специальное исследование показало, что надёжность этой классификации невелика [52], однако другие классификации не разработаны.

Частота SNAC зависит от локализации перелома ладьевидной кости. Так, у шести пациентов с несращением проксимальных переломов частота SNAC составила 85,7 %, у восьми пациентов с несращением переломов талии — 40,0 % и у восьми с несращениями дистальных переломов — 33,3 % [53].

Выбор метода хирургического лечения определяется, прежде всего, стадией заболевания. Для SNAC I реконструкция ладьевидной кости в сочетании с резекцией шиловидного отростка ладьевидной кости является многообещающим методом. При более тяжелых стадиях для снижения болевого синдрома и сохранения функции запястья выполняют операции денервации, резекции проксимального ряда костей запястья и частичный артродез. Тотальный артродез и тотальная артропластика применяют при панартрите и неудачах «спасительных операций» [54]. Для SNAC I выявлена высокая эффективность артроскопически ассистируемой костной трансплантации без резекции шиловидного отростка [55].

По мнению некоторых авторов, при SNAC II и III успешное применение костных трансплантатов позволяет приостановить прогрессирование артроза, поэтому следует предпочесть этот метод четырёхстороннему артродезу [56].

Авторы мета-анализа 40 публикаций (1730 пациентов) о затратности и эффективности основных операций [57] пришли к выводу, что четырёхугольный артродез с фиксацией винтами и резекция проксимального ряда костей запястья имеют низкий уровень осложнений и являются эффективными. Четырёхугольный артродез с фиксацией пластинами и спицами Киршнера не соответствует стандартам затратности и эффективности.

Из 10 пациентов со SNAC IV, пролеченных методом четырёхугольного артродеза с применением спиц Киршнера, у семи достигнуты хорошие результаты по модифицированной шкале Mayo, интраоперационных осложнений не было [58].

Однако некоторые авторы на основании результатов лечения шести пациентов делают вывод о том, что применение ретроградных винтов при четырёхугольном артродезе является золотым стандартом [59].

Сравнительный мета-анализ отдалённых функциональных результатов резекции проксимального ряда костей запястья и четырёхугольного артродеза, выполненный на основе 7 исследований на 1059 запястьях, показал, что резекция проксимального ряда костей запястья обеспечивает больший объём движений и меньшую частоту осложнений. Сила кистевого схвата и частота конверсии в тотальный артродез не имеют значимых отличий [60].

Однако если дегенеративный процесс захватывает средне-запястный сустав, одна резекция проксимального ряда костей запястья противопоказана. Для замещения суставной поверхности головчатой кости при резекции проксимального ряда костей запястья применяют пирокарбоновые импланты [61].

В качестве альтернативы четырёхстороннему артродезу применяют частичный артродез, он позволяет стабилизировать именно те компоненты запястья, которые поражены дегенеративными изменениями и вызывают болевой синдром, в то время как интактные суставы остаются мобильными [62]. Авторы считают, что этот подход позволяет уменьшить частоту осложнений и улучшить функциональные результаты по сравнению с четырёхсторонним артродезом.

Сравнительно недавно разработаны менее инвазивные по сравнению с четырёхугольным артродезом методики, которые названы одноколонным (головчато-полулунным) артродезом [63] и двухколонным артродезом, который помимо головчато-полулунного артродеза включает артродез между трёхгранной и крючковидной костью [64]. Анализ результатов применения этих методик у 78 пациентов показал сращение в 95 % случаев, приемлемую частоту осложнений, достоверное снижение болевого синдрома и улучшение функциональных показателей, однако у трёх пациентов выполнена конверсия в тотальный артродез запястья, у одного — в тотальную артропластику запястья [65].

Сравнительный анализ результатов частичного межзапястного артродеза и резекции проксимального ряда костей запястья показал, что через 3,5 года у всех пациентов с резекцией проксимального ряда костей запястья отмечали прогрессирование остеоартроза, в группе с частичным артродезом — только у 19 %. Объём движений и сила кистевого схвата сопоставимы у мужчин и лучше после ограниченного артродеза у женщин [66]. Авторы делают вывод о необходимости дальнейших сравнительных исследований эффективности разных методик лечения.

ОБСУЖДЕНИЕ

Расположение ладьевидной кости обуславливает высокую распространенность ее переломов среди переломов костей запястья. Особенности кровоснабжения ладьевидной кости способствуют частым случаям аваскулярного некроза, а также замедленному сращению и несращению перелома. Диагностика перелома ладьевидной кости представляет сложную задачу в остром периоде, так как рутинная рентгенография может упустить до 40 % случаев перелома. Для улучшения прогноза результата лечения необходимо ввести в рядовую практику специфические клинические тесты, такие как надавливание в области «анатомической табакерки» и осевая нагрузка на первый палец. Разработка прогностических формул на основе нескольких параметров, включая пол, отек и болезненность, может значительно снизить количество случаев гиподиагностики, несмотря на низкую специфичность тестов. Для повышения точности диагностики переломов ладьевидной кости необходимо применять многоуровневый подход, который сочетает клинические данные, различные методы визуализации и алгоритмы диагностики.

Для выбора метода хирургического лечения несращений переломов ладьевидной кости (остеосинтез компрессирующими винтами, некрэктомия и костные трансплантаты либо «спасительные» операции) применима известная тактическая классификация. Тактика лечения пациентов с SNAC-синдромом традиционно определяется в зависимости от стадии заболевания: при SNAC 1 показаны реконструктивные вмешательства на ладьевидной кости с резекцией шиловидного отростка лучевой кости, при прогрессировании заболевания SNAC 2–3 с целью купирования болевого синдрома выполняют спасательные операции (четырёхугольный артродез и резекция проксимального ряда). Следует отметить, что в хирургии запястья находит всё более широкое применение артроскопия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом, проблема диагностики переломов ладьевидной кости требует мультидисциплинарного подхода и применения комплексных методов, чтобы улучшить исходы для пациентов и снизить риск гиподиагностики. SNAC-синдром — это состояние, которое влияет на качество жизни, так как приводит к ограничению диапазона движений, стойкому болевому синдрому, снижению силы хвата запястья.

Методы лучевой диагностики крайне важны для диагностики переломов ладьевидной кости и их последствий, но в случае развития SNAC-синдрома окончательное определение стадии заболевания происходит во время операции. Своевременное достижение сращения перелома ладьевидной кости является профилактикой карпальной нестабильности. Для этого разработаны различные хирургические методы лечения, выбор которых необходимо осуществлять с учётом тактической классификации несращений.

При развитии артроза запястья некоторые авторы считают необходимым исчерпать возможности консервативного лечения до того, как предлагать хирургическое лечение. При выборе хирургического метода при SNAC-синдроме, наряду со стадией заболевания, необходимо учитывать функциональные потребности пациента. Мета-анализы отмечают необходимость дальнейших исследований для оценки эффективности различных методов лечения. В хирургии запястья находит всё более широкое применение артроскопическая техника, улучшающая возможности диагностики и малоинвазивного лечения.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Авторы не получали финансирования на проведение данной работы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Shahabpour M, Abid W, Van Overstraeten L, De Maeseneer M. Wrist Trauma: More Than Bones. *J Belg Soc Radiol.* 2021;105(1):90. doi: 10.5334/jbsr.2709.
- Czarnecki P, Siemionow M, Baek GH, et al. Hand and wrist - what the hand surgeon wants to know from the radiologist. *Pol J Radiol.* 2024;89:e70-e79. doi: 10.5114/pjr.2024.135304.
- D'Itri L, Gattuso MS, Cobisi CD, et al. Bilateral Scaphoid Fractures: A Systematic Literature Review. *J Pers Med.* 2024;14(4):424. doi: 10.3390/jpm14040424.
- Gray RRL, Halpern AL, King SR, Anderson JE. Scaphoid fracture and nonunion: new directions. *J Hand Surg Eur Vol.* 2023;48(2 suppl):4S-10S. doi: 10.1177/17531934231165419.
- Maris S, Apergis E, Apostolopoulos A, et al. Scapholunate Advanced Collapse (SLAC) and Scaphoid Nonunion Advanced Collapse (SNAC): A Review of Treatment Options for Stage II. *Cureus.* 2024;16(4):e59014. doi: 10.7759/cureus.59014.
- Rhemrev SJ, Ootes D, Beeres FJ, et al. Current methods of diagnosis and treatment of scaphoid fractures. *Int J Emerg Med.* 2011;4:4. doi: 10.1186/1865-1380-4-4.
- Van Tassel DC, Owens BD, Wolf JM. Incidence estimates and demographics of scaphoid fracture in the U.S. population. *J Hand Surg Am.* 2010;35(8):1242-1245. doi: 10.1016/j.jhsa.2010.05.017.
- Sommerkamp TG. Hand and Wrist Injuries in Baseball: Scaphoid Fractures. In: Lourie GM. (ed.) *Hand and Wrist Injuries in Baseball.* Springer, Cham. Publ.; 2022:21-34. doi: 10.1007/978-3-030-81659-9_2.
- Alsawadi A, Stanton J. Scaphoid fracture in the elderly: a review. *Hand Surg.* 2012;17(2):295-298. doi: 10.1142/S0218810412300021.
- Jørgsholm P, Ossowski D, Thomsen N, Björkman A. Epidemiology of scaphoid fractures and non-unions: A systematic review. *Handchir Mikrochir Plast Chir.* 2020;52(5):374-381. English. doi: 10.1055/a-1250-8190.
- Bulstra AE, Doornberg JN, Buijze GA, Bain GI. Anatomy of the Scaphoid Bone and Ligaments. In: *Scaphoid Fractures: Evidence-Based Management: Evidence-Based Management.* Elsevier Inc. Publ.; 2018:21-34. doi: 10.1016/B978-0-323-48564-7.00003-4.
- Ahrend MD, Teunis T, Noser H, et al. 3D computational anatomy of the scaphoid and its waist for use in fracture treatment. *J Orthop Surg Res.* 2021;16(1):216. doi: 10.1186/s13018-021-02330-8.
- Haisman JM, Rohde RS, Weiland AJ; American Academy of Orthopaedic Surgeons. Acute fractures of the scaphoid. *J Bone Joint Surg Am.* 2006;88(12):2750-2758. doi: 10.2106/00004623-200612000-00026.
- Berger RA. The anatomy of the scaphoid. *Hand Clin.* 2001;17(4):525-532.
- Sauerbier M, Germann G, Dacho A. Current Concepts in the Treatment of Scaphoid Fractures. *Eur J Trauma.* 2004;30(2):80-92. doi: 10.1007/s00068-004-1408-7.
- Vannabouathong C, Schemitsch E, Petrisor B, Bhandari M. Closed Limb Fractures With Compromised Vascularization: A Narrative Review. *Clin Med Insights Arthritis Musculoskelet Disord.* 2019;12:1179544119836742. doi: 10.1177/1179544119836742.
- Tysver T, Jawa A. Fractures in brief: scaphoid fractures. *Clin Orthop Relat Res.* 2010;468(9):2553-2555. doi: 10.1007/s11999-010-1261-4.
- Trumble TE, Salas P, Barthel T, Robert KQ 3rd. Management of scaphoid nonunions. *J Am Acad Orthop Surg.* 2003;11(6):380-391. doi: 10.5435/00124635-200311000-00002.
- Nguyen Q, Chaudhry S, Sloan R, et al. The clinical scaphoid fracture: early computed tomography as a practical approach. *Ann R Coll Surg Engl.* 2008;90(6):488-491. doi: 10.1308/003588408X300948.
- Parvizi J, Wayman J, Kelly P, Moran CG. Combining the clinical signs improves diagnosis of scaphoid fractures. A prospective study with follow-up. *J Hand Surg Br.* 1998;23(3):324-327. doi: 10.1016/s0266-7681(98)80050-8.
- Grover R. Clinical assessment of scaphoid injuries and the detection of fractures. *J Hand Surg Br.* 1996;21(3):341-343. doi: 10.1016/s0266-7681(05)80197-4.
- Mallee WH, Walenkamp MMJ, Mulders MAM, et al. Detecting scaphoid fractures in wrist injury: a clinical decision rule. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2020;140(4):575-581. doi: 10.1007/s00402-020-03383-w.
- Bäcker HC, Wu CH, Strauch RJ. Systematic Review of Diagnosis of Clinically Suspected Scaphoid Fractures. *J Wrist Surg.* 2020;9(1):81-89. doi: 10.1055/s-0039-1693147.
- Herbert TJ, Fisher WE. Management of the fractured scaphoid using a new bone screw. *J Bone Joint Surg Br.* 1984;66(1):114-123. doi: 10.1302/0301-620X.66B1.6693468.
- Ten Berg PW, Drijckoning T, Strackee SD, Buijze GA. Classifications of Acute Scaphoid Fractures: A Systematic Literature Review. *J Wrist Surg.* 2016;5(2):152-159. doi: 10.1055/s-0036-1571280.
- Clementson M, Björkman A, Thomsen NOB. Acute scaphoid fractures: guidelines for diagnosis and treatment. *EFORT Open Rev.* 2020;5(2):96-103. doi: 10.1302/2058-5241.5.190025.
- Szabo RM, Manske D. Displaced fractures of the scaphoid. *Clin Orthop Relat Res.* 1988;(230):30-38.
- Clementson M, Jørgsholm P, Besjakov J, et al. Union of Scaphoid Waist Fractures Assessed by CT Scan. *J Wrist Surg.* 2015;4(1):49-55. doi: 10.1055/s-0034-1398472.
- Jørgsholm P, Thomsen NO, Björkman A, et al. The incidence of intrinsic and extrinsic ligament injuries in scaphoid waist fractures. *J Hand Surg Am.* 2010;35(3):368-374. doi: 10.1016/j.jhsa.2009.12.023.
- Gray RRL, Halpern AL, King SR, Anderson JE. Scaphoid fracture and nonunion: new directions. *J Hand Surg Eur Vol.* 2023;48(2 suppl):4S-10S. doi: 10.1177/17531934231165419.
- Bumbaširević M, Tomić S, Lešić A, et al. The treatment of scaphoid nonunion using the Ilizarov fixator without bone graft, a study of 18 cases. *J Orthop Surg Res.* 2011;6:57. doi: 10.1186/1749-799X-6-57.
- Yin Y, Xu K, Zhang N, et al. Clinical and Epidemiological Features of Scaphoid Fracture Nonunion: A Hospital-Based Study in Beijing, China. *Orthop Surg.* 2022;14(10):2455-2461. doi: 10.1111/os.13478.
- Zura R, Xiong Z, Einhorn T, et al. Epidemiology of Fracture Nonunion in 18 Human Bones. *JAMA Surg.* 2016;151(11):e162775. doi: 10.1001/jamasurg.2016.2775.
- Prabhakar P, Wessel L, Nguyen J, et al. Factors Associated with Scaphoid Nonunion following Early Open Reduction and Internal Fixation. *J Wrist Surg.* 2020;9(2):141-149. doi: 10.1055/s-0039-3402769.
- Григорьевский В., Страфун С., Тимошенко С. Гистопатология тканей кистевого сустава и некоторые клинко-морфологические корреляции у больных с последствиями переломов ладьевидной кости. *Гений ортопедии.* 2017;23(1):30-37. doi: 10.18019/1028-4427-2017-23-1-30-37.
- Slade JF 3rd, Merrell GA, Geissler WB, Geissler WB. Fixation of acute and selected nonunion scaphoid fractures. In: Geissler WB. (ed.) *Wrist Arthroscopy.* New York: Springer; 2005:112-124.
- Sailer S, Lechner S, Floßmann A, et al. Treatment of scaphoid fractures and pseudarthroses with the human allogeneic cortical bone screw. A multicentric retrospective study. *J Orthop Traumatol.* 2023;24(1):6. doi: 10.1186/s10195-023-00686-7.
- Губочкин Н.Г., Микитюк С.И., Иванов В.С. Пересадка кровоснабжаемых костных трансплантатов для лечения ложных суставов и дефектов костей. *Гений ортопедии.* 2014;(4):5-10.

39. Chang MA, Bishop AT, Moran SL, Shin AY. The outcomes and complications of 1,2-intercompartmental suprapole artery pedicle vascularized bone grafting of scaphoid nonunions. *J Hand Surg Am.* 2006;31(3):387-396. doi: 10.1016/j.jhsa.2005.10.019.
40. Hirche C, Heffinger C, Xiong L, et al. The 1,2-intercompartmental suprapole artery vascularized bone graft for scaphoid nonunion: management and clinical outcome. *J Hand Surg Am.* 2014;39(3):423-429. doi: 10.1016/j.jhsa.2013.10.028.
41. Straw RG, Davis TR, Dias JJ. Scaphoid nonunion: treatment with a pedicle vascularized bone graft based on the 1,2 intercompartmental suprapole artery branch of the radial artery. *J Hand Surg Br.* 2002;27(5):413. doi: 10.1054/jhsb.2002.0808.
42. Pinder RM, Brkljac M, Rix L, et al. Treatment of Scaphoid Nonunion: A Systematic Review of the Existing Evidence. *J Hand Surg Am.* 2015;40(9):1797-1805.e3. doi: 10.1016/j.jhsa.2015.05.003.
43. Fujihara Y, Yamamoto M, Hidaka S, et al. Vascularised versus non-vascularised bone graft for scaphoid nonunion: Meta-analysis of randomised controlled trials and comparative studies. *JPRAS Open.* 2022;35:76-88. doi: 10.1016/j.jpra.2022.12.001.
44. Rancy SK, Swannstrom MM, DiCarlo EF, et al. Success of scaphoid nonunion surgery is independent of proximal pole vascularity. *J Hand Surg Eur Vol.* 2018;43(1):32-40. doi: 10.1177/1753193417732003.
45. Lamon B, Ardouin L, Bellemère P, et al. Arthroscopic Bone Grafting for Scaphoid Nonunion: A Retrospective Study of 42 Cases. *J Hand Surg Asian Pac Vol.* 2021;26(4):545-554. doi: 10.1142/S242483552150051X.
46. Kawamura K, Chung KC. Treatment of scaphoid fractures and nonunions. *J Hand Surg Am.* 2008;33(6):988-997. doi: 10.1016/j.jhsa.2008.04.026.
47. Aldairi MM, Sindi GJ. Treatment of scaphoid fracture non-union: a systematic review of the current evidence. *IJMDC.* 2024; 8(1):305-314. doi: 10.24911/IJMDC.51-1697184483.
48. Bari M, Konchada S, Pradhan S, et al. Management of Scaphoid Nonunion (SNU) With Ilizarov Ring Fixator Using Two Olive Wire Compression Without Bone Grafting: A Case Series. *Cureus.* 2022;14(11):e31646. doi: 10.7759/cureus.31646.
49. Eggli S, Fernandez DL, Beck T. Unstable scaphoid fracture nonunion: a medium-term study of anterior wedge grafting procedures. *J Hand Surg Br.* 2002;27(1):36-41. doi: 10.1054/jhsb.2001.0651.
50. Dürpe H, Johnell O, Lundborg G, et al. Long-term results of fracture of the scaphoid. A follow-up study of more than thirty years. *J Bone Joint Surg Am.* 1994;76(2):249-252. doi: 10.2106/00004623-199402000-00012.
51. Vender MI, Watson HK, Wiener BD, Black DM. Degenerative change in symptomatic scaphoid nonunion. *J Hand Surg Am.* 1987;12(4):514-519. doi: 10.1016/s0363-5023(87)80198-3.
52. Penteado FT, Dos Santos JB, Caporino FA, et al. Scaphoid nonunion advanced collapse classifications: a reliability study. *J Hand Microsurg.* 2012;4(1):12-15. doi: 10.1007/s12593-012-0062-2.
53. Moritomo H, Tada K, Yoshida T, Masatomi T. The relationship between the site of nonunion of the scaphoid and scaphoid nonunion advanced collapse (SNAC). *J Bone Joint Surg Br.* 1999;81(5):871-876. doi: 10.1302/0301-620x.81b5.9333.
54. Meier R. Treatment options for scaphoid nonunion advanced collapse. *Unfallchirurg.* 2019;122(3):211-218. (In German). doi: 10.1007/s00113-019-0631-y.
55. Lee YK, Jung YR. Arthroscopy-assisted bone grafting for the treatment of SNAC stage I without radial styloidectomy. *Medicine (Baltimore).* 2022;101(32):e29930. doi: 10.1097/MD.00000000000029930.
56. De Cheveigne C. Long-Term Results of Scaphoid Grafting in 52 SNAC Wrists: Should We Cut Down on Salvage Procedures? *J Hand Surg.* 2018;43(9):54-55. doi: 10.1016/j.jhsa.2018.06.104.
57. Daar DA, Shah A, Mirrer JT, et al. Proximal Row Carpectomy versus Four-Corner Arthrodesis for the Treatment of Scapholunate Advanced Collapse/Scaphoid Nonunion Advanced Collapse Wrist: A Cost-Utility Analysis. *Plast Reconstr Surg.* 2019;143(5):1432-1445. doi: 10.1097/PRS.0000000000005558.
58. El-Mowafi H, El-Hadidi M, Boghdady GW, Hasanein EY. Functional outcome of four-corner arthrodesis for treatment of grade IV scaphoid non-union. *Acta Orthop Belg.* 2007;73(5):604-611.
59. Ghargozloo D, Tomarchio A, Ballerini M, et al. High results and lower cost in four-bone arthrodesis with retrograde screws. *Med Glas (Zenica).* 2022;19(1):75-78. doi: 10.17392/1450-21.
60. Chammass PE, Hadouiri N, Chammass M, et al. Proximal row carpectomy generates better mid- to long-term outcomes than four-corner arthrodesis for post-traumatic wrist arthritis: A meta-analysis. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2022;108(7):103373. doi: 10.1016/j.otsr.2022.103373.
61. Bastard C, Goubier JN, Teboul F. Proximal Row Carpectomy with Resurfacing Capitate Pyrocarbon Implant with Bone Graft for Scaphoid Nonunion Advanced Collapse III Wrist with Total Intramedullary Bone Resorption of the Capitate: A Case Report. *J Orthop Case Rep.* 2018;8(4):35-37. doi: 10.13107/jocr.2250-0685.1148.
62. Hegazy G. Capitulate Arthrodesis for Treatment of Scaphoid Nonunion Advanced Collapse (SNAC) Wrist Arthritis. *J Hand Microsurg.* 2015;7(1):79-86. doi: 10.1007/s12593-015-0182-6.
63. Goubier JN, Teboul F. Capitulate arthrodesis with compression screws. *Tech Hand Up Extrem Surg.* 2007;11(1):24-28. doi: 10.1097/bth.0b013e31802caa87.
64. Wang ML, Bednar JM. Lunatocapitate and triquetrohamate arthrodeses for degenerative arthritis of the wrist. *J Hand Surg Am.* 2012;37(6):1136-1141. doi: 10.1016/j.jhsa.2012.03.023.
65. Solgård L, Gvozdenovic R. Single- and Bicolonn Limited Intercarpal Fusion: A Solution for the SLAC or SNAC Wrist. *J Wrist Surg.* 2023;13(1):16-23. doi: 10.1055/s-0043-1762932.
66. Gvozdenovic R, Schioedt MA, Solgaard L, et al. Limited intercarpal fusion versus proximal row carpectomy in the treatment of SLAC or SNAC wrist, results after 3.5 years. *J Orthop Surg Res.* 2023;18(1):681. doi: 10.1186/s13018-023-04177-7.

Статья поступила 27.09.2024; одобрена после рецензирования 16.12.2024; принята к публикации 20.01.2025.

The article was submitted 27.09.2024; approved after reviewing 16.12.2024; accepted for publication 20.01.2025.

Информация об авторах:

Наталья Анатольевна Шудло — доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник, nshchudlo@mail.ru;
Шынғыс Кайырбекулы Куттыгул — аспирант, artana.kaz@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-1072-468X>.

Information about the authors:

Natalya A. Shchudlo — Doctor of Medical Sciences, Leading Researcher, nshchudlo@mail.ru;
Shyngys K. Kuttygul — graduate student, artana.kaz@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-1072-468X>.

Вклад авторов

Шудло Н.А. — концепция статьи, критический анализ литературы, написание и редактирование текста.
Куттыгул Ш.К. — написание и редактирование текста, графическое оформление статьи.

Обзорная статья

УДК 616.727.8/.9-004.8-089.844-74

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-1-101-109>

Восстановление функции пальцев кисти при дефектах суставов

Ю.С. Волкова✉, Л.А. Родоманова

Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Р.Р. Вредена, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Юлия Станиславовна Волкова, volkoways@mail.ru

Аннотация

Введение. Замещение дефектов костной ткани на кисти остается сложной задачей, несмотря на прогрессивное развитие кистевой хирургии и непрерывное совершенствование оперативных методик. При этом основная трудность по-прежнему заключается в восстановлении функции поврежденного сегмента, когда дефект затрагивает функционально значимые суставы, какими являются проксимальный межфаланговый и пястно-фаланговые суставы пальцев кисти. Утрата нормальной подвижности в этих суставах в значительной мере снижает физические возможности пациентов и ухудшает качество их жизни. Поэтому любое реконструктивное вмешательство направлено, прежде всего, на попытку восстановления полезной амплитуды движений поврежденного пальца с минимальными рисками возникновения послеоперационных осложнений.

Цель работы — на основании анализа литературы оценить современное состояние проблемы восстановления функции и эффективность существующих методик, используемых при замещении дефектов суставов пальцев кисти.

Материалы и методы. Поиск и подбор литературы за период с 2008 по 2024 год проведен в базах данных и электронных библиотеках PubMed, Elsevier, Google Scholar, eLIBRARY по ключевым словам: дефекты суставов пальцев, костный дефект, внутрисуставные повреждения пальцев кисти, артропластика, эндопротезирование мелких суставов, реконструкция суставов пальцев кисти, восстановление суставов, пястно-фаланговый сустав, проксимальный межфаланговый сустав, костный трансплантат, пересадка сустава, joint defects, bone loss, joint injuries, joint reconstruction, metacarpophalangeal joint, proximal interphalangeal joint, bone grafting, joint transplantation, joint transfer, arthroplasty, reconstruction, microsurgery, vascular bone joint transfer. Для анализа отобрано 60 статей зарубежных авторов и 11 публикаций отечественных исследователей по исследуемой теме.

Результаты и обсуждение. При всем многообразии предложенных оперативных методик не существует универсального способа замещения дефектов суставов пальцев кисти. Наряду с высоким процентом возникающих послеоперационных осложнений, отсутствие оптимального метода требует тщательного предоперационного планирования в каждом клиническом случае. Реконструктивные вмешательства следует рассматривать в качестве метода выбора и альтернативы артродезу в большей степени у молодых, физически активных пациентов. Низкая послеоперационная амплитуда движений в восстанавливаемом суставе продолжает оставаться нерешенной проблемой лечения пациентов с данной патологией. Кроме того, определяющим фактором при выборе тактики остается комплаентность пациента сложному и длительному реабилитационному лечению, необходимому для получения функционально удовлетворяющего результата.

Заключение. Реконструктивные вмешательства для замещения костного дефекта в области сустава позволяют увеличить полезный диапазон движений поврежденного пальца и улучшить физические способности кисти. Однако большой процент возникающих послеоперационных осложнений, значительная травматизация донорских зон и неудовлетворяющая функциональная амплитуда движений в оперированном суставе являются причиной для продолжения совершенствования оперативных методик.

Ключевые слова: дефекты суставов пальцев, костный дефект, внутрисуставные повреждения пальцев кисти, артропластика, эндопротезирование мелких суставов, реконструкция суставов пальцев кисти, восстановление суставов, пястно-фаланговый сустав, проксимальный межфаланговый сустав, костный трансплантат, пересадка сустава

Для цитирования: Волкова Ю.С., Родоманова Л.А. Восстановление функции пальцев кисти при дефектах суставов. *Гений ортопедии*. 2025;31(1):101-109. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-101-109.



Reconstruction of finger function in case of joint defects

Yu.S. Volkova✉, L.A. Rodomanova

Vreden National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics,
Saint-Petersburg, Russian Federation

Corresponding author: Yulia S. Volkova, volkoways@mail.ru

Abstract

Introduction Repair of bone defects in the hand is still a challenge despite advancements in hand surgery and improved surgical techniques. However, the main difficulty still lies in restoring the function of the injured segment when the defect affects functionally significant joints including the proximal interphalangeal and metacarpophalangeal joints of the fingers. Loss of mobility in the joints significantly impairs the physical capabilities of patients and the quality of life. A reconstructive intervention is primarily aimed at restoration of the useful range of motion of the involved finger with minimal risks of postoperative complications.

The **objective** was to evaluate the possibilities with finger function restoration and the effectiveness of the techniques used to repair defects in the fingers joints based on literature analysis.

Material and methods The original literature search was conducted on key resources including Scientific Electronic Library (www.elibrary.ru) and the National Library of Medicine (www.pubmed.org), Elsevier, Google Scholar (2008 to 2024) and using keywords: finger joint defects, bone loss, intra-articular injuries of the fingers, arthroplasty, small joint replacement, reconstruction of finger joints, joint restoration, metacarpophalangeal joint, proximal interphalangeal joint, bone graft, joint transplantation, joint transfer, microsurgery, vascular bone joint transfer. Sixty articles by foreign authors and 11 publications of Russian researchers were selected for analysis.

Results and discussion With the variety of surgical techniques, there is no universal method for replacing defects in the finger joints. Along with the high rate of postoperative complications, the lack of an optimal method requires careful preoperative planning. Reconstructive interventions should be considered as a method of choice and an alternative to arthrodesis in young, physically active patients. Limited postoperative range of motion in the reconstructed joint is a challenge in the treatment of patients with this pathology. The choice of surgical strategy relies on the patient's compliance for a complex and lengthy rehabilitation in achievement of a functionally satisfying result.

Conclusion Reconstructive interventions for repair of a bone defect in the joint are practical for increasing the useful range of motion of the involved finger and improving the physical capabilities of the hand.

Keywords: finger joint defects, bone defect, intra-articular injuries of the fingers, arthroplasty, small joint replacement, finger joint reconstruction, joint restoration, metacarpophalangeal joint, proximal interphalangeal joint, bone graft, joint transplant

For citation: Volkova YuS, Rodomanova LA. Reconstruction of finger function in case of joint defects. *Genij Ortopedii*. 2025;31(1):101-109. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-101-109.

ВВЕДЕНИЕ

Дефекты костной ткани кисти являются распространённой проблемой, которая в значительной мере снижает функциональные возможности пациентов и ухудшает качество их жизни. Наиболее часто костные дефекты становятся следствием одной из трех основных причин: травматической, инфекционной или опухолевой [1]. Помимо причины возникновения дефекта, во многом выбор хирургической техники определяет его локализация и размер, а также наличие сопутствующих повреждений сосудисто-нервных структур, сухожилий и/или дефекта мягких тканей [1, 2].

Решающую роль в функционировании кисти играют пястно-фаланговый и проксимальный межфаланговый суставы, обеспечивая не только основной диапазон движений пальцев, но и способность к их точному позиционированию для осуществления мелкой моторики [3]. Кроме того, зачастую костные дефекты наблюдаются у молодых активных пациентов с высокими функциональными запросами. Поэтому восстановление и сохранение оптимальной амплитуды движений в этих суставах в случае их сложного повреждения является одной из целей любого реконструктивного вмешательства [4, 5]. При этом цель оперативного лечения заключается не только в анатомическом замещении дефекта, но и в увеличении функциональной амплитуды движений пальца, которая позволит пациенту использовать его в повседневной жизни [1].

Несмотря на существование различных методик замещения костных дефектов в экстренном или плановом порядке и множество вариаций их исполнения, в настоящее время все они, так или иначе, сопряжены с высоким риском развития послеоперационных осложнений и имеют ряд противопоказаний [2, 6]. Поэтому выбор способа реконструкции суставов пальцев кисти остается сложной задачей, однозначного решения которой до сих пор не найдено [3]. Отсутствие «золотого стандарта» в лечении пациентов с данной патологией, а также высокая частота ее встречаемости преимущественно у трудоспособного населения определяет значимость проблемы лечения пациентов с дефектами пястно-фаланговых и проксимальных межфаланговых суставов пальцев кисти.

Цель работы — на основании анализа литературы оценить современное состояние проблемы восстановления функции и эффективность существующих методик, используемых при замещении дефектов суставов пальцев кисти.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Поиск и подбор литературы проведен в базах данных и электронных библиотеках PubMed, Elseiver, Google Scholar, eLIBRARY по ключевым словам и словосочетаниям: дефекты суставов пальцев, костный дефект, внутрисуставные повреждения пальцев кисти, артропластика, эндопротезирование мелких суставов, реконструкция суставов пальцев кисти, восстановление суставов, пястно-фаланговый сустав, проксимальный межфаланговый сустав, костный трансплантат, пересадка сустава, joint defects, bone loss, joint injuries, joint reconstruction, metacarpophalangeal joint, proximal interphalangeal joint, bone grafting, joint transplantation, joint transfer, arthroplasty, reconstruction, microsurgery, vascular bone joint transfer. Для анализа рассматриваемой проблемы отобрано 60 статей зарубежных и 11 публикаций отечественных авторов по исследуемой теме за период с 2008 по 2024 год.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полезная амплитуда движений пальцев кисти

Потеря нормальной подвижности в пальцах и снижение функциональных возможностей кисти могут быть крайне тягостными для пациента. По данным различных источников, активный диапазон движений (амплитуда полного сгибания) в пястно-фаланговых суставах (ПФС) составляет 0–100° (в среднем 84°), в проксимальных межфаланговых суставах (ПМФС) — 0–105° (в среднем 105°), в дистальных межфаланговых суставах (ДМФС) — 0–85° (в среднем 69°) [7, 8]. При этом для выполнения большей части повседневных физических действий полная амплитуда сгибания пальцев не требуется, так как достаточно функционального диапазона, который варьирует для ПФС в пределах 19–71° (в среднем 61°), для ПМФС — 23–87° (в среднем 60°) и ДМФС — 10–64° (в среднем 39°) [8, 9]. Поэтому оперативное лечение в различных своих вариациях в основном направлено на достижение функционального диапазона движений в поврежденном пальце, что способствует улучшению качества жизни пациента.

Виды оперативных вмешательств

Выбор хирургической тактики начинается с определения локализации и размера дефекта. По данным некоторых авторов, ключевыми факторами, влияющими на принятие решения, являются возраст пациента и уровень его повседневной активности, а также комплаентность предполагаемому плану лечения [10, 11, 12, 13].

Операция может быть направлена на устранение движений в поврежденном суставе (артродез) или восстановление его функции с помощью реконструктивного вмешательства. При невозможности выполнения реконструктивной операции или при наличии противопоказаний к ней, артродез является методом выбора, но имеет основной недостаток — неподвижность [2, 11, 14]. Однако в условиях значительного повреждения мягких тканей (в том числе, при наличии дефекта сухожилий и нервов) укорочение и артродез сустава в функционально выгодном положении избавляют от необходимости проведения неоднократных оперативных вмешательств, что может стать лучшим вариантом для пациента, который заинтересован в скорейшем возвращении к трудовой деятельности [15]. Как и любое хирургическое вмешательство, замыкание сустава сопряжено с рисками послеоперационных осложнений, в частности несращения (несостоятельности артродеза) в 3,9–8,6 % случаев, а также развитием перипростетической инфекции и послеоперационного болевого синдрома [16]. Несмотря на то, что в некоторых случаях конечный результат в виде безболезненной стабильности, обеспечиваемой артродезом, может быть приемлемым для пациента, сохранение подвижности в функционально значимом суставе остается первоначальной целью оперативного лечения [13].

В различных источниках для замещения костного дефекта, реконструкции суставных поверхностей, образующих ПФС или ПМФС, и восстановления подвижности в этих суставах предложены варианты интерпозиционной артропластики [17, 18], артропластики с использованием свободного остеохондрального аутооттрансплантата [14, 19, 20, 21, 22, 23] или аллотрансплантата [2], артропластики кровоснабжаемым костным трансплантатом [12, 24]. Для реконструкции целых ПФС или ПМФС используют кровоснабжаемые или некровоснабжаемые суставы со стопы [4, 6, 10, 25, 26], утильного пальца [27] или эндопротезирование [28, 29].

Интерпозиционная артропластика, в ходе которой поврежденную часть сустава резецируют, а между суставными поверхностями помещают трансплантат, позволяет восстановить некоторую степень подвижности и относительную стабильность сустава. В качестве трансплантата может быть использована фасция, сухожилие, аллоткань или синтетический материал. При достаточной степени фиксации трансплантата может быть начата ранняя мобилизация сустава, что способствует достижению удовлетворительной амплитуды движений в нем. Однако данная методика не позволяет устранить костный дефект суставной поверхности, а выживаемость трансплантата достаточно непродолжительна. С течением времени он трансформируется в рубцовую ткань и утрачивает свои скользящие характеристики, что может приводить к развитию стойких контрактур в поврежденном суставе [17, 18, 30, 31].

Костно-хрящевые аутооттрансплантаты наиболее часто используют в качестве варианта реконструкции. При этом донорскими источниками для восстановления суставной поверхности могут служить основания пястных костей [24], дистальный отдел бедренной кости [12], проксимальный отдел большеберцовой кости [32], суставы стопы [4] или потенциально утильного пальца [27], фрагменты ребер [19, 20].

Преимуществом пластики кровоснабжаемым несвободным костно-хрящевым трансплантатом является меньший риск его резорбции и развития инфекции. Однако ограниченный размер трансплантата и длины сосудистой ножки уменьшает показания к использованию данного метода при реконструкции крупных костных дефектов [13, 24]. Артропластика по типу «hemi-hamate» позволяет заместить костные дефекты суставной поверхности основания средней фаланги при лечении перелома-вывихов в ПМФС (иногда в сочетании с пластикой ладонной пластинкой для придания большей стабильности в суставе) [33, 34]. При этом данная методика не подходит для использования в случае полного отсутствия суставной поверхности, сопряжена с риском развития вывиха в реконструируемом суставе ввиду сложности одномоментного восстановления капсульно-связочного аппарата, резорбции трансплантата и прогрессированием деформирующего артроза с частотой до 16 % [34]. Остеохондральные трансплантаты из мышечка бедренной кости применяют в основном при посттравматических дефектах хрящевой ткани [35, 36], но встречаются примеры использования и при более крупных костных дефектах [12]. Однако данная методика имеет ограничения из-за размера трансплантата и сложности в отношении придания трансплантату формы, сопоставимой с дефектом суставной поверхности. Кроме того, развитие болевого синдрома в донорской зоне, которое требует терапии и коррекции физической активности, является одним из наиболее часто встречаемых послеоперационных осложнений [35].

К безусловным преимуществам использования трансплантата из ребра следует отнести возможности реконструкции поврежденного сустава без воздействия на другие (здоровые) суставы и придания трансплантату любой формы, сопоставимой с размером дефекта, при этом — с минимальным риском последствий для донорской зоны. Такой вариант реконструкции имеет возрастные ограничения

(не рекомендуется у пациентов старше 60 лет ввиду значительного окостенения хряща), трансплантат также подвержен риску перелома, дегенерации хряща и сужению суставной щели. Кроме того, данная методика сопряжена с необходимостью проведения дополнительных вмешательств для реконструкции капсульно-связочного аппарата, проведения тенолиза, корригирующей остеотомии в области трансплантата или удаления металлоконструкций с частотой до 40 % [19].

При необходимости восстановления целых суставов или замещения обширного внутрисуставного дефекта встает вопрос о выборе донорской зоны. В этом случае трансплантаты, взятые на кисти, наиболее технически доступны и подходят анатомически. Однако, ввиду высокой травматизации донорской зоны, такие трансплантаты для реконструкции используют только в случае, когда имеется сочетанное повреждение нескольких пальцев, один из которых не может быть восстановлен, но может быть использован в качестве донорского трансплантата [26, 27, 37, 38].

В некоторых источниках для замещения обширных дефектов пястно-фаланговых суставов встречаются варианты комбинированного применения костных трансплантатов для замещения дефекта пястной кости с восстановлением подвижности сустава с помощью силиконового эндопротеза [39, 40]. По мнению авторов, свободный кровоснабжаемый трансплантат из малоберцовой кости является идеальным вариантом для реконструкции дефектов пястных костей, при этом забор такого трансплантата технически менее сложен по сравнению с другими свободными кровоснабжаемыми трансплантатами [39].

Аллотрансплантаты обладают хорошими остеоиндуктивными свойствами и могут быть применены для реконструкции в случае, когда другие методики трудно выполнимы или противопоказаны [2]. Их использование не сопряжено с травматизацией здоровых тканей, однако они менее устойчивы к инфекции, чаще подвергаются отторжению или прогрессирующей резорбции с риском развития переломов/несращения, что в дальнейшем может потребовать установки эндопротеза [41]. Кроме того, замещение дефекта с использованием аллотрансплантата требует сохранного связочного аппарата для достижения стабильности в суставе, что не всегда осуществимо в случае сложного повреждения пальца [6].

Эндопротезирование чаще является методом выбора для лечения посттравматического или любого иного видов артроза ПМФС и ПФС у пациентов старшей возрастной группы. Однако в некоторых случаях данный способ применяют при острых внутрисуставных повреждениях, когда травматический дефект фаланги или пястной кости эквивалентен резекции сустава и является показанием к установке имплантата [29, 42, 43, 44]. В статьях встречаются примеры эндопротезирования при несросшихся внутрисуставных переломах фаланг пальцев кисти [45].

При всем существующем многообразии видов эндопротезов мелких суставов ни один из них не обладает безусловным преимуществом, особенно в условиях дефицита костной ткани, при дефектах капсульно-связочного аппарата [46] или при наличии послеожоговых контрактур [47, 48]. Поэтому, несмотря на совершенствование современных протезов и хирургической техники, стабилизация компонентов может оказаться труднодостижимой. Кроме того, остается высокий риск инфицирования, значительного снижения амплитуды движений в оперированном пальце, а также развития периимплантных переломов с частотой до 22–35 %, при этом средняя длительность функционирования эндопротеза до ревизионного вмешательства составляет менее 5–7 лет [28, 49, 50, 51, 52, 53]. При этом зачастую после эндопротезирования амплитуда движений в суставе не достигает функционально необходимого значения [54], поэтому более чем в 58 % случаев для улучшения подвижности требуются повторные вмешательства в объеме тенолиза, артролиза, тенодеза, пластики капсульно-связочного аппарата, а в случаях с прогрессирующей нестабильностью — повторной установки компонентов эндопротеза [50, 55, 56, 57]. Кроме того, при выраженной деформации, дефекте костной ткани и несостоятельности связочного аппарата, которые не поддаются коррекции с помощью имплантата, в ходе ревизионных операций часто выполняют артродез сустава [55, 58, 59].

С целью прогнозирования развития рисков послеоперационных осложнений, в частности периимплантных переломов и разрушения компонентов эндопротеза, в некоторых статьях отмечена важность ограничения функциональных нагрузок и исключения крайних положений в оперированном суставе [60], однако эти данные требуют дополнительных исследований.

Пересадку кровоснабжаемого или некровоснабжаемого сустава пальца стопы выполняют в случае, когда эндопротезирование противопоказано или невозможно, а применение другой методики не удовлетворяет конечную цель оперативного вмешательства [10]. Основными показаниями, по мнению многих авторов, являются разрушения сустава у взрослых пациентов молодого возраста, предъявляющих высокие функциональные требования к движениям пальцев кисти [14, 61], у детей [62], а также наличие обширных сложных повреждений мягких тканей [63].

К преимуществам вмешательств данного вида можно отнести сопоставимость костной анатомии донорского и реципиентного суставов, хорошее кровоснабжение, что способствует лучшему сращению, возможность пересадки сустава вместе с сухожилиями, нервами и кожей, что позволяет восполнить этот дефицит в реципиентной зоне. При этом замещение донорского дефекта резецированным поврежденным суставом пальца кисти сводит к минимуму влияние оперативного вмешательства на внешний вид и функциональные возможности донорской стопы [5]. К положительным моментам использования сустава со стопы относятся длительная выживаемость трансплантата, устойчивость к резорбции и инфекции, а также стабильность благодаря переносу вместе с сохранным связочным комплексом.

Кроме возрастных ограничений (возраст пациентов в различных исследованиях варьирует в диапазоне 18–25 лет) и внушительного списка противопоказаний (заболевания периферических сосудов, предшествующая травма донорского участка, прием иммуносупрессоров, курение, аутоиммунные заболевания и др.), данная методика обладает рядом недостатков, таких как техническая сложность выполнения, травматичность для донорской зоны и трудность реабилитационного периода [6, 64].

Основным недостатком этого метода является низкий функциональный диапазон движений, ожидаемый после операции, что связано с анатомическими различиями строения разгибательного аппарата и изначально меньшей амплитудой движений в пальцах стопы. Для коррекции данных анатомических различий применяют различные способы, в том числе поворот донорского сустава во время установки или выполнение косой остеотомии головки плюсневой кости [65, 66]. Однако, несмотря на попытки совершенствования методики пересадки кровоснабжаемого сустава, основной проблемой по-прежнему остается значимый дефицит разгибания в реконструируемом суставе. Согласно данным систематического обзора 2021 г., средняя амплитуда движений в ПМФС после пересадки кровоснабжаемого сустава пальца стопы в среднем составила $(40,3 \pm 12,9)^\circ$ с дефицитом разгибания около 30° [61]. Кроме того, при сравнении функциональных результатов после пересадки кровоснабжаемого сустава стопы и эндопротезирования поврежденного сустава отмечено, что амплитуда движений при реконструкции ПМФС составила $(37 \pm 9)^\circ$ и $(44 \pm 11)^\circ$, а при восстановлении ПФС — $(34 \pm 10)^\circ$ и $(47 \pm 16)^\circ$ соответственно. Авторы отмечают, что лучшая амплитуда движений в ПФС и ПМФС получена после эндопротезирования силиконовыми имплантатами, при этом частота осложнений, требующих ревизионного вмешательства, составила всего 18 % по сравнению с 33 % ревизий после эндопротезирования пирокарбоновым имплантом и 29 % — после пересадки сустава со стопы. На основании полученных данных авторы делают вывод о необходимости дополнительных исследований для сравнения и оценки эффективности эндопротезирования силиконовыми имплантатами и пересадки сустава пальца стопы с целью определения оптимального вида вмешательства [67].

По данным различных авторов, после пересадки суставов пальцев со стопы осложнения (тромбозы анастомозов, дегенеративные изменения в суставе, несращение/сращение с деформацией, переломы, контрактуры, болевой синдром в донорской зоне), требующие повторных оперативных вмешательств, составляют от 22 до 50 % случаев [26, 61]. Наряду с высоким процентом послеоперационных осложнений, неудовлетворительные клинические результаты являются причиной продолжающегося совершенствования хирургических методик для улучшения функциональных показателей и внешнего вида восстанавливаемого пальца, а также уменьшения травматизации донорской зоны [25, 68, 69, 70, 71].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ литературы показал, что замещение внутрисуставных дефектов и восстановление функциональной амплитуды движений пальцев кисти остается нерешенной проблемой современной кистевой хирургии. Существует множество оперативных методик, направленных на восстановление подвижности в утраченном суставе, от малотравматичных (интерпозиционная артропластика) до обширных микрохирургических вмешательств (пересадка сустава со стопы). Каждое из предложенных реконструктивных вмешательств сопряжено с определенным спектром потенциальных послеоперационных осложнений и особенностями реабилитационного периода, поэтому выбор техники должен быть обдуманным и индивидуальным в каждом клиническом случае. При желании пациента восстановить подвижность в утраченном суставе реконструктивные вмешательства необходимо рассматривать в качестве альтернативы артродезу, особенно у молодых и физически активных пациентов. При этом важно учитывать наличие комплаентности пациента сложному и, порой, длительному восстановительному лечению. С целью коррекции низкой послеоперационной амплитуды движений и уменьшения травматичности воздействия на донорские участки продолжаются попытки совершенствования оперативных вмешательств. Большое количество противопоказаний к выполнению обширных реконструктивных операций ограничивает возможности их применения, а наличие дефекта капсульно-связочного аппарата и сухожильных структур пре-

пятствует выполнению эндопротезирования. Осложнения, требующие ревизионных вмешательств, ввиду значительного дефекта костной ткани и стабилизирующих структур иногда вынуждают хирургов прибегнуть к выполнению артродезирования, что может являться разочаровывающим результатом, как для пациента, так и для лечащего врача.

Конфликт интересов. Не заявлен.

Источник финансирования. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Woussen E, Aouzal Z, Pluvy I, et al. Hand and wrist osteo-articular bone defect: induced membrane technique indications. *Hand Surg Rehabil.* 2023;42(2):160-167. doi: 10.1016/j.hansur.2023.01.005.
2. Pagnotta A, Formica VM, Ascione A, et al. Massive bone allograft engineered with autologous vessels: a new perspective for the future. *Hand Surg Rehabil.* 2022;41(5):648-653. doi: 10.1016/j.hansur.2022.06.001.
3. Pappalardo M, Laurence VG, Lin YT. Chimeric Free Vascularized Metatarsophalangeal Joint With Toe Fillet Flap: A Technique for Reconstruction of the Posttraumatic Metacarpophalangeal Joint With Concomitant Soft Tissue Defect. *J Hand Surg Am.* 2018;43(2):193.e1-193.e6. doi: 10.1016/j.jhsa.2017.11.011.
4. Löw S, Spies CK, Erne HC. Long-term preservation of metacarpophalangeal joint function in traumatic defects by metatarsophalangeal osteochondral transplantation. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2023;143(2):1109-1115. doi: 10.1007/s00402-022-04492-4.
5. Pei GX, Ren GH, Ren YJ, Wei KH. Reconstruction of phalangeal articulations of the hand with vascularised phalangeal articulations of foot. *Injury.* 2008;39 Suppl 3:S109-115. doi: 10.1016/j.injury.2008.06.006.
6. Katz RD, Higgins JP. Microvascular toe joint for proximal interphalangeal joint replacement: indications, technique, and outcomes. *Hand Clin.* 2018;34(2):207-216. doi: 10.1016/j.hcl.2017.12.010.
7. Lee KS, Jung MC. Ergonomic evaluation of biomechanical hand function. *Saf Health Work.* 2015;6(1):9-17. doi: 10.1016/j.shaw.2014.09.002.
8. Hume MC, Gellman H, McKellop H, Brumfield RH Jr. Functional range of motion of the joints of the hand. *J Hand Surg Am.* 1990;15(2):240-243. doi: 10.1016/0363-5023(90)90102-w.
9. Bain GI, Polites N, Higgs BG, et al. The functional range of motion of the finger joints. *J Hand Surg Eur Vol.* 2015;40(4):406-411. doi: 10.1177/1753193414533754.
10. Dautel G. Vascularized toe joint transfers to the hand for PIP or MCP reconstruction. *Hand Surg Rehabil.* 2018;37(6):329-336. doi: 10.1016/j.hansur.2018.03.008.
11. Yamamoto M, Chung KC. Joint fusion and arthroplasty in the hand. *Clin Plast Surg.* 2019;46(3):479-488. doi: 10.1016/j.cps.2019.03.008.
12. Nakanishi A, Kawamura K, Omokawa S, et al. Reconstruction of a metacarpal head defect due to bite injury: two case reports. *Case Reports Plast Surg Hand Surg.* 2018;5(1):62-67. doi: 10.1080/23320885.2018.1509717.
13. Zhang X, Fang X, Shao X, et al. The use of a third metacarpal base osteoarticular flap for treatment of metacarpophalangeal joint traumatic defects. *J Hand Surg Am.* 2012;37(9):1791-805. doi: 10.1016/j.jhsa.2012.06.004.
14. Leclère FM, Haug L, Meier R, et al. Non-vascularized partial joint transfer for finger proximal interphalangeal joint reconstruction: a series of 9 patients. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2020;140(1):139-144. doi: 10.1007/s00402-019-03301-9.
15. Tan M, Ho SWL, Sechachalam S. Acute arthrodesis of interphalangeal joints of the hand in traumatic injuries. *J Hand Microsurg.* 2018;10(1):1-5. doi: 10.1055/s-0037-1608691.
16. Millrose M, Gesslein M, Ittermann T, et al. Arthrodesis of the proximal interphalangeal joint of the finger - a systematic review. *EFORT Open Rev.* 2022;7(1):49-58. doi: 10.1530/EOR-21-0102.
17. McCullough MC, Minasian R, Tanabe K, et al. Functional outcomes for meniscal allograft interposition arthroplasty of the hand. *Plast Reconstr Surg Glob Open.* 2021;9(4):e3520. doi: 10.1097/GOX.0000000000003520.
18. Mesa F, López F, Mesa S. Interpositional arthroplasty using mammary capsule for finger joints: a novel technique. *Plast Reconstr Surg Glob Open.* 2019;7(12):e2556. doi: 10.1097/GOX.0000000000002556.
19. Sato K, Iwamoto T, Matsumura N, et al. Total finger joint arthroplasty with a costal osteochondral autograft: up to 11 years of follow-up. *J Hand Surg Eur Vol.* 2019;44(2):167-174. doi: 10.1177/1753193418806195.
20. Satake Y, Nanno M, Kadera N, Takai S. Use of a costal osteochondral graft for reconstruction of a proximal phalanx head with a comminuted fracture of the proximal interphalangeal joint. *J Nippon Med Sch.* 2020;87(1):37-42. doi: 10.1272/jnms.JNMS.2020_87-107.
21. Ushijima T, Arai K. Use of a box-cut osteotomy preserving collateral ligaments in costal osteochondral graft reconstruction of proximal interphalangeal joint cartilage defects. *J Hand Surg Asian Pac Vol.* 2022;27(2):389-393. doi: 10.1142/S2424835522720158.
22. Dai J, Zheng Y, Yang C, et al. Osteochondral autograft from the hamate for treating partial defect of the proximal interphalangeal joint. *J Hand Surg Am.* 2023;48(4):404.e1-404.e10. doi: 10.1016/j.jhsa.2021.11.007.
23. Jung M, Daecke W, Bernd L, et al. Reconstruction of phalanx and metacarpal defects by autologous iliac crest transplants after tumour resection with joint involvement. *Handchir Mikrochir Plast Chir.* 2007;39(6):381-387. (In German) doi: 10.1055/s-2007-965019.
24. Hirose H, Komura S, Hirakawa A, et al. Reverse radiodorsal artery-pedicled thumb metacarpal vascularized bone graft for osteochondral fracture of the thumb interphalangeal joint with a bone defect: A case report. *Microsurgery.* 2021;41(2):170-174. doi: 10.1002/micr.30663.
25. Ju J, Li L, Hou R. Transplantation of a free vascularized joint flap from the second toe for the acute reconstruction of defects in the thumb and other fingers. *Indian J Orthop.* 2019;53(2):357-365. doi: 10.4103/ortho.IJOrtho_200_17.
26. Hierner R, Berger AK. Long-term results after vascularised joint transfer for finger joint reconstruction. *J Plast Reconstr Aesthet Surg.* 2008;61(11):1338-1346. doi: 10.1016/j.bjps.2007.09.035.
27. Mishra A, Whitaker IS, Josty IC. Component separation of the index finger to reconstruct the thumb: case report with review of literature. *Ann Plast Surg.* 2008;61(6):618-621. doi: 10.1097/SAP.0b013e318168d2e2.
28. Xie F, Lan X, Lin J. Arthroplasty for treating traumatic metacarpophalangeal joint defects: a retrospective study over three years. *J Pain Res.* 2021;14:1457-1464. doi: 10.2147/JPR.S299135.
29. Gorani A, Ruijs ACJ. Metacarpal joint arthroplasty in the acute setting: a case report. *J Orthop Case Rep.* 2023;13(11):147-151. doi: 10.13107/jocr.2023.v13.i11.4040.
30. Hery JC, Picart B, Malherbe M, et al. Ligamentoplasty with interposition of the proximal interphalangeal joint in the treatment of unicondylar osteochondral defects: a cadaveric feasibility study. *Arch Plast Surg.* 2021;48(6):635-640. doi: 10.5999/aps.2021.00220.
31. Ланцов Ю.А., Маланин Д.А. Восстановление функции суставов пальцев кисти: реальность и перспективы. Бюллетень Волгоградского научного центра РАМН. 2007;(1):49-51.

32. Борзых А.В., Труфанов И.М., Варин В.В. и др. Комплексное лечение посттравматических дефектов и ложных суставов трубчатых костей кисти. Травма. 2014;15(2):121-124.
33. Thomas BP, Raveendran S, Pallapati SR, Anderson GA. Augmented hamate replacement arthroplasty for fracture-dislocations of the proximal interphalangeal joints in 12 patients. *J Hand Surg Eur Vol.* 2017;42(8):799-802. doi: 10.1177/1753193417707381.
34. Malhotra G, Al Bahri ZH, Elsayed AOA, et al. Hemihamate arthroplasties in pilon fractures: a modified approach and experience in 30 patients. *J Hand Surg Eur Vol.* 2021;46(9):928-935. doi: 10.1177/17531934211008056.
35. Micev AJ, Gaspar MP, Culp RW. Osteochondral autograft transfer for treatment of metacarpophalangeal and interphalangeal cartilage defects. *Tech Hand Up Extrem Surg.* 2016;20(3):108-112. doi: 10.1097/BTH.000000000000128.
36. Kitay A, Waters PM, Bae DS. Osteochondral autograft transplantation surgery for metacarpal head defects. *J Hand Surg Am.* 2016;41(3):457-463. doi: 10.1016/j.jhsa.2015.12.021.
37. Борзых А.В., Соловьев И.А., Погорилык А.И. и др. Лечение внутрисуставных повреждений пальцев кисти. Травма. 2012;13(1):141-143.
38. Козюков В.Г., Токарев А.Е., Ненахова Я.В. Использование поврежденных сегментов при восстановлении функции увечной кисти. *Пермский медицинский журнал.* 2014;31(6):25-30. doi: 10.17816/pmj31625-30.
39. Jones NF, Dickinson BP, Hansen SL. Reconstruction of an entire metacarpal and metacarpophalangeal joint using a fibular osteocutaneous free flap and silicone arthroplasty. *J Hand Surg Am.* 2012;37(2):310-315. doi: 10.1016/j.jhsa.2011.10.031.
40. Hills AJ, Tay S, Gateley D. Chondrosarcoma of the head of the fifth metacarpal treated with an iliac crest bone graft and concurrent Swanson's arthroplasty. *J Plast Reconstr Aesthet Surg.* 2014;67(3):e84-e87. doi: 10.1016/j.bjps.2013.10.023.
41. Lewallen LW, Wagner ER, Moran SL. Giant cell tumor of the metacarpal: case report. *Hand (N Y).* 2017;12(5):NP113-NP117. doi: 10.1177/1558944717697431.
42. Xie F, Lan X, Lin J. Arthroplasty for treating traumatic metacarpophalangeal joint defects: a retrospective study over three years. *J Pain Res.* 2021;14:1457-1464. doi: 10.2147/JPR.S299135.
43. Pomares G, Jager T. Emergency metacarpophalangeal arthroplasty with bone grafting for traumatic joint destruction: a report on two cases. *Hand Surg Rehabil.* 2021;40(1):104-108. doi: 10.1016/j.hansur.2020.07.008.
44. Pomares G, Calafat V, Montoya-Faivre D, et al. Emergency metacarpophalangeal arthroplasty with bone grafting for traumatic joint destruction. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2017;103(7):1105-1108. doi: 10.1016/j.otsr.2017.07.007.
45. Горякин М.В., Ульянов В.Ю. Опыт тотального эндопротезирования при внутрисуставном оскольчатом переломе пястно-фалангового сустава (клинический случай). *Саратовский научно-медицинский журнал.* 2020;16(2):485-487.
46. Drake ML, Segalman KA. Complications of small joint arthroplasty. *Hand Clin.* 2010;26(2):205-212. doi: 10.1016/j.hcl.2010.01.003.
47. Яковлев С.В. Эндопротезирование суставов кисти при послеожоговой деформации и нарушении функции. *Acta Biomedica Scientifica.* 2011;4(4):217-221.
48. Сарыгин П.В., Мороз В.Ю., Ваганова Н.А. и др. Хирургическое лечение послеожоговых дефектов кисти. *Анналы хирургии.* 2015;3(3):37-42.
49. Neral MK, Pittner DE, Spiess AM, Imbriglia JE. Silicone arthroplasty for nonrheumatic metacarpophalangeal joint arthritis. *J Hand Surg Am.* 2013;38(12):2412-2418. doi: 10.1016/j.jhsa.2013.09.016.
50. Billig JJ, Nasser JS, Chung KC. National prevalence of complications and cost of small joint arthroplasty for hand osteoarthritis and post-traumatic arthritis. *J Hand Surg Am.* 2020;45(6):553.e1-553.e12. doi: 10.1016/j.jhsa.2019.11.002.
51. Wagner ER, Weston JT, Houdek MT, et al. Medium-term outcomes with pyrocarbon proximal interphalangeal arthroplasty: a study of 170 consecutive arthroplasties. *J Hand Surg Am.* 2018;43(9):797-805. doi: 10.1016/j.jhsa.2018.06.020.
52. Wagner ER, Houdek MT, Packard B, et al. Revision metacarpophalangeal arthroplasty: a longitudinal study of 128 cases. *J Am Acad Orthop Surg.* 2019;27(6):211-218. doi: 10.5435/JAAOS-D-17-00042.
53. Котельников Г.П., Николаенко А.Н., Иванов В.В. и др. Эндопротезирование пястно-фалангового сустава (обзор литературы). *Гений ортопедии.* 2022;28(4):599-607. doi: 10.18019/1028-4427-2022-28-4-599-607.
54. Федотов П.В., Ковалев Д.В., Рыбаков С.Н. Оценка отдаленных результатов эндопротезирования проксимального межфалангового сустава кисти. *Гений ортопедии.* 2024;30(2):191-199. doi: 10.18019/1028-4427-2024-30-2-191-199.
55. Luther C, Germann G, Sauerbier M. Proximal interphalangeal joint replacement with surface replacement arthroplasty (sr-pip): functional results and complications. *Hand (N Y).* 2010;5(3):233-240. doi: 10.1007/s11552-009-9246-z.
56. Wanderman N, Wagner E, Moran S, Rizzo M. Outcomes following acute metacarpophalangeal joint arthroplasty dislocation: an analysis of 37 cases. *J Hand Surg Am.* 2018;43(3):289.e1-289.e6. doi: 10.1016/j.jhsa.2017.10.001.
57. Claxton MR, Rode MM, Wagner ER, et al. Metacarpophalangeal joint pyrocarbon arthroplasty for osteoarthritis: an analysis of 44 arthroplasties. *J Hand Surg Am.* 2024;49(5):450-458. doi: 10.1016/j.jhsa.2022.08.013.
58. Aversano FJ, Calfee RP. Salvaging a failed proximal interphalangeal joint implant. *Hand Clin.* 2018;34(2):217-227. doi: 10.1016/j.hcl.2017.12.011.
59. Jones DB Jr, Ackerman DB, Sammer DM, Rizzo M. Arthrodesis as a salvage for failed proximal interphalangeal joint arthroplasty. *J Hand Surg Am.* 2011;36(2):259-264. doi: 10.1016/j.jhsa.2010.10.030.
60. Николаенко А.Н., Иванов В.В., Дороганов С.О. и др. Цифровое моделирование критических состояний эндопротезирования пястно-фалангового сустава. *Гений ортопедии.* 2023;29(2):148-154. doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-2-148-154.
61. Zhou KJ, Graham DJ, Lawton RD, Sivakumar BS. Toe-to-finger vascularized joint transfers for proximal interphalangeal joint reconstruction: a systematic review. *Hand (N Y).* 2022;17(6):1031-1038. doi: 10.1177/1558944720988081.
62. Balan JR. Free vascularized joint transfer from toes for finger reconstruction in a 2-year-old child with good functional recovery. *J Hand Microsurg.* 2021;15(2):152-155. doi: 10.1055/s-0041-1732807.
63. Bachleitner K, Blank B, Klein S, et al. Vascularized transfer of two coherent toe joints in simultaneously reconstructing MCP and PIP of a mutilated finger. *Clin Hemorheol Microcirc.* 2016;64(3):333-344. doi: 10.3233/CH-168100.
64. Родоманова Л.А. Кожно-костная реконструкция первого пальца кисти с использованием лучевого кожно-костного комплекса тканей. *Травматология и ортопедия России.* 2024;30(1):89-98. doi: 10.17816/2311-2905-17485.
65. Lin YT, Chen SH, Loh CY, et al. Rationalizing the vascular anatomy for oblique osteotomy of the metatarsal head during toe/joint transfers of the metatarsophalangeal joint. *Plast Reconstr Surg Glob Open.* 2018;6(10):e1805. doi: 10.1097/GOX.0000000000001805.
66. Kanaya K, Wada T, Kitajima K, Yamashita T. Vascularized metatarsophalangeal joint transfer for giant cell tumor of the proximal phalanx of the hand. *Plast Reconstr Surg.* 2008;121(1):354-355. doi: 10.1097/01.prs.0000300298.56732.ce.
67. Squitieri L, Chung KC. A systematic review of outcomes and complications of vascularized toe joint transfer, silicone arthroplasty, and PyroCarbon arthroplasty for posttraumatic joint reconstruction of the finger. *Plast Reconstr Surg.* 2008;121(5):1697-1707. doi: 10.1097/PRS.0b013e31816aa0b3.
68. Chen HY, Lin YT, Lo S, et al. Vascularised toe proximal interphalangeal joint transfer in posttraumatic finger joint reconstruction: the effect of skin paddle design on extensor lag. *J Plast Reconstr Aesthet Surg.* 2014;67(1):56-62. doi: 10.1016/j.bjps.2013.09.010.
69. Zhao J, Tien HY, Abdullah S, Zhang Z. Aesthetic refinements in second toe-to-thumb transfer surgery. *Plast Reconstr Surg.* 2010;126(6):2052-2059. doi: 10.1097/PRS.0b013e3181f44994.

70. Yin Y, Tao X, Li Y, et al. Cosmetic and functional results of a newly reconstructed thumb by combining the phalanx of second toe and the great toenail flap transplantation. *J Orthop Surg Res.* 2020;15(1):458. doi: 10.1186/s13018-020-01986-y.
71. Roger de Oña I, Garcia Villanueva A, Studer de Oya A. An alternative thumb reconstruction by double microsurgical transfer from the great and second toe for a carpometacarpal amputation. *J Hand Surg Am.* 2018;43(10):955.e1-955.e9. doi: 10.1016/j.jhsa.2018.03.022.

Статья поступила 10.10.2024; одобрена после рецензирования 16.10.2024; принята к публикации 10.12.2024.

The article was submitted 10.10.2024; approved after reviewing 16.10.2024; accepted for publication 10.12.2024.

Информация об авторах:

Юлия Станиславовна Волкова — врач — травматолог-ортопед, volkoways@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5449-0477>;

Любовь Анатольевна Родоманова — доктор медицинских наук, профессор, врач — травматолог-ортопед, rodomanovaliubov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2402-7307>.

Information about the authors:

Yulia S. Volkova — orthopaedic surgeon, volkoways@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5449-0477>;

Liubov A. Rodomanova — Doctor of Medical Sciences, Professor, orthopaedic surgeon, rodomanovaliubov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2402-7307>.



Current concepts in the management of infected non-union of the femur: internal versus external fixation

R. Kaul^{1✉}, R.R. Dubey², R. Agrawal³, A. Pande⁴

¹ Military Hospital Dehradun, Dehradun, India

² Armed Forces Medical College, Pune, India

³ Agrawal Orthopaedic Hospital and Research Institute, Gorakhpur, Uttar Pradesh, India

⁴ Base Hospital Lucknow, Uttar Pradesh, India

Corresponding author: Rajiv Kaul, drrajivkaul@gmail.com

Abstract

Introduction The management of infected non-unions continues to be a herculean task for the orthopaedic surgeon due to the emergence of microbial resistance, failure of fixation, frequent re-fractures and resurgence of previously treated infection.

The **aim** of the paper was to structure the approach to the management of patients with infected femoral non-union based on the literature review and surgeons' experience.

Material and methods A detailed literature review, including current updates on the management of fracture-resistant infections (FRI) and non-union of the femur was conducted. Search words and phrases used for navigation in the international medical literature platforms were: osteomyelitis, non-union, diagnostic solutions, local antibiotics, biomechanical stability.

Results and Discussion The principles of surgical management of infected non-union of the femur remain the same: (a) adequate soft tissue sampling; (b) thorough debridement; (c) fracture stabilization; (d) dead space and defect management; (e) delivery of local antibiotics and (f) soft tissue coverage. The goal of surgery is to get rid of infection. There is no place for empirical treatment of suspected infection. Therapy should be initiated based upon microbial cultures of deep tissue specimens. While selecting the type of hardware for non-union of the femur, one often encounters a dilemma concerning the most appropriate surgical tool for stabilization. Internal fixation with bone grafting would depend on the size of the gap; commonly defects < 6 cm are treated with this modality. External fixation becomes indispensable in certain scenarios such as poor local skin and soft tissue conditions, associated limb length discrepancy > 2 cm, large defect gaps ≥ 6 cm, concomitant deformity, small fragments or osteopenic bone.

Conclusion Based on this review of current concepts, the authors conclude that there is no ideal or universal approach for management of infected non-union of the femur, and the approach may vary depending on the technical expertise available and the institutional practices. Irrespective of the modality used, the golden rules of fixation remain the same, alignment, preservation of biology, contact of fragments, stability and early restoration of function.

Keywords: osteomyelitis, non-union, femur, diagnostic solutions, local antibiotics, biomechanical stability

Acknowledgement The authors would like to acknowledge the salient contribution of Prof. (Dr) Hemant Sharma, Professor in Trauma & Orthopaedics, Hull Limb Reconstruction & Bone Infection Unit, Hull, UK for his mentorship towards the structuring of this article.

For citation: Kaul R, Dubey RR, Agrawal R, Pande A. Current concepts in the management of infected non-union of the femur: internal versus external fixation. *Genij Ortopedii*. 2025;31(1):110-118. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-110-118.

Обзорная статья

УДК 616.718.4-018.46-002-001.58-089.227.84

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-1-110-118>

Современные концепции лечения пациентов с инфицированными несращениями бедренной кости: внутренняя и внешняя фиксация

Р. Каул¹✉, Р.Р. Дубей², Р. Агравал³, А. Панде⁴

¹ Военный госпиталь Дехрадун, Дехрадун, Индия

² Медицинский колледж вооруженных сил, Пуна, Индия

³ Ортопедическая больница и научно-исследовательский институт Агравал, Горакхпур, -Уттар-Прадеш, Индия

⁴ Базовый госпиталь Лакхнау, Уттар-Прадеш, Индия

Автор, ответственный за переписку: Раджив Каул, drrajivkaul@gmail.com

Аннотация

Введение. Лечение пациентов с инфицированными несращениями костей по-прежнему является сложной задачей для хирурга-ортопеда из-за возникновения микробной резистентности, неудачной фиксации, частых повторных переломов и рецидива ранее купированного инфекционного процесса.

Цель работы — на основе анализа литературы и собственного хирургического опыта структурировать подход к лечению пациентов с инфицированными несращениями бедренной кости.

Материалы и методы. Проведен подробный анализ литературы, включая современные методы лечения инфекций, возникающих при переломах и несращениях бедренной кости. Поисковые слова и словосочетания, использованные для навигации на международных платформах медицинской литературы: osteomyelitis, non-unions, femur, diagnostic solutions, local antibiotics, biomechanical stability.

Результаты и обсуждение. Принципы хирургического лечения инфицированного несращения бедренной кости остаются прежними: (а) адекватный забор образцов мягких тканей; (б) тщательная хирургическая обработка; (в) стабилизация перелома; (г) восполнение дефекта после санации; (д) применение местных антибиотиков и (е) замещение мягкотканного дефекта. Целью хирургической операции является ликвидация инфекции. Подбор лечения при предполагаемой инфекции не должен быть эмпирическим. Медикаментозную терапию следует начинать на основе микробных культур образцов глубоких тканей. При выборе типа фиксации несращения бедренной кости часто возникает дилемма относительно наиболее подходящего хирургического инструмента для стабилизации. Внутренняя фиксация с костной пластикой будет зависеть от размера костного дефекта; обычно этот метод применяют при дефектах < 6 см. Внешняя фиксация является незаменимой в определенных ситуациях, таких как плохое местное состояние кожи и мягких тканей, сопутствующая разница в длине конечностей > 2 см, дефекты кости ≥ 6 см, сопутствующая деформация, небольшие костные фрагменты или остеопения.

Заключение. Основываясь на современных концепциях, авторы приходят к выводу, что не существует идеального или универсального подхода к лечению пациентов с инфицированным несращением бедренной кости, возможные варианты зависят от имеющегося технического опыта и практики медицинского учреждения. Независимо от используемого метода, золотые правила фиксации остаются неизменными: выравнивание оси, сохранение биологии, плотный контакт костных фрагментов и стабильность, а также раннее восстановление функции.

Ключевые слова: остеомиелит, несращение, диагностические решения, местные антибиотики, биомеханическая стабильность

Благодарность. Авторы выражают признательность Hemant Sharma, профессору травматологии и ортопедии отделения реконструкции конечностей и костных инфекций, г. Халл, Великобритания, за его наставничество в структурировании этой статьи.

Для цитирования: Каул Р., Дубей Р.Р., Агравал Р., Панде А. Современные концепции лечения пациентов с инфицированными несращениями бедренной кости: внутренняя и внешняя фиксация. *Гений ортопедии*. 2025;31(1):110-118. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-110-118.

INTRODUCTION

The term 'infected non-union' of long bones has now been largely replaced by the term 'fracture related infection' (FRI) based upon the research conducted by the FRI consensus group in 2018 [1]. The term 'FRI' encompasses: (a) all infections which occur in the presence of a fracture; (b) early infection around a fracture; (c) infected non-unions; (d) haematogenous infections following fracture healing and (e) infections in fractures with no internal fixation. The diagnostic criteria for FRI include serum inflammatory markers, medical imaging, microbiology, molecular biology, and histopathology [2]. Standard diagnostic aids are mandatory in all cases, such as total leukocyte count (TLC), C-reactive protein (CRP) and erythrocyte sedimentation rate (ESR), of which, CRP is the most useful serum inflammatory marker [2] with a sensitivity ranging between 60–100 % and specificity between 34.3 % and 85.7 %. Newer modalities which are useful in prosthetic joint infections, such as biomarkers in synovial fluid, namely interleukin 6 (IL-6), leukocyte esterase strips, alpha defensin and synovial fluid CRP, are yet to establish a role in FRI [3]. Conventional radiography may not give much information, but sinograms are extremely useful to indicate where the discharge leads to, superficial or deeper tissues. Computerized tomography (CT) can detect bone resorption, sequestration, periosteal or endosteal new bone formation, cortical irregularities, and atrophic non-union. Magnetic resonance imaging (MRI) can differentiate between bone and soft tissue infection. Bone scans have a high sensitivity but low specificity for infections [4]. The most recent diagnostic adjunct is 18-Fluorodeoxyglucose Positron Emission Tomography (FDG–PET), which can detect the extent of infection in remote locations, especially intramedullary, and in the presence of an implant. Many studies have reported a high sensitivity and positive predictive value in patients for whom clinical findings are inconclusive for a local infection [5].

METHODS

A detailed analysis of literature, including current updates on the management of fracture related infections (FRI) and non-unions was conducted, with the objective of simplifying and putting together a structured approach in the management of infected non-unions of the femur. Search words and phrases used for navigation in the international medical literature platforms were: osteomyelitis, non-union, femur, diagnostic solutions, local antibiotics, biomechanical stability. Key points are enlisted below.

RESULTS AND DISCUSSION

A. Approach to surgical management

The principles of surgical management of infected non-unions remain the same, irrespective of the anatomical location, and these are: (a) adequate soft tissue sampling; (b) thorough debridement; (c) fracture stabilization; (d) dead space and defect management; (e) delivery of local antibiotics and (f) soft tissue coverage [6]. These are discussed as under.

a–b) *Debridement and sampling* One must have clarity on 'what' and 'how much' to take out, since all sclerotic bone is not necessarily dead bone. An MRI/PET scan can provide valuable information and aids in decision making [7]. The role of methylene blue is debatable, but can be a useful adjunct in determining the extent of inviable bone [8]. It is essential to administer antibiotics immediately *after* sampling [9]. If the patient was previously on antibiotics, an antibiotic free holiday of at least 1–2 weeks is mandatory [10]. Five or more deep tissue samples should be collected in separate containers, using un-used surgical instruments for each sample [2]. Samples should preferably be inoculated directly into the culture broth. Superficial, skin, or sinus tract, swabs should *not* be used.

c) *Fracture stabilization* The peculiarities of the femur include large deforming muscular forces which tend to pull the proximal femur into flexion and abduction, thereby creating a varus and procurvatum deformity of the proximal femur. This is especially true when a subtrochanteric corticotomy is used for lengthening along with an external fixator [11]. The deforming forces can be overcome by using a sturdy construct consisting of 4–5 Shanz pins in the proximal segment in a 'delta' configuration, or by using commercially available clamp modifications (ALFA fixator, SH Pitkar, Pune, India), which can accommodate up to 5 pins in the same plane or in two planes at a variable angle, as highlighted in Figure 1.

Large ring fixators in the femur are poorly tolerated by patients due to difficulty in maintaining personal hygiene, the need for a modified bed to accommodate the frame and the laboriousness in ambulation [12]. Possible remedies include the use of a monolateral rail fixator, with pins driven up into the neck for a stronger purchase, where the bone stock is better as compared to the trochanteric region. The swivel clamp of the rail fixator is very useful in this regard (Fig. 2). The rail fixator weighs less and is less cumbersome to the patient [12].

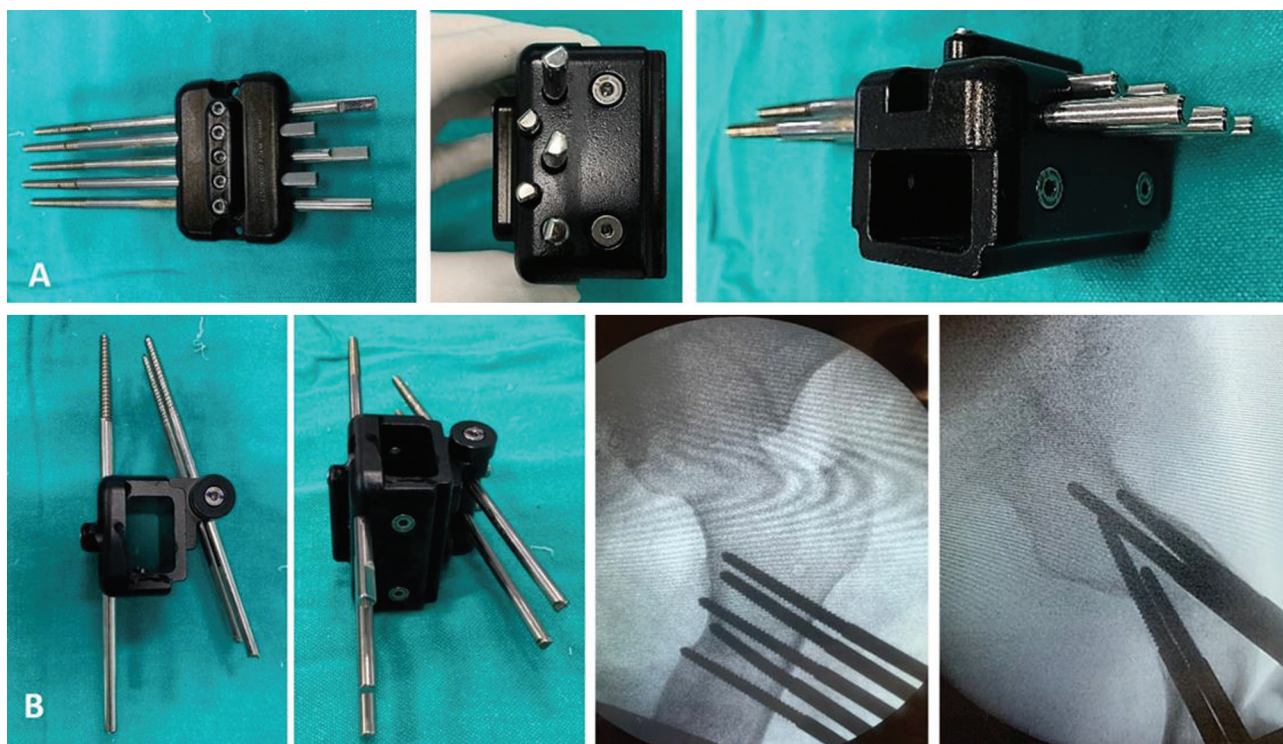


Fig. 1. (A) Clamp with 5 pins in same direction; (B) Clamp with 5 pins with variable angle adjustment and its clinical application in the proximal femur

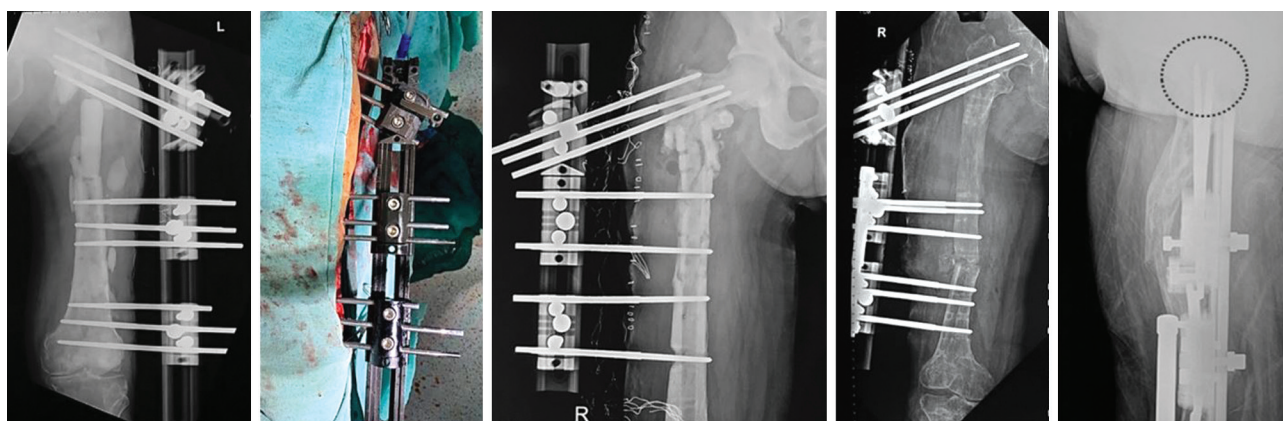


Fig. 2. Swivel clamp of the rail fixator system with pins that can be angled upwards into the femoral neck; care is taken to ensure their central location in the lateral view

For small fragments, such as the distal femur condylar block, or osteopenic bone or those with pre-existing knee stiffness, a knee-spanning construct is desirable to counterbalance undesirable movements at the non-union site, consequent to a long lever arm [13]. Spanning frames may be hinged (commercially available) or non-hinged and can be taken off after satisfactory union has been achieved to resume range of motion (ROM) exercises (Fig. 3). A quadriceps-plasty may be added at the end in cases of residual knee stiffness [14]. The use of olive wires can be extremely useful in tackling small coronal plane fragments [15], wherein the wires are placed perpendicular to the fracture plane and tensioned using a traction assembly to achieve interfragmentary compression and union (Fig. 4).

d) *Defect management* Detailed description of defect management is beyond the scope of this study, hence, a generalised approach [1] to defect management is summarized as a flow chart in Figure 5.

e) *Local antibiotic delivery* This is the crux of treatment. Commonly used vehicles for local antibiotic delivery include polymethyl methacrylate (PMMA) cement spacers or beads on a string, the 'bead pouch' technique [17], cement coated nails, antibiotic coated implants, and absorbable calcium sulphate-based carriers, and are selected depending upon the availability of resources and anatomical location of the infection [6]. The choice and duration of antibiotics is a topic of contention. General guidelines are as follows [6]; the antibiotic should be (a) heat stable, (b) be available in powder form, (c) should not be

cytotoxic to host tissues, (d) have minimal systemic side effects and (e) released at concentrations exceeding several times the minimum inhibitory concentration (MIC). Note that cement can hold up to 8 g of antibiotics per 40 g of PMMA [18]. The combined duration of parenteral and oral antibiotics is generally 6–12 weeks, in consultation with the infectious diseases' specialist [19].



Fig. 3. (A) Commercially available modular knee spanning frame with articulating knee hinge; (B) indigenous modification of the same using Ilizarov components

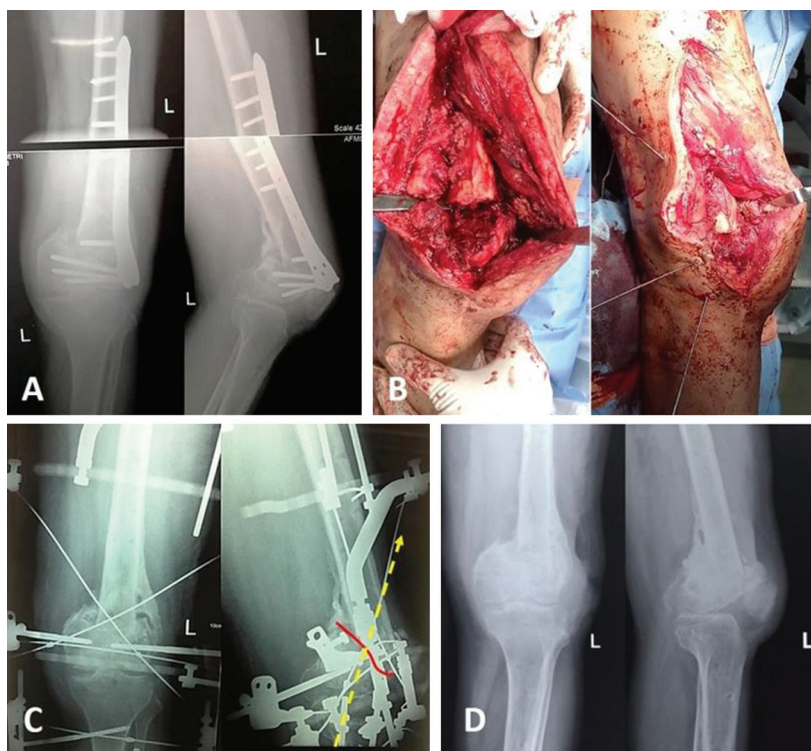


Fig. 4. (A, B) Infected non-union Hoffa fracture with a small, osteopenic, condylar segment; (C) counter-opposed olive wires are driven from down upwards, perpendicular to fracture plane (in red), and tensioned using a traction assembly at the top to achieve interfragmentary compression, resulting in union (D)

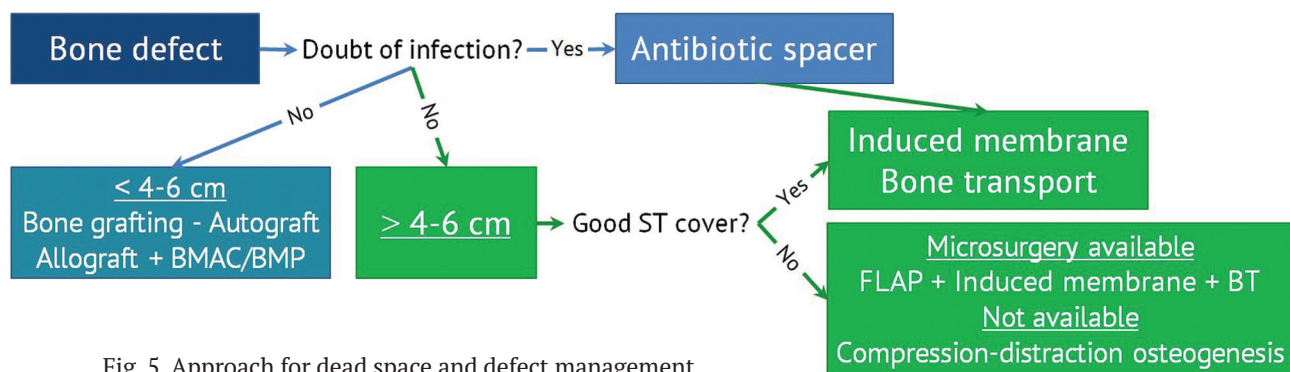


Fig. 5. Approach for dead space and defect management

f) *Soft tissue coverage* Early flap cover for exposed bone or musculo-tendinous units should be performed as soon as possible, once the general condition of the patient stabilizes. For this, a close association between the orthopaedic and plastic surgeons is warranted, often referred as the 'ortho-plastic' approach [20]. For uncomplicated, discharging wounds, negative pressure wound therapy (NPWT) is an extremely rewarding modality, with several advantages [21] such as (a) enhancement of wound healing, (b) cyclic cleansing and dilution of wound debris, (c) disruption of biofilm, (d) accelerated granulation tissue formation and (e) earlier reduction in wound size.

Rehabilitation phase Bracing is highly recommended to protect the regenerated bone and the healed non-union site from re-fracture (Fig. 6) and should be continued for a period of 2–3 months following frame removal [22]. Early weight bearing with an appropriate walking aid and active ROM exercises are quintessential.



Fig. 6. Customised thigh brace for post-operative rehabilitation in non-union of the distal femur

B. Implant selection: internal versus external fixation

While selecting the type of hardware for non-unions of the femur, one often encounters a dilemma concerning the *most* appropriate surgical tool for stabilization. The following guidelines have been drafted to help simplify the arduous task of decision making.

Choice of internal fixation

1. Bulky frames result in poor compliance. Long periods in a frame can cause tremendous psychiatric problems and considerable patient discomfort and dissatisfaction [11].
2. Due to closely spaced components, frames leave little space for future reconstructive surgery, such as flap cover and bone grafting.

Pre-requisites to be fulfilled Internal fixation with bone grafting would depend on the size of the gap; commonly defects < 6 cm are treated with this modality [23]. The distal fragment should be of sufficient size to hold screws. The plate should be a robust, locking plate and long enough for adequate stability [22]. It may be augmented with a medial plate or a plate can be augmented over a retained nail. Cortical auto- or allografts, such as a non-vascularised fibula, provide additional stability, in combination with locking plates [22]

The induced membrane technique, first described by AC Masquelet [24] in 1986, is based upon the principle that the cement spacer provokes a biological reaction resulting in a pseudo-synovial membrane formation, which is rich in BMPs and TGF Beta, VEG-F, angiotensin 2, vWF and prevents graft resorption at the second stage. The second step is performed 6–8 weeks later, in which bone grafting is done, and may be augmented with bone substitutes (in the ratio < 1:2), only *after* infection has been cleared. One must try to close the membrane over the graft, without packing it too tightly. Several studies have also reported satisfactory outcomes with a single stage protocol, consisting of debridement and internal fixation with bone grafting [25]. The choice ultimately depends upon the surgeon's preference and institutional practices. Disadvantages of internal fixation include a prolonged period of non-weight bearing ambulation and its limited application in large sized bone defects (> 6 cm) or small fragments [23].

Choice of external fixation:

External fixation becomes indispensable in certain scenarios such as:

1. Poor local skin and soft tissue conditions.
2. Associated limb length discrepancy > 2 cm [26].
3. Large gaps $\geq$ 6 cm.
4. Concomitant deformity.
5. Small fragments or osteopenic bone.

Salvaging traumatised limbs with bone loss has always been a vexing challenge for orthopaedic surgeons across the globe. Initial attempts were often plagued by downright failure or unacceptable functionality. The introduction of the Ilizarov method instilled hope for many patients and physicians alike and produced remarkable results [27]. It has been adopted as the last resort in the management of segmental bone defects and non-unions of the lower extremities. Two Ilizarov techniques can be adopted for bone defects: (a) compression with approximation of fragments (resulting in shortening), and concomitant distraction through an osteotomy (for lengthening) or (b) bone transport and regeneration of the missing bone segment through distraction osteogenesis, with subsequent compression at the docking site to achieve union [28]. Either of these methods can be used to address the problems associated with bone defects, namely bone loss, soft tissue loss and infection, without the need for major reconstructive surgery [28]. The intrinsic biomechanical stability of the ring or rail fixators provides the requisite milieu to stimulate neo-histogenesis and promote bone union. Co-existing deformities can be corrected simultaneously and early weight-bearing is possible. Disadvantages of this method include tethering of soft tissues, potential risk of neurovascular injuries, regenerate-associated problems, pin-site infections, and joint stiffness [12, 29].

Choice of implant in proximal femur non-unions:

These are extremely vexing and challenging to treat because of a small sized fragment and difficulty in obtaining adequate purchase in this segment [30]. Ring fixators become cumbersome, especially when rings are used in upper thigh [12]. Monolateral fixators may improve patients' compliance and quality of life, but are delimited by the size and bone quality of the proximal fragment. Antibiotic-cement nails (Fig. 7, Fig. 8) are extremely useful in treating this variant, since they have adequate hold in the small proximal segment, and can address the intramedullary infection [32]. Antibiotic coated plates [33] have also been described, wherein the plate is retained following removal of the cement coating during the second stage, and the gap is bone grafted. Large volumes of bone graft can be obtained by the Reamer Irrigator Aspirator (RIA, De Puy Synthes) in cases of sizeable defects [32].

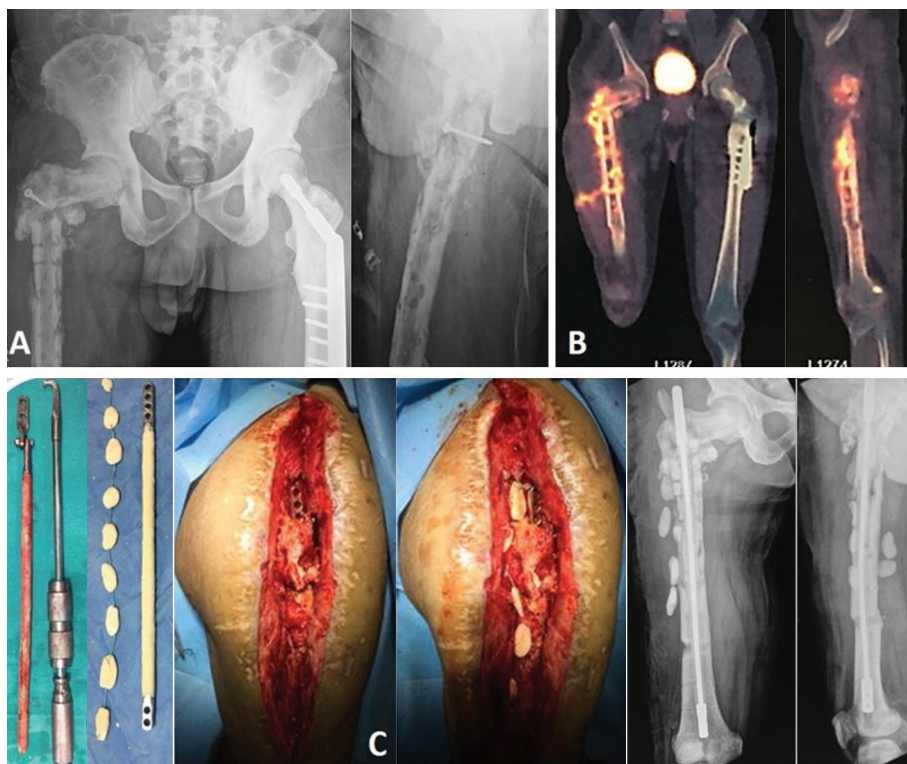


Fig. 7. (A) Infected non-united subtrochanteric fracture in a 49-year male with multiple previous failed surgeries; (B) FDG-PET scan showing hot spots in the entire medullary canal and proximal femur; (C) custom made Ilizarov antibiotic nail, comprising of a threaded rod with posts at either end, coated uniformly with antibiotic impregnated cement (3 such nails were used), to control the medullary infection, until the discharge ceased



Fig. 8. Rail fixator application followed with compression across the non-union (A) to achieve union in about 5 months (B)

CONCLUSION

The authors concluded that there is no ideal or universal approach for management of infected non-unions of the femur, and the approach may vary depending on the technical expertise available and the institutional practices. In general, the following guidelines have been drafted to have a consensus on the *modus operandi* when dealing with bone infections, and to assist in implant selection for fracture stabilization. The goal of surgery, at the very least, is to get rid of the infection. There is *no place* for empirical treatment of suspected infection. Therapy should be initiated based upon microbial cultures of deep tissue specimens. Nuclear imaging with localizing scans is the newest refinement in diagnosis and planning. There are multiple ways of treating gaps; in general, small gaps with sizeable fragments are amenable to internal fixation, whereas larger gaps or small sized fragments are better managed with external fixation. The golden rules of fixation remain the same, irrespective of the modality used, and these can be abbreviated as 'ABCF' — restoring Alignment, preservation of Biology, achieving good Contact (stability) and early restoration of Function.

Conflict of interest Not declared.

Funding Not declared.

REFERENCES

1. Metsemakers WJ, Morgenstern M, McNally MA, et al. Fracture-related infection: A consensus on definition from an international expert group. *Injury*. 2018;49(3):505-510. doi: 10.1016/j.injury.2017.08.040.
2. Govaert GAM, Kuehl R, Atkins BL, et al. Diagnosing Fracture-Related Infection: Current Concepts and Recommendations. *J Orthop Trauma*. 2020 Jan;34(1):8-17. doi: 10.1097/BOT.0000000000001614.
3. Bosch P, Ilpma FFA, Govaert GAM, et al. White Blood Cell Scintigraphy for Fracture-Related Infection: Is Semiquantitative Analysis of Equivocal Scans Accurate? *Diagnostics* (Basel). 2021;11(12):2227. doi: 10.3390/diagnostics11122227.
4. Pineda C, Espinosa R, Pena A. Radiographic imaging in osteomyelitis: the role of plain radiography, computed tomography, ultrasonography, magnetic resonance imaging, and scintigraphy. *Semin Plast Surg*. 2009;23(2):80-89. doi: 10.1055/s-0029-1214160.
5. Wenter V, Albert NL, Brendel M, et al. [18F]FDG PET accurately differentiates infected and non-infected non-unions after fracture fixation. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2017;44(3):432-440. doi: 10.1007/s00259-016-3528-9.
6. Kates SL, Borens O. (eds.) *Principles of Orthopedic Infection Management*. AO Trauma Thieme Verlag; New York, NY, USA: 2016.
7. Demirev A, Weijers R, Geurts J, et al. Comparison of [18 F]FDG PET/CT and MRI in the diagnosis of active osteomyelitis. *Skeletal Radiol*. 2014;43(5):665-672. doi: 10.1007/s00256-014-1844-3.
8. Shaw JD, Miller S, Plourde A, et al. Methylene Blue-Guided Debridement as an Intraoperative Adjunct for the Surgical Treatment of Periprosthetic Joint Infection. *J Arthroplasty*. 2017;32(12):3718-3723. doi: 10.1016/j.arth.2017.07.019.
9. Chaudhary MM. Infected nonunion of tibia. *Indian J Orthop*. 2017;51(3):256-268. doi: 10.4103/ortho.IJOrtho.199.16.
10. Tan TL, Kheir MM, Rondon AJ, et al. Determining the Role and Duration of the "Antibiotic Holiday" Period in Periprosthetic Joint Infection. *J Arthroplasty*. 2018;33(9):2976-2980. doi: 10.1016/j.arth.2018.04.019.
11. Nayagam S. Femoral lengthening with a rail external fixator: tips and tricks. *Strategies Trauma Limb Reconstr*. 2010;5(3):137-144. doi: 10.1007/s11751-010-0098-4.
12. Mudiganty S, Daolagupu AK, Sipani AK, et al. Treatment of infected non-unions with segmental defects with a rail fixation system. *Strategies Trauma Limb Reconstr*. 2017;12(1):45-51. doi: 10.1007/s11751-017-0278-6.
13. Dipak K, Sunny K. The use of the knee spanning Ilizarov method as a treatment procedure in infected nonunion of the distal femur with bone loss. *Genij Ortopedii*. 2019;25(2):193-198. doi: 10.18019/1028-4427-2019-25-2-193-198.
14. Zhao J. Mini-invasive Quadriceps-plasty for Severe Flexion-Impeding Knee Stiffness. *Arthrosc Tech*. 2022;11(4):e645-e653. doi: 10.1016/j.eats.2021.12.021.
15. Kaul R, Akhoun N, Mugdum G, Prasad M. Management of infected nonunions of the femur and tibia with compression-distraction osteogenesis coupled with modern methods at a tertiary military establishment: a prospective case series. *Current Orthopaedic Practice*. 2021;32(1):23-31. doi: 10.1097/BCO.0000000000000950.

16. *Pocket guide to treatment of implant associated infections after fracture fixation*. Pro-implant foundation. 2017.
17. Henry SL, Ostermann PA, Seligson D. The antibiotic bead pouch technique. The management of severe compound fractures. *Clin Orthop Relat Res*. 1993;(295):54-62.
18. Masri BA, Duncan CP, Beauchamp CP. Long-term elution of antibiotics from bone-cement: an in vivo study using the prosthesis of antibiotic-loaded acrylic cement (PROSTALAC) system. *J Arthroplasty*. 1998;13(3):331-338. doi: 10.1016/s0883-5403(98)90179-6.
19. Li HK, Rombach I, Zambellas R, et al. Oral versus Intravenous Antibiotics for Bone and Joint Infection. *N Engl J Med*. 2019;380(5):425-436. doi: 10.1056/NEJMoa1710926.
20. Heitmann C, Levin LS. The orthoplastic approach for management of the severely traumatized foot and ankle. *J Trauma*. 2003;54(2):379-390. doi: 10.1097/01.TA.0000028859.26504.7C.
21. Putnis S, Khan WS, Wong JM. Negative pressure wound therapy - a review of its uses in orthopaedic trauma. *Open Orthop J*. 2014;8:142-147. doi: 10.2174/1874325001408010142.
22. Wang JW, Weng LH. Treatment of distal femoral nonunion with internal fixation, cortical allograft struts, and autogenous bone-grafting. *J Bone Joint Surg Am*. 2003;85(3):436-440. doi: 10.2106/00004623-200303000-00006.
23. Yoon YC, Oh CW, Cho JW, Oh JK. Early definitive internal fixation for infected nonunion of the lower limb. *J Orthop Surg Res*. 2021;16(1):632. doi: 10.1186/s13018-021-02785-9.
24. Masquelet AC, Begue T. The concept of induced membrane for reconstruction of long bone defects. *Orthop Clin North Am*. 2010;41(1):27-37; table of contents. doi: 10.1016/j.ocl.2009.07.011.
25. Prasarn ML, Ahn J, Achot T, et al. Management of infected femoral nonunions with a single-staged protocol utilizing internal fixation. *Injury*. 2009;40(11):1220-1225. doi: 10.1016/j.injury.2009.06.009.
26. Applebaum A, Nessim A, Cho W. Overview and Spinal Implications of Leg Length Discrepancy: Narrative Review. *Clin Orthop Surg*. 2021;13(2):127-134. doi: 10.4055/cios20224.
27. Malkova TA, Borzunov DY. International recognition of the Ilizarov bone reconstruction techniques: Current practice and research (dedicated to 100th birthday of G. A. Ilizarov). *World J Orthop*. 2021;12(8):515-533. doi: 10.5312/wjo.v12.i8.515.
28. Borzunov DY, Kolchin SN, Malkova TA. Role of the Ilizarov non-free bone plasty in the management of long bone defects and nonunion: Problems solved and unsolved. *World J Orthop*. 2020;11(6):304-318. doi: 10.5312/wjo.v11.i6.304.
29. Blum AL, BongioVanni JC, Morgan SJ, et al. Complications associated with distraction osteogenesis for infected nonunion of the femoral shaft in the presence of a bone defect: a retrospective series. *J Bone Joint Surg Br*. 2010;92(4):565-570. doi: 10.1302/0301-620X.92B4.23475.
30. Haidukewych GJ, Berry DJ. Nonunion of fractures of the subtrochanteric region of the femur. *Clin Orthop Relat Res*. 2004;(419):185-188. doi: 10.1097/00003086-200402000-00030.
31. Cho JW, Kim J, Cho WT, et al. Antibiotic coated hinged threaded rods in the treatment of infected nonunions and intramedullary long bone infections. *Injury*. 2018;49(10):1912-1921. doi: 10.1016/j.injury.2018.07.016.
32. Cox G, Jones E, McGonagle D, Giannoudis PV. Reamer-irrigator-aspirator indications and clinical results: a systematic review. *Int Orthop*. 2011;35(7):951-956. doi: 10.1007/s00264-010-1189-z.
33. Conway JD, Hlad LM, Bark SE. Antibiotic cement-coated plates for management of infected fractures. *Am J Orthop (Belle Mead NJ)*. 2015;44(2):E49-53.

The article was submitted 29.08.2024; approved after reviewing 15.10.2024; accepted for publication 10.12.2024.

Статья поступила 29.08.2024; одобрена после рецензирования 15.10.2024; принята к публикации 10.12.2024.

Information about the authors:

Rajiv Kaul — MS (Orth), DNB (Orth), Associate Professor (Orthopaedics), MRCPs (Glasg), Dip SICOT, drrajivkaul@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6870-9206>;

Rajiv Ranjan Dubey — MS (Orth), DNB (Orth), Assistant Professor (Sports Medicine), rajdub87@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7929-0658>;

Rajat Agrawal — MS (Orth), Director, President of ASAMI India, drrajataoh@gmail.com;

Ashish Pande — MS (Orth), DNB (Orth), Professor (Orthopaedics), pande80@gmail.com.

Информация об авторах:

Раджив Каул — доктор, магистр (ортопедия), дипломированный специалист в области ортопедии, доцент (ортопедия), член Королевского колледжа хирургов (Глазго), дипломированный специалист по ортопедии (SICOT), drrajivkaul@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6870-9206>;

Раджив Ранджан Дубей — доктор, магистр (ортопедия), дипломированный специалист в области ортопедии, доцент (спортивная медицина), rajdub87@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7929-0658>;

Раджат Агравал — доктор, магистр (ортопедия), директор, президент ASAMI India, drrajataoh@gmail.com;

Ашиш Панде — доктор, магистр (ортопедия), дипломированный специалист в области ортопедии, pande80@gmail.com.

Обзорная статья

УДК 616.71-74:666.3-127:615.33

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-1-119-128>

Элюция антибиотиков из костного цемента: проблемы и пути их решения

Р.А. Шафигулин^{1,2✉}, И.Ф. Ахтямов^{1,2}, А.Л. Емелин^{1,2}, И.А. Беспалов³, К.Н. Акифьев³

¹ Казанский государственный медицинский университет, Казань, Россия

² Республиканская клиническая больница, Казань, Россия

³ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

Автор, ответственный за переписку: Рашид Актасович Шафигулин, rashid221@yandex.ru

Аннотация

Введение. Несмотря на широкое применение костного цемента в лечении пациентов с ортопедической инфекцией, метод не лишен недостатков, важнейшим из которых является ограниченность элюции антибиотиков при локальном использовании спейсеров.

Цель работы — на основе литературных данных определить проблемы элюции антибиотиков из костного цемента и пути их решения.

Материалы и методы. Поиск осуществлен в базах eLIBRARY, PubMed по следующим ключевым словам: bone cement, PMMA, polymethylmethacrylate, antibiotic elution, additive manufacturing, porous constructions, lattice structures, костный цемент, элюция антибиотиков, аддитивное производство, решетчатые структуры. Источники включены исходя из гипотезы о возможности применения преформированных имплантатов на основе решетчатой структуры совместно с костным цементом. Глубина поиска — с 1994 по 2024 год.

Результаты и обсуждение. В настоящее время обозначены следующие пути улучшения элюции антибиотика из костного цемента: изучение типа цемента, его пористости, формы имплантата (спейсера), вида антибиотиков, а также их количества и комбинаций, что наряду с многообразием публикаций при отсутствии приемлемого решения формирует трудную научную проблему. Однако исследования в данной области не привели к появлению какого-либо законченного решения.

Заключение. Сформирована парадигма улучшения элюции антибиотиков из полиметилметакрилата (ПММА), заключающаяся в работе с цементом: с его составом, геометрией и пирогенностью. Предложенные решения улучшения элюции антибиотиков из ПММА зачастую невыполнимы, а иногда и ухудшают эксплуатационные свойства цемента. Иным подходом может стать формирование научных изысканий, направленных на изучение эффективности спейсеров с преформированной основой и нанесением покрытия из костного цемента, без или с минимальным вмешательством в его свойства, заданные изготовителем.

Ключевые слова: костный цемент, полиметилметакрилат, элюция антибиотиков, аддитивное производство, решетчатые структуры

Для цитирования: Шафигулин Р.А., Ахтямов И.Ф., Емелин А.Л., Беспалов И.А., Акифьев К.Н. Элюция антибиотиков из костного цемента: проблемы и пути их решения. *Гений ортопедии*. 2025;31(1):119-128. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-119-128.



Elution of antibiotics from bone cement: problems and ways to solution

R.A. Shafigulin^{1,2✉}, I.F. Akhtyamov^{1,2}, A.L. Emelin^{1,2}, I.A. Beshpalov³, K.N. Akifyev³

¹ Kazan State Medical University, Kazan, Russian Federation

² Republican Clinical Hospital, Kazan, Russian Federation

³ Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

Corresponding author: Rashid A. Shafigulin, rashid221@yandex.ru

Abstract

Introduction The widespread use of bone cement in the treatment of patients with orthopedic infections can be associated with limited elution of antibiotics with use of local spacers.

The **objective** was to determine problems of elution of antibiotics from bone cement and ways to solve them based on literature data.

Material and methods The original literature search was conducted on key resources including Scientific Electronic Library (www.elibrary.ru) and the National Library of Medicine (www.pubmed.org) (1994 to 2024) and using keywords: bone cement, PMMA, polymethylmethacrylate, antibiotic elution, bone cement, antibiotic elution, additive manufacturing, porous constructions, lattice structures. The sources were included based on the hypothesis that preformed implants based on a lattice structure could be used in combinations with bone cement.

Results and discussion The elution of antibiotics from bone cement can be improved through examination of the cement type, the porosity, the implant/spacer shape, the type of antibiotics, quantities and combinations administered that pose a difficult scientific problem in the absence of an acceptable solution along with the variety of publications. However, research in this area has not led to any complete solution.

Conclusion A paradigm has been developed for improving the elution of antibiotics from polymethyl methacrylate (PMMA) to include working with the cement: its composition, geometry and pyrogenicity. Solutions offered for improving the elution of antibiotics from PMMA are often impracticable and can deteriorate the performance properties of cement. Another approach can involve a research aimed at studying the effectiveness of spacers with a preformed base and bone cement coating, without or with minimal interference with the properties specified by the manufacturer.

Keywords: bone cement, polymethyl methacrylate, antibiotic elution, additive manufacturing, lattice structures

For citation: Shafigulin RA, Akhtyamov IF, Emelin AL, Beshpalov IA, Akifyev KN. Elution of antibiotics from bone cement: problems and ways to solution. *Genij Ortopedii*. 2025;31(1):119-128. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-119-128.

ВВЕДЕНИЕ

Открытый в 30-е годы прошлого века костный цемент (КЦ) на основе полиметилметакрилата (ПММА) в настоящее время стал неотъемлемой частью эндопротезирования благодаря своим механическим свойствам, коммерческой доступности, возможности релиза антибиотиков и большей изученности по сравнению с другими транспортными системами. С момента добавления в его состав антибиотика, предложенного в 1970 г., началась эра активного использования ПММА для профилактики и лечения пациентов с ортопедической инфекцией [1, 2]. Несмотря на использование в настоящее время других депо-систем, которые потенциально превосходят КЦ по элюционным свойствам антибиотиков, что доказано *in vitro* и *in vivo* исследованиями, КЦ еще долгие годы будет востребован в клинической практике [3, 4]. Однако изучение свойств цемента с антибиотиком выявило ряд проблем, одной, возможно и наиболее важной, из которых является контроль элюции антибиотика в окружающую среду.

Несмотря на большое количество работ, посвященных этой теме, в настоящее время нет уверенности, что проблема решена [5–11]. Суммируя данные имеющихся публикаций, можно утверждать, что на данный момент для улучшения элюции антибиотиков из ПММА обозначены следующие направления исследования: вид цемента, форма имплантата из цемента, его пористость, антибиотики в комбинациях, как по номенклатуре, так и по количеству, что при всем многообразии формирует актуальную научную проблему.

Цель работы — на основе литературных данных определить проблемы элюции антибиотиков из костного цемента и пути их решения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Поиск информации осуществляли в базах PubMed для англоязычных источников и eLIBRARY для русскоязычных источников по ключевым словам: bone cement, PMMA, polymethylmethacrylate, antibiotic elution, костный цемент, элюция антибиотиков. Глубина поиска — с 1994 по 2024 год. В обзор включены статьи, в которых присутствовала информация о проблеме элюции антибиотиков из костного цемента и/или пути ее улучшения. Источники, включенные в раздел «Обсуждение», отобраны исходя из гипотезы о возможности применения преформированных имплантатов на основе решетчатой структуры совместно с костным цементом. Поисковые слова источников раздела «Обсуждение»: additive manufacturing, porous constructions, lattice structures, аддитивное производство, решетчатые структуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Элюция в зависимости от вида цемента

КЦ различаются в зависимости от производителя, вязкости, длительности полимеризации, предполагаемого варианта использования, наличия дополнительных включений и, соответственно, имеют разные способности релиза антибиотика. К примеру, сравнение элюции антибиотика из цемента средней или высокой вязкости иллюстрирует специфическое высвобождение для каждого из видов. Несмотря на то, что оба цемента содержат одинаковую порцию антибиотика, именно из Palacos® R+G высвобождается больше гентамицина [9].

G.T. Ensig et al. [12] отметили релиз гентамицина и клиндамицина из костного цемента Copal (Biomet Merck, Дармштадт, Германия) в течение 28 дней с длительным ингибированием GS *S. aureus* и GR коагулазоотрицательного *S. aureus*. Однако костный цемент Palacos R-G (Schering-Plough, Maarssen, Нидерланды) не смог обеспечить непрерывное значительное высвобождение гентамицина после пер-вых 24 часов [13].

Элюция антибиотика в зависимости от формы имплантата из костного цемента

Несмотря на то, что форма имплантированного элемента из костного цемента зависит от анатомических особенностей, существует доказанная корреляция между формой и элюцией антибиотика. В своем исследовании R.E. Duey et al. [14] не смогли выявить разницу между объемами имплантированных КЦ, но получили прямую взаимосвязь между площадью имплантата и релизом антибиотика. Чем больше площадь, тем выше выделение антибиотика, что подтверждается и результатами группы B.A. Masri et al. [15]. В их исследовании выявлено увеличение элюции антибиотика при увеличении его площади и неизменном объеме цемента. Данное обстоятельство объясняется тем, что релиз антибиотика происходит с наиболее поверхностных слоев цемента. Элюция подавляющего количества антибиотика происходит из поверхностного слоя толщиной 100 мкм, тогда как только 19 % его было элюировано из более глубокого слоя толщиной 700 мкм [9].

Элюция антибиотика в зависимости от пористости костного цемента

Пористая структура костного цемента увеличивает площадь поверхности выделения (за счет контакта с окружающей средой), следовательно, выхода антибиотика. R. Miller et al. [16] создали высокопористый костный цемент путем добавления кусков ванкомицина. Значительно более

высокую элюцию антибиотика наблюдали в случае, когда антибиотик был тщательно измельчен перед добавлением его в КЦ [16]. В то же время неомогенное распределение антибиотика в КЦ может привести к неравномерному релизу антибиотика. A.C. McLaren et al. [17] сравнили различные методы ручной гомогенизации цемента и антибиотика и не выявили, что ручное смешивание приводило к неравномерному релизу антибиотика. G. Lewis et al. [18] анализировали загруженный вручную и предварительно смешанный Cemex (Tecres, Sommacampagna, Италия). Хотя в этом исследовании сообщалось о схожей структуре цементов после полимеризации, скорость элюирования антибиотика, добавленного кустарно, была в среднем на 36 % ниже [18]. Из-за этих довольно противоречивых результатов некоторые авторы вообще не рекомендуют использовать кустарное добавление антибиотиков к КЦ, утверждая, что изготовленные промышленным путем КЦ с антибиотиком обеспечивают равномерный релиз последнего [18].

Независимо от метода добавления антибиотика в костный цемент пористость можно изменить с помощью системы вакуумного смешивания, которая предназначена для уменьшения попадания воздуха в цемент. Однако влияние вакуумного смешивания на элюцию антибиотика зависит также от таких факторов как растворимость антибиотика в воде, градиент диффузии и, прежде всего, тип цемента [19, 20].

J. Meyer et al. сравнили влияние системы вакуумного смешивания на различные коммерчески доступные КЦ, содержащие гентамицин. В то время как элюция антибиотика была увеличена при использовании вакуумного смесителя для Palacos® R+G и Cobalt® G-HV (Biomet, Варшава, Индиана, США), она оказалась ниже для Cemex® Genta (Exactech, Гейнсвилл, Флорида, США), SmartSet® GMV (DePuy, Варшава, Индиана, США) и VersaBond® AB (Smith & Nephew, Лондон, Великобритания) [21].

Пористость может быть дополнительно изменена *in vitro* с помощью специальных добавок [22]. M. Shi et al. выявили, что добавленный желатин способствует образованию пор в костном цементе [23]. L. Chen et al. исследовали корреляцию пористости ПММА с размером частиц и массовой долей желатина [24]. Другими компонентами, представляющими интерес для увеличения пористости костного цемента, являются соединения фосфата кальция (CaP), которые могут увеличивать пористость костных цементов, тем самым увеличивая элюцию препарата [25]. Другим соединением-порогоном выступает карбонат кальция, являющийся компонентом коммерчески доступного костного цемента Copal® spacet, специально предназначенного для использования в качестве основы спейсера. R.G. Bitsch et al. [26] сообщили о микропористой структуре этого вида цемента в отличие от плотной структуры Palacos® R+G, лучшее вымывание нескольких антибиотиков наблюдали при использовании Copal® spacet. В то же время другое исследование не смогло подтвердить заявляемые характеристики элюции антибиотиков из цемента Copal® spacet и Palacos® R+G при загрузке комбинации ванкомицина и гентамицина в эти два цемента [27]. Для повышения пористости КЦ с одновременным контролем элюции антибиотиков используют включение в КЦ биоразлагаемых полимеров на основе полимолочно-гликолиевой кислоты (PLGA) [28–30]. Как вариант могут быть использованы крупные кристаллы поваренной соли в наружных слоях имплантата из КЦ. Растворяясь, соль оставляет объемные лакуны в поверхностных слоях имплантата, что повышает площадь выхода антибиотика в окружающую среду [31]. Простейшим способом повышения отдачи антибиотика является перфорация имплантата в стадии изготовления из КЦ [32].

Элюция антибиотиков и комбинаций в зависимости от их вида, количества и технологии включения в КЦ

Добавление антибиотиков в КЦ снижает его механические характеристики, поскольку молекулы антибиотиков изменяют процессы полимеризации цемента. P.H. Hsieh et al. сообщили о снижении прочности на сжатие на 37 % при добавлении раствора гентамицина к КЦ Simplex (Stryker, Kalamazoo, MI, USA) [33]. В настоящее время сложился консенсус, что в КЦ следует добавлять только кристаллические антибиотики, которые *in vitro* признаны подходящими для включения в КЦ [34, 35]. На механические свойства КЦ влияют не только его форма, но и его тип. Некоторые антибиотики в большей степени нарушают процессы полимеризации КЦ, чем другие. Например, рифампицин, имеющий кристаллическую структуру, может полностью подавлять процессы полимеризации КЦ [36].

Говоря о возможности использования того или иного вида антибиотиков, следует неуклонно оценивать температурную устойчивость последнего, поскольку при полимеризации КЦ разогревается значительно выше показателя в 50–60° по Цельсию. Однако, как было установлено в отечественном исследовании, кратковременный нагрев в ходе полимеризации до 80° не привел к деструкции противотуберкулезных препаратов [37].

Важной составляющей также является количество добавляемого антибиотика, которое к настоящему времени окончательно не установлено. В исследовании с КЦ Palacos® R+G и Copal® spacet добавление доли антибиотика в количестве 2,5 % снизило прочность на сжатие костного цемента до значения, близкого к требуемым 70 МПа [27].

A. Lilikakis et al. изучили влияние добавления ванкомицина к КЦ Palamed® (Haereus, Ханау, Германия) и Copal® G+C (Haereus, Ханау, Германия) и установили, что добавление 5 % ванкомицина сохраняло прочность на сжатие КЦ значительно выше требуемых 70 МПа для обоих цемента. Даже при добавлении 10 % ванкомицина прочность на сжатие снизилась всего на 18,15 и 17,48 % соответственно, а прочность на сжатие обоих цемента осталась выше порогового значения 70 МПа [38]. Доля антибиотика в КЦ 5–10 % считается достаточной для приготовления временного спейсера [34, 35, 38, 39]. Поскольку механическую нагрузку на временный спейсер можно контролировать путем ограничения весовой нагрузки, ряд авторов допускает увеличение доли антибиотика до 20 % при его изготовлении [40], но в то же время следует учитывать тот факт, что увеличение дозы антибиотика выше 5 % может приводить к замедлению полимеризации костного цемента [37].

Вызывает вопросы техника добавления антибиотика в КЦ. K.D. Kuhn et al. сообщают о необходимости тщательной гомогенизации кристаллов антибиотика и сухого компонента КЦ при дробном добавлении антибиотика [34]. В то же время, J. Parvizi et al. предлагают одномоментное добавление антибиотика в цементный порошок, что приводит к «грубой» гомогенизации. Утверждается, что подобная техника способствует максимальному вымыванию антибиотика после затвердевания КЦ из-за образования конгломератов добавляемого препарата [41]. J.C. Laine et al. сравнили эффекты различных методов добавления антибиотиков и подтвердили влияние разности степени гомогенизации КЦ и антибиотика. Отказ от процесса гомогенизации вызвал образование пор в КЦ. Несмотря на это, последующие механические испытания не выявили существенной разницы в его прочности [42].

Таким образом, выбор антибиотика для включения в КЦ обусловлен его доступностью, стерильностью, термостабильностью, наличием или отсутствием кристаллической формы в виде порошка и достаточной кинетикой элюции.

Как правило, релиз антибиотиков происходит либо непрерывно, либо «взрывным» способом. Типичным представителем элюции с непрерывной кинетикой является гентамицин [9]. Ванкомицин же обычно высвобождается взрывоподобно с высокой скоростью начального релиза с переходом на резкий его спад. R. Galvez-Lopez et al., сравнив кинетику элюции 11 различных антибиотиков, пришли к выводу, что каждый антибиотик демонстрирует свою собственную картину высвобождения. Например, моксифлоксацин показал более длительный релиз, чем ванкомицин, меропенем демонстрирует непрерывно снижающуюся кинетику элюции в течение длительного периода времени [36].

Комбинация антибиотиков дополнительно влияет на элюирование. Описаны синергические и антагонистические эффекты антибиотиков, включенных в КЦ. P.H. Hsieh et al. исследовали элюирование антибиотиков гентамицина и ванкомицина из КЦ Simplex®. Данная комбинация увеличила высвобождение ванкомицина на 145 %, а гентамицина на 45 % соответственно [33]. E.P. Paz et al. изучали комбинации более двух антибиотиков: добавление цефазолина значительно увеличило элюирование ванкомицина из КЦ, содержащего ещё и гентамицин [43]. Однако кинетика элюции изменяется не только комбинацией антибиотиков, но и, как сказано выше, их относительной массой в КЦ. Ярким примером является значительное увеличение кинетики элюции гентамицина при увеличении доли ванкомицина в цементе [20]. L. Kaplan et al. исследовали комбинацию даптомицина с тобрамицином и выявили повышение кинетики релиза даптомицина при начальном увеличении количества тобрамицина [44].

Для локального воздействия на микрофлору при применении спейсера из КЦ в ряде комбинаций самым простым способом увеличения кинетики элюции антибиотика является повышение его доли в цементе. Так, увеличение количества ванкомицина приводило к увеличению элюции антибиотика из цемента [27].

Другим направлением, позволяющим увеличить активность антибиотиков в отношении патогенной микрофлоры, является использование комбинации препаратов серебра с различными антибиотиками [45–47].

Сводная информация о факторах, влияющих на элюцию антибиотиков и способах ее улучшения, приведена в таблице 1.

Таблица 1

Факторы, влияющие на элюцию антибиотиков

Автор, год исследования	Вид КЦ	Используемые антибиотики (АБ)	Фактор, влияющий на элюцию АБ	Результат
G.T. Ensing et al., 2014 [12]	Copal, Palacos R-G	Гентамицин, Клиндамицин	В зависимости от вида КЦ	КЦ Copal превосходит Palacos R-G
R.E. Duey et al., 2012 [14]	Simplex P	Тобрамицин, Ванкомицин	Увеличение площади КЦ	Увеличение площади приводит к увеличению элюции АБ
B.A. Masri et al., 1995 [15]	Simplex P	Гентамицин	Увеличение площади КЦ	Увеличение площади приводит к увеличению элюции АБ

Таблица 1 (продолжение)

Факторы, влияющие на элюцию антибиотиков

Автор, год исследования	Вид КЦ	Используемые антибиотики (АБ)	Фактор, влияющий на элюцию АБ	Результат
R. Miller et al., 2012 [16]	Simplex P	Ванкомицин	Увеличение пористости КЦ при замешивании за счет включения более крупных фрагментов АБ	Увеличение пористости КЦ приводило к увеличению элюции АБ
A.C. McLaren et al., 2009 [17]	Cemex G, Cobalt G-HV, Palacos G, Simplex P, Smart Set G HV	Гентамицин	Способ замешивания КЦ	Не выявлено разницы между «кустарным» и фабричным смешиванием КЦ с АБ
G. Lewis et al., 2005 [18]	Cemex G	Гентамицин	Способ замешивания КЦ	Кустарное замешивание КЦ с АБ снижает скорость элюции
J. Meyer et al., 2011 [21]	Palacos R+G, Cobalt G-HV, Cemex Genta	Гентамицин	Использование вакуумного замешивания	Элюция АБ увеличена у Palacos R + G и Cobalt G-HV, и уменьшена у Cemex Genta
K. Wu et al., 2016 [22]	Osteobond copolymer bone cement, Zimmer	Гентамицин	Увеличение пористости КЦ за счет добавления желатина и керамических гранул	Добавление порошков увеличило элюцию АБ. Элюция АБ была выше при добавлении желатина
M. Shi et al., 2011 [23]	SmartSet	Колистин	Увеличение пористости КЦ за счет добавления желатина	Добавление желатина увеличивает пористость КЦ
L. Chen et al., 2019 [24]	Mendec Spine Resin and Kit	Гентамицин	Увеличение пористости КЦ за счет добавления желатина	Увеличение массовой доли желатина коррелирует с увеличением элюции АБ
R.G. Bitsch et al., 2015 [26]	Copal, Palacos R + G	Гентамицин	Увеличение пористости КЦ за счет добавления CaCO ₃ в КЦ Copal	Добавление CaCO ₃ увеличивает элюцию АБ
S.P Boelch et al., 2018 [27]	Copal, Palacos R + G	Гентамицин	Увеличение пористости КЦ за счет добавления CaCO ₃ в КЦ Copal	Не выявлена разница в элюции
P.P. Spicer et al., 2013 [30]		Колистин	Увеличение пористости КЦ за счет добавления полимолочной-ко-гликолевой кислоты (PGLA)	Добавление PGLA увеличивает элюцию
И.Ф. Ахтямов и др., 2015 [31]	Не указан	Не указан	Добавление кристаллов поваренной соли в застывающий КЦ	Растворяясь, поваренная соль увеличивает площадь отдачи АБ
Г.В. Куропаткин, И.Ф. Ахтямов, 2014 [32]	Не указан	Не указан	Увеличение площади КЦ за счет его перфорации	Увеличенная площадь КЦ увеличивает элюцию АБ
A. Zahar, P. Hannah, 2016 [40]	Не указан	Не указан	Увеличение массовой доли АБ до 20 %	Увеличение массовой доли АБ ведет к увеличению элюции АБ
J.C. Laine et al., 2011 [42]	DePuy SmartSet MV Bone Cement	Ванкомицин	Отказ от процесса гомогенизации при смешивании	Увеличение пор в КЦ при отказе гомогенизации при смешивании
R. Galvez-Lopez et al., 2014 [36]	Medium viscosity bone cement DePuy	Ванкомицин, Гентамицин, Даптомицин, Моксифлоксацин, Рифампицин, Цефотаксим, Цефепим, Амоксициллин, Клавуланат, Ампициллин, Меропенем, Эртапенем	Вид АБ	Элюция меняется в зависимости от вида АБ
P.H. Hsieh et al., 2009 [33]	Simplex	Ванкомицин, Гентамицин	Комбинирование АБ	Оба АБ потенцировали увеличение элюции друг друга
E.P. Paz et al., 2015 [43]	Palacos R + G	Цефазолин, Ванкомицин	Комбинирование АБ	Добавление цефазолина значительно увеличило элюирование ванкомицина из костного цемента, содержащего ещё и гентамицин
L. Kaplan et al., 2012 [44]	Не указано	Даптомицин, Тобрамицин	Комбинирование АБ	Увеличение начальной концентрации тобрамицина увеличивает элюцию даптомицина

Таблица 1 (продолжение)

Факторы, влияющие на элюцию антибиотиков

Автор, год исследования	Вид КЦ	Используемые антибиотики (АБ)	Фактор, влияющий на элюцию АБ	Результат
Е.О. Перецманас и др., 2021 [37]	Cemex	Изониазид, Циклосерин, Рифампицин, Амикацин, Канамицин, Этамбутол	Вид АБ	Разные виды противотуберкулезных препаратов показали разную динамику элюции
Е.М. Гордина и др., 2024 [45]	Depuy CMW 1 Gentamicin	Цефтазидим, Ванкомицин, Повиаргол	Добавление препаратов серебра	Увеличение препаратов серебра увеличивало АБ эффективность образцов
С.А. Божкова и др., 2023 [46]	Depuy CMW 1 Gentamicin	Ванкомицин, Повиаргол	Добавление препаратов серебра	Добавление препаратов серебра увеличивало АБ эффективность образцов
С.А. Божкова и др., 2021 [47]	Depuy CMW 1 Gentamicin	Ванкомицин, Повиаргол	Добавление препаратов серебра	Комбинация ванкомицина с высокодисперсным серебром пролонгировала антимикробную активность образцов

ОБСУЖДЕНИЕ

Обращаясь к опубликованным трудам, можно говорить, что сформирована парадигма улучшения элюции антибиотиков из ПММА, заключающаяся, по большому счету, в работе с самим цементом: с его составом, геометрией и структурой. Однако следование ей не привело к появлению какого-либо законченного решения, зачастую невыполнимо (не внедрено), а иногда и снижает эксплуатационные и качественные свойства КЦ.

Гипотетически увеличение площади поверхности цемента, его пористости и, соответственно, релиза антибиотика можно добиться путем индивидуализированного проектирования. В таком случае структура импланта должна позволять не только помещать цемент внутри изделия, но и формировать контактную площадь имплантата с цементом и костью, позволяющую антибиотику элюировать из более глубоких слоев КЦ. На сегодняшний день одним из предлагаемых решений могут стать имплантаты, имеющие решетчатую структуру, что позволит поместить цемент с антибиотиком внутри изделия, увеличивая площадь контакта и пористость при сохранении качественных и эксплуатационных свойств.

В работе П.В. Большакова и др. [48] представлены результаты проектирования и оптимизации решетчатого эндопротеза ножки кролика, морфологическое исследование свидетельствует о сохранении диффузии веществ и миграции клеток через решетчатый эндопротез. Помещать цемент внутри решетчатого импланта можно с помощью специальной силиконовой матрицы, аналогичной для отливки спейсеров. Для формирования контактной площади грани силиконовой матрицы должны иметь выступы, с помощью которых и будет увеличиваться свободная площадь поверхности цемента.

Зачастую решетчатые имплантаты изготавливают с помощью аддитивных технологий [49–51]. Преимущества данной технологии заключаются не только в возможности изготовления индивидуализированных изделий для учета особенностей пациента, но и в возможности производства сложной нерегулярной трёхмерной геометрии [52, 53]. Изделия, произведенные при помощи аддитивных технологий, обеспечивают как необходимые прочностные свойства, так и биосовместимость, биоразлагаемость, стерилизуемость [54, 55]. Для производства имплантатов чаще всего используют технологию SLM-печати, так как она позволяет изготавливать детали с высокой точностью, спроектированной геометрией и детализацией. Такая технология печати предназначена для имплантатов с решетчатой структурой, она улучшает остеоинтеграцию [56, 57]. При переходе к персонализированной медицине необходимо сканирование органов, которые в дальнейшем будут заменены. В качестве одного из методов получения цифрового двойника органа является компьютерная томография [58–61]. Такое решение позволяет проводить численные расчеты для оценки напряженно-деформированного состояния имплантов и костного органа [57].

Наиболее распространено два метода проектирования изделий, изготавливаемых с помощью аддитивных технологий [62]. Первый метод — использование в ходе проектирования элементарных ячеек, они же базовые элементы, которые заполняют объем изделия [63]. Так, в работе Н.В. Харина и др. [64] отмечается влияние распределения элементарной ячейки на прочность конструкции. Вторым методом является использование топологической или структурной оптимизации. П.В. Большаков и др. [65] исследовали методы оптимизации для тазобедренных имплантов, в ходе данной работы достигнуто 11 % пористость имплантов без ухудшения прочностных характеристик.

Таким образом, использование имплантатов на основе решетчатых структур совместно с КЦ и антибиотиками могло бы позволить улучшить элюцию антибиотика из КЦ, не вмешиваясь или минимально вмешиваясь в его параметры, заданные изготовителем, что могло бы стать одним из вариантов решения данной проблемы. Однако, учитывая тот факт, что отсутствуют какие-либо работы по данному вопросу, данная гипотеза требует подтверждения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Имеющиеся недостатки использования КЦ на основе ПММА нивелируются его явными преимуществами при лечении и профилактике ортопедической инфекции, что еще много лет будет актуально, несмотря на активный рост антибиотикорезистентной микрофлоры.

Многочисленные публикации, посвященные использованию КЦ как экспериментального, так и непосредственно клинического характера, демонстрируют яркую противоречивость подходов к применению КЦ на основе ПММА. Вместе с тем, не вызывает сомнений важность аспекта, формирующего практическую проблему локальной борьбы с инфекционным процессом, контроль элюции антибиотиков при установке спейсеров из КЦ.

Сформирована парадигма улучшения элюции антибиотиков из ПММА, заключающаяся в работе с самим цементом: с его составом, геометрией и структурой. Однако следование парадигме не привело к появлению какого-либо законченного решения, зачастую невыполнимо (не внедрено), а иногда и снижает эксплуатационные качества КЦ.

Иным подходом могут стать научные изыскания, направленные на изучение эффективности спейсеров с преформированной основой и нанесением покрытия из КЦ, без или с минимальным вмешательством в его свойства, заданные изготовителем.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена за счет предоставленного в 2024 году Академией наук Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и прикладных научных работ в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Romanò CL, Scarponi S, Gallazzi E, et al. Antibacterial coating of implants in orthopaedics and trauma: a classification proposal in an evolving panorama. *J Orthop Surg Res*. 2015;10:157. doi: 10.1186/s13018-015-0294-5.
- Winkler H, Haiden P. Allograft Bone as Antibiotic Carrier. *J Bone Jt Infect*. 2017;2(1):52-62. doi: 10.7150/jbji.17466.
- Меликова Р.Э., Цискарашвили А.В., Артюхов А.А., Соколова Н.В. In vitro исследование динамики элюции антибактериальных препаратов, импрегнированных в матрицы на основе полимерного гидрогеля. *Гений ортопедии*. 2023;29(1):64-70. doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-1-64-70.
- Цискарашвили А.В., Меликова Р.Э., Волков А.В. и др. In vivo эффективность полимерных гидрогелей, импрегнированных антибактериальным препаратом, при хроническом остеомиелите. *Гений ортопедии*. 2023;29(5):535-545. doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-5-535-545. EDN: MZYINT.
- Amin TJ, Lamping JW, Hendricks KJ, McIlff TE. Increasing the elution of vancomycin from high-dose antibiotic-loaded bone cement: a novel preparation technique. *J Bone Joint Surg Am*. 2012;94(21):1946-1951. doi: 10.2106/JBJS.L.00014.
- Anagnostakos K, Kelm J, Regitz T, et al. In vitro evaluation of antibiotic release from and bacteria growth inhibition by antibiotic-loaded acrylic bone cement spacers. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*. 2005;72(2):373-378. doi: 10.1002/jbm.b.30171.
- Ensing GT, Hendriks JG, Jongsma JE, et al. The influence of ultrasound on the release of gentamicin from antibiotic-loaded acrylic beads and bone cements. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*. 2005;75(1):1-5. doi: 10.1002/jbm.b.30140.
- Frutos G, Pastor JY, Martínez N, et al. Influence of lactose addition to gentamicin-loaded acrylic bone cement on the kinetics of release of the antibiotic and the cement properties. *Acta Biomater*. 2010;6(3):804-811. doi: 10.1016/j.actbio.2009.08.028.
- von Hertzberg-Boelch SP, Luedemann M, Rudert M, Steinert AF. PMMA Bone Cement: Antibiotic Elution and Mechanical Properties in the Context of Clinical Use. *Biomedicines*. 2022;10(8):1830. doi: 10.3390/biomedicines10081830.
- Wall V, Nguyen TH, Nguyen N, Tran PA. Controlling Antibiotic Release from Polymethylmethacrylate Bone Cement. *Biomedicines*. 2021;9(1):26. doi: 10.3390/biomedicines9010026.
- Божкова С.А., Новокшенова А.А., Конев В.А. Современные возможности локальной антибиотикотерапии перипротезной инфекции и остеомиелита (обзор литературы). *Травматология и ортопедия России*. 2015;21(3):92-107. doi: 10.21823/2311-2905-2015-0-3-92-107.
- Ensing GT, van Horn JR, van der Mei HC, et al. Copal bone cement is more effective in preventing biofilm formation than Palacos R-G. *Clin Orthop Relat Res*. 2008;466(6):1492-1498. doi: 10.1007/s11999-008-0203-x.
- Kendall RW, Duncan CP, Smith JA, Ngui-Yen JH. Persistence of bacteria on antibiotic loaded acrylic depots. A reason for caution. *Clin Orthop Relat Res*. 1996;(329):273-280. doi: 10.1097/00003086-199608000-00034.
- Duey RE, Chong AC, McQueen DA, et al. Mechanical properties and elution characteristics of polymethylmethacrylate bone cement impregnated with antibiotics for various surface area and volume constructs. *Iowa Orthop J*. 2012;32:104-115.
- Masri BA, Duncan CP, Beauchamp CP, et al. Effect of varying surface patterns on antibiotic elution from antibiotic-loaded bone cement. *J Arthroplasty*. 1995;10(4):453-459. doi: 10.1016/s0883-5403(05)80145-7.
- Miller R, McLaren A, Leon C, McLemore R. Mixing method affects elution and strength of high-dose ALBC: a pilot study. *Clin Orthop Relat Res*. 2012;470(10):2677-2683. doi: 10.1007/s11999-012-2351-2.
- McLaren AC, Nugent M, Economopoulos K, et al. Hand-mixed and premixed antibiotic-loaded bone cement have similar homogeneity. *Clin Orthop Relat Res*. 2009;467(7):1693-1698. doi: 10.1007/s11999-009-0847-1.
- Lewis G, Janna S, Bhattaram A. Influence of the method of blending an antibiotic powder with an acrylic bone cement powder on physical, mechanical, and thermal properties of the cured cement. *Biomaterials*. 2005;26(20):4317-4325. doi: 10.1016/j.biomaterials.2004.11.003.

19. Samelis PV, Papagrigorakis E, Sameli E, et al. Current Concepts on the Application, Pharmacokinetics and Complications of Antibiotic-Loaded Cement Spacers in the Treatment of Prosthetic Joint Infections. *Cureus*. 2022;14(1):e20968. doi: 10.7759/cureus.20968.
20. Kuhn KD. *PMMA Cements*. Berlin: Springer; 2014:303.
21. Meyer J, Piller G, Spiegel CA, et al. Vacuum-mixing significantly changes antibiotic elution characteristics of commercially available antibiotic-impregnated bone cements. *J Bone Joint Surg Am*. 2011;93(22):2049-2056. doi: 10.2106/JBJS.J.01777.
22. Wu K, Chen YC, Hsu YM, Chang CH. Enhancing Drug Release From Antibiotic-loaded Bone Cement Using Porogens. *J Am Acad Orthop Surg*. 2016;24(3):188-195. doi: 10.5435/JAAOS-D-15-00469.
23. Shi M, Kretlow JD, Spicer PP, et al. Antibiotic-releasing porous polymethylmethacrylate/gelatin/antibiotic constructs for craniofacial tissue engineering. *J Control Release*. 2011;152(1):196-205. doi: 10.1016/j.jconrel.2011.01.029.
24. Chen L, Tang Y, Zhao K, et al. Fabrication of the antibiotic-releasing gelatin/PMMA bone cement. *Colloids Surf B Biointerfaces*. 2019;183:110448. doi: 10.1016/j.colsurfb.2019.110448.
25. Fini M, Giavaresi G, Aldini NN, et al. A bone substitute composed of polymethylmethacrylate and alpha-tricalcium phosphate: results in terms of osteoblast function and bone tissue formation. *Biomaterials*. 2002;23(23):4523-4531. doi: 10.1016/s0142-9612(02)00196-5.
26. Bitsch RG, Kretzer JP, Vogt S, et al. Increased antibiotic release and equivalent biomechanics of a spacer cement without hard radio contrast agents. *Diagn Microbiol Infect Dis*. 2015;83(2):203-209. doi: 10.1016/j.diagmicrobio.2015.06.019.
27. Boelch SP, Rueckl K, Fuchs C, et al. Comparison of Elution Characteristics and Compressive Strength of Biantibiotic-Loaded PMMA Bone Cement for Spacers: Copal® Spacem with Gentamicin and Vancomycin versus Palacos® R+G with Vancomycin. *Biomed Res Int*. 2018;2018:4323518. doi: 10.1155/2018/4323518.
28. Gentile P, Chiono V, Carmagnola I, Hatton PV. An overview of poly(lactic-co-glycolic) acid (PLGA)-based biomaterials for bone tissue engineering. *Int J Mol Sci*. 2014;15(3):3640-3659. doi: 10.3390/ijms15033640.
29. Mader JT, Calhoun J, Cobos J. In vitro evaluation of antibiotic diffusion from antibiotic-impregnated biodegradable beads and polymethylmethacrylate beads. *Antimicrob Agents Chemother*. 1997;41(2):415-418. doi: 10.1128/AAC.41.2.415.
30. Spicer PP, Shah SR, Henslee AM, et al. Evaluation of antibiotic releasing porous polymethylmethacrylate space maintainers in an infected composite tissue defect model. *Acta Biomater*. 2013;9(11):8832-8839. doi: 10.1016/j.actbio.2013.07.018.
31. Ахтямов И.Ф., Каминский А.В., Поляк Л.Н. и др. Способ изготовления стейсера из костного цемента. Патент РФ на изобретение № 2542510. 20.02.2015. Бюл. № 5. Доступно по: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&rn=9871&DoNumber=2542510&TypeFile=html. Ссылка активна на 16.10.2024.
32. Куропаткин Г.В. и Ахтямов И.Ф. *Костный цемент в травматологии и ортопедии*. Казань: ТаГраф; 2014:128-131.
33. Hsieh PH, Tai CL, Lee PC, Chang YH. Liquid gentamicin and vancomycin in bone cement: a potentially more cost-effective regimen. *J Arthroplasty*. 2009;24(1):125-130. doi: 10.1016/j.arth.2008.01.131.
34. Kühn KD, Renz N, Trampuz A. Local antibiotic therapy. *Unfallchirurg*. 2017;120(7):561-572. (In German) doi: 10.1007/s00113-017-0372-8.
35. Anagnostakos K. Therapeutic Use of Antibiotic-loaded Bone Cement in the Treatment of Hip and Knee Joint Infections. *J Bone Jt Infect*. 2017;2(1):29-37. doi: 10.7150/bjbi.16067.
36. Gálvez-López R, Peña-Monje A, Antelo-Lorenzo R, et al. Elution kinetics, antimicrobial activity, and mechanical properties of 11 different antibiotic loaded acrylic bone cement. *Diagn Microbiol Infect Dis*. 2014;78(1):70-74. doi: 10.1016/j.diagmicrobio.2013.09.014.
37. Перецманас Е.О., Артюхов А.А., Штильман М.И. и др. Исследование элюционных характеристик противотуберкулезных препаратов, смешанных с костным цементом. *Туберкулез и болезни легких*. 2021;99(4):30-35. doi: 10.21292/2075-1230-2021-99-4-30-35.
38. Lilikakis A, Sutcliffe MP. The effect of vancomycin addition to the compression strength of antibiotic-loaded bone cements. *Int Orthop*. 2009;33(3):815-819. doi: 10.1007/s00264-008-0521-3.
39. Lachiewicz PF, Wellman SS, Peterson JR. Antibiotic Cement Spacers for Infected Total Knee Arthroplasties. *J Am Acad Orthop Surg*. 2020;28(5):180-188. doi: 10.5435/JAAOS-D-19-00332.
40. Zahar A, Hannah P. Addition of antibiotics to bone cement for septic prosthesis exchange. *Oper Orthop Traumatol*. 2016;28(2):138-144. (In German) doi: 10.1007/s00064-015-0424-6.
41. Parvizi J. Antibiotic spacers in the infected hip: optimising placement. *Orthop Procs*. 2017;99-B(SUPP_7):126-126. doi: 10.1302/1358-992X.99BSUPP_7.CCJR2016-126.
42. Laine JC, Nguyen TQ, Buckley JM, Kim HT. Effects of mixing techniques on vancomycin-impregnated polymethylmethacrylate. *J Arthroplasty*. 2011;26(8):1562-1566. doi: 10.1016/j.arth.2011.02.011.
43. Paz E, Sanz-Ruiz P, Abenojar J, et al. Evaluation of Elution and Mechanical Properties of High-Dose Antibiotic-Loaded Bone Cement: Comparative "In Vitro" Study of the Influence of Vancomycin and Cefazolin. *J Arthroplasty*. 2015;30(8):1423-1429. doi: 10.1016/j.arth.2015.02.040.
44. Kaplan L, Kurdziel M, Baker KC, Verner J. Characterization of daptomycin-loaded antibiotic cement. *Orthopedics*. 2012;35(4):e503-e509. doi: 10.3928/01477447-20120327-19.
45. Гордина Е.М., Божкова С.А., Гаждимагомедов М.Ш. Антибактериальная активность комбинаций цефтазидима, ванкомицина с препаратом серебра в составе костного цемента. *Проблемы медицинской микологии*. 2024;26(2):104.
46. Божкова С.А., Гордина Е.М., Артюх В.А., Юдин В.Е. Комбинированное действие серебра и ванкомицина в составе костного цемента в отношении основных возбудителей перипротезной инфекции. *Сибирское медицинское обозрение*. 2023;1(1):37-45. doi: 10.20333/25000136-2023-1-37-45.
47. Божкова С.А., Гордина Е.М., Марков М.А. и др. Влияние комбинации ванкомицина с препаратом серебра на длительность антимикробной активности костного цемента и формирование биопленки штаммом MRSA. *Травматология и ортопедия России*. 2021;27(2):54-64. doi: 10.21823/2311-2905-2021-27-2-54-64.
48. Bolshakov P, Raginov I, Egorov V, et al. Design and Optimization Lattice Endoprosthesis for Long Bones: Manufacturing and Clinical Experiment. *Materials (Basel)*. 2020;13(5):1185. doi: 10.3390/ma13051185.
49. Килина П.Н., Сиротенко Л.Д., Козлов М.С., Дроздов А.А. Теплофизические аспекты обеспечения качества высокопористых имплантатов с ячеистой структурой, полученных методом селективного лазерного сплавления. *Российский журнал биомеханики*. 2023;27(4):200-211. doi: 10.15593/RZhBiomeh/2023.4.16.
50. Borovkov AI, Maslov LB, Zhmaylo MA, et al. Elastic properties of additively produced metamaterials based on lattice structures. *Materials Physics and Mechanics*. 2023;51(7):42-62. doi: 10.18149/MPM.5172023_6.
51. Сушенцов Е.А., Мусаев Э.Р., Маслов Л.Б. и др. Компьютерное моделирование, 3D-принтинг и индивидуальное протезирование в лечении больного с остеосаркомой костей таза. *Саркомы костей, мягких тканей и опухоли кожи*. 2019;11(4):53-61.
52. Акифьев К.Н., Харин Н.В., Стаценко Е.О. и др. Пилотное исследование потери устойчивости на сжатие решетчатого эндопротеза с помощью рентгеновской томографии. *Российский журнал биомеханики*. 2023;27(4):40-49. doi: 10.15593/RZhBiomeh/2023.4.03.
53. Федорова Н.В., Косинов А.М. Определение механических параметров и проницаемости пористых костных имплантатов из титанового сплава в условиях их взаимодействия с биологическими жидкостями. *Российский журнал биомеханики*. 2023;28(1):54-66. doi: 10.15593/RZhBiomeh/2024.1.04.
54. Abdudeen A, Qudeiri JEA, Kareem A, Valappil AK. Latest developments and insights of orthopedic implants in biomaterials using additive manufacturing technologies. *J Manuf Mater Process*. 2022;6(6):162. doi: 10.3390/jmmp6060162.

55. Frazar EM, Shah RA, Dziubla TD, Hilt JZ. Multifunctional temperature-responsive polymers as advanced biomaterials and beyond. *J Appl Polym Sci.* 2020;137(25):48770. doi: 10.1002/app.48770.
56. Sufiiarov VSh, V Borisov EV, Sokolova VO, et al. Structural analysis of an endoprosthesis designed with graded density lattice structures. *Int J Numer Method Biomed Eng.* 2021;37(2):e3420. doi: 10.1002/cnm.3420.
57. Müller P, Gembarski PC, Lachmayer R. Design automation of a patient-specific endoprosthesis with multi-objective optimized lattice structures. In: Lachmayer R, Bode B, Kaierle S. (eds.) *Innovative Product Development by Additive Manufacturing 2021*. Springer International Publ.; 2022:113-128. doi:10.1007/978-3-031-05918-6_8.
58. Gerasimov O, Kharin N, Statsenko E, et al. Patient-Specific Bone Organ Modeling Using CT Based FEM. In: *Lecture Notes in Computational Science and Engineering*. Cham: Springer; 2022;141:125-139. doi: 10.1007/978-3-030-87809-2_10.
59. Gerasimov OV, Kharin NV, Fedyanin AO, et al. Bone Stress-Strain state Evaluation using CT based FEM. *Front. Mech. Eng.* 2021;7:688474. doi: 10.3389/fmech.2021.688474.
60. Герасимов О.В., Рахматулин Р.Р., Балтина Т.В., Саченков О.А. Определение механических свойств костной ткани численно-цифровым методом на основе данных компьютерной томографии. *Российский журнал биомеханики.* 2023;27(3):53-66. doi: 10.15593/RZhBiomech/2023.3.04.
61. Харин Н.В., Герасимов О.В., Большаков П.В., и др. Методика определения ортотропных свойств костного органа по данным компьютерной томографии. *Российский журнал биомеханики.* 2019;23(3):460-468. doi: 10.15593/RZhBiomech/2019.3.11.
62. Bolshakov P, Kharin N, Agathonov A, et al. Extension of the Voronoi Diagram Algorithm to Orthotropic Space for Material Structural Design. *Biomimetics* (Basel). 2024;9(3):185. doi: 10.3390/biomimetics9030185.
63. Bolshakov P, Kharin N, Kashapov R, Sachenkov O. Structural Design Method for Constructions: Simulation, Manufacturing and Experiment. *Materials* (Basel). 2021;14(20):6064. doi: 10.3390/ma14206064.
64. Kharin N, Bolshakov P, Kuchumov AG. Numerical and Experimental Study of a Lattice Structure for Orthopedic Applications. *Materials* (Basel). 2023;16(2):744. doi: 10.3390/ma16020744.
65. Bolshakov P, Kuchumov AG, Kharin N, et al. Method of computational design for additive manufacturing of hip endoprosthesis based on basic-cell concept. *Int J Numer Method Biomed Eng.* 2024;40(3):e3802. doi: 10.1002/cnm.3802.

Статья поступила 19.08.2024; одобрена после рецензирования 14.10.2024; принята к публикации 10.12.2024.

The article was submitted 19.08.2024; approved after reviewing 14.10.2024; accepted for publication 10.12.2024.

Информация об авторах:

Рашид Актасович Шафигулин — кандидат медицинских наук, ассистент кафедры, врач — травматолог-ортопед, rashid221@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6146-4470>;

Ильдар Фуатович Ахтямов — доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой, врач — травматолог-ортопед, yalta60@mail.ru;

Алексей Львович Емелин — кандидат медицинских наук, доцент кафедры, врач — травматолог-ортопед, travmatica@mail.ru;

Игорь Алексеевич Беспалов — лаборант-исследователь, bespalovigora@gmail.com;

Кирилл Николаевич Акифьев — лаборант-исследователь, kirill.akifyev@mail.ru.

Information about the authors:

Rashid A. Shafigulin — Candidate of Medical Sciences, orthopaedic surgeon, department assistant, rashid221@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6146-4470>;

Ildar F. Akhtyamov — Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of Department, orthopaedic surgeon, yalta60@mail.ru;

Aleksey L. Emelin — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor of the Department, orthopaedic surgeon, travmatica@mail.ru;

Igor A. Bespalov — research assistant, bespalovigora@gmail.com;

Kirill N. Akifyev — research assistant, kirill.akifyev@mail.ru.

Вклад авторов:

Шафигулин Р.А. — концептуализация, методология, проведение исследования, визуализация исследования, написание первоначального варианта и его редактирование.

Ахтямов И.Ф. — контроль и управление проектом, рецензирование исследования.

Емелин А.Л. — рецензирование, редактирование.

Беспалов И.А. — написание первоначального варианта.

Акифьев К.Н. — написание первоначального варианта.

Обзорная статья

УДК 616-02:616-022:616.72-007.248-093/-098](048.8)

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-1-129-136>

Микробиологический фактор при остеоартритах

Е.О. Перецманас✉, В.В. Зар, Я.А. Рукин, А.А. Казюлина, А.Д. Пахлавонова

Национальный медицинский исследовательский центр фтизиопульмонологии и инфекционных заболеваний, Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Евгений Оркович Перецманас, peretsmanas58@mail.ru

Аннотация

Введение. Остеоартрит (ОА) — распространенное полиэтиологическое заболевание опорно-двигательного аппарата, приводящее к инвалидности, утрате трудоспособности, ухудшению психического здоровья, повышению смертности и представляющее собой серьезную проблему для систем здравоохранения во всем мире, как сегодня, так и в будущем. В последнее время в качестве одного из значимых этиологических аспектов ОА, ранее считавшегося асептическим заболеванием, рассматривается микробиологический фактор.

Цель работы — обобщение литературных данных о результатах исследований, посвященных роли микроорганизмов в этиологии и патогенезе остеоартрита, в том числе при сопутствующей ВИЧ-инфекции.

Материалы и методы. Поиск проведен в электронных базах PubMed и научной библиотеке eLIBRARY по ключевым словам: остеоартрит, микробиота, остеонекроз, ВИЧ, асептический некроз (osteoarthritis, microbiome, osteonecrosis, HIV, aseptic necrosis). Отобраны публикации на русском и английском языках, касающиеся влияния микробиологического фактора на развитие артропатии. Глубина поиска — с 2010 по 2023 год.

Результаты и обсуждение. В последнее время применяют новые, более совершенные микробиологические методики диагностики. В исследованиях суставных образований при отсутствии как клинических, так и лучевых признаков артрита имеются данные о наличии достаточно широкого спектра микроорганизмов, в том числе патогенных и условно патогенных. Это меняет представления об этиологии и патогенезе дистрофических процессов суставного хряща и обуславливает необходимость пересмотра протоколов лечения целого ряда заболеваний суставов. Необходимы многоцентровые комплексные исследования микробиома суставных образований, крови и кишечника.

Заключение. Несомненным является наличие в суставных образованиях патогенной микрофлоры в значительном числе наблюдений, имеются доказательства развития местного инфекционного процесса в локальных клеточных элементах костно-хрящевой ткани у пациентов с ранее диагностированным асептическим остеоартритом. Наиболее вероятные источники инфицирования — микробиомы кишечника и урогенитальный тракт. У больных ВИЧ-инфекцией возможно локальное влияние вируса иммунодефицита на развитие остеонекротических процессов суставных образований.

Ключевые слова: остеоартрит, микробиота, остеонекроз, ВИЧ, асептический некроз

Для цитирования: Перецманас Е.О., Зар В.В., Рукин Я.А., Казюлина А.А., Пахлавонова А.Д. Микробиологический фактор при остеоартритах. *Гений ортопедии*. 2025;31(1):129-136. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-129-136.



Microbiological factors in osteoarthritis

E.O. Peretsmanas✉, V.V. Zar, Ya.A. Rukin, A.A. Kazyulina, A.D. Pakhlavonova

National Medical Research Center of Phthisiopulmonology and Infectious Diseases, Moscow, Russian Federation

Corresponding author: Evgeny O. Peretsmanas, peretsmanas58@mail.ru

Abstract

Introduction Osteoarthritis (OA) is a common polyetiological disease of the musculoskeletal system, leading to disability. The condition can prevent a person from work, affect mental health, increasing mortality and affecting health care resources around the world as a current and future disease burden. OA had been considered an aseptic disease in the past and now the microbiological factor is viewed as one of the significant etiological aspects of the condition.

The **objective** was to summarize the literature data on the role of microorganisms in the etiology and pathogenesis of osteoarthritis, including concomitant HIV infection.

Material and methods The original literature search (2010 to 2023) was conducted on key resources including Scientific Electronic Library (www.elibrary.ru) and the National Library of Medicine (www.pubmed.org). Literature searches included both Russian and English studies reporting the effect of microbiological factors on the development of arthropathy.

Results and discussion New, more advanced microbiological diagnostic methods have been used. There has been evidence of a variety of microorganisms including pathogenic and opportunistic pathogens in the absence of clinical and radiological signs of arthritis. This changes ideas about the etiology and pathogenesis of degenerative processes in the articular cartilage and necessitates a revision of treatment protocols for some joint diseases. Multicenter comprehensive studies of the microbiome of joint formations, blood and intestines are needed.

Conclusions The presence of pathogenic microflora in the joint structures is evident in a significant number of observations. There is evidence of a local infectious process in the local cellular elements of osteochondral tissue in patients with previously diagnosed aseptic osteoarthritis. Intestinal microbiomes and the urogenital tract are most common sources of infection. A local influence of the immunodeficiency virus on the development of osteonecrotic processes in joint formations can be suggested in HIV patients.

Keywords: osteoarthritis, microbiome, osteonecrosis, HIV, aseptic necrosis

For citation: Peretsmanas EO, Zar VV, Rukin YaA, Kazyulina AA, Pakhlavonova AD. Microbiological factors in osteoarthritis. *Genij Ortopedii*. 2025;31(1):129-136. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-129-136.

ВВЕДЕНИЕ

Остеоартрит (ОА) — распространенное заболевание опорно-двигательного аппарата, которое негативно влияет на качество жизни миллионов людей, приводит к инвалидности и представляет серьезную проблему для систем здравоохранения во всем мире. По данным Всемирной организации здравоохранения, около 10 % мирового населения страдает от остеоартрита, что составляет примерно 830 млн. человек [1]. ОА характеризуется патологическими нарушениями суставных образований, приводящими к болям [2], инвалидности [3], утрате трудоспособности [4], ухудшению психического здоровья [5] и повышению смертности [6]. Хотя ОА может поражать практически любой сустав, большая часть инвалидности при ОА связана с заболеваниями коленных, тазобедренных и лучезапястных суставов [7]. Согласно отчетам Минздрава России, за 5 лет (с 2013 по 2017 г.) число пациентов с ОА в стране увеличилось на 3,7 % и составило более 4,3 млн. человек [8]. Однако эти данные не отражают истинного количества больных, поскольку учитывают только выявленные и зарегистрированные случаи заболевания. Так, результаты масштабного российского эпидемиологического исследования подтверждают, что ОА коленных и тазобедренных суставов выявляется у 13 % взрослого населения. Таким образом, истинная численность пациентов с ОА в Российской Федерации может достигать 14–16 млн. человек [9]. Нераспознанная пандемия ОА является ведущей причиной инвалидности в США, показатели которой выше, чем у четырех других вместе взятых наиболее распространенных причин инвалидности [10]. ОА поражает 23 % всего взрослого населения в США, а это примерно половина людей старше 65 лет [11]. Это третье по темпам роста хроническое заболевание, связанное с инвалидностью, во всем мире [12, 13]. По последним оценкам, стоимость лечения ОА в США оценивается в 128 млрд. долларов, что составляет почти 1 % валового внутреннего продукта [14], а заболеваемость тяжелыми формами ОА, требующими замены суставов, увеличивается из-за ожирения и старения [15]. Таким образом, заболеваемость ОА, с учетом демографических факторов и индекса массы тела, в постиндустриальную эпоху увеличилась примерно вдвое, и этот факт еще предстоит полностью объяснить [16]. Несмотря на весомую экономическую составляющую, не существует в полной мере эффективного метода консервативного лечения остеоартрита [17].

Общепризнано, что патогенез ОА включает взаимодействие трех основных факторов: генетической предрасположенности, старения и воздействия окружающей среды [18]. Генетическая наследственность, особенно при ОА коленного сустава, относительно низкая и составляет менее 50 % [19]. Таким образом, значительные усилия исследователей направлены на выявление негенетических факторов риска в патогенезе заболевания.

Распространенность ОА значительно увеличивается с возрастом, особенно среди лиц старше 65 лет. По оценкам, более 30 % людей в возрасте от 65 до 74 лет страдают от остеоартрита, а у людей старше 75 лет это число возрастает до 65 % [1]. У больных ВИЧ-инфекцией, составляющих значительную когорту населения, заболеваемость остеонекротическими процессами суставов выше в 2,5–100 раз, чем в общей популяции [20, 21].

В настоящее время ОА остается в понимании врачей закономерно прогрессирующим заболеванием, требующим в своей терминальной стадии радикального лечения в виде тотальной замены сустава на искусственный. В свою очередь, при эндопротезировании имеются риски расшатывания конструкции и перипротезной инфекции [22, 23].

Существующие альтернативные методы лечения ОА ограничены своей эффективностью и имеют множество нежелательных побочных эффектов. Среди неоперативных методов лечения выделяют немедикаментозные и медикаментозные методы лечения. К немедикаментозным методам относят физиотерапию и лечебную физкультуру, диету и контроль веса. Спектр медикаментов, применяемых при лечении данной патологии, в настоящее время достаточно широк. Это нестероидные противовоспалительные препараты, кортикостероиды, структурно-модифицирующие препараты на базе глюкозамина и хондроитина, гиалуроновой кислоты. К относительно новым методам лечения ОА можно отнести биологические и иммунологические, а именно использование стволовых клеток для восстановления хряща, внедрение генетически модифицированных клеток, применение ингибиторов воспалительных цитокинов и моноклональных антител [24]. Эти методы не являются этиологическими и направлены на подавление воспалительного процесса и его последствий в виде дегенерации гиалинового хряща [25]. Изначально все методы лечения ОА разрабатывались при абсолютной трактовке заболевания как асептического процесса. Однако совершенствование методов микробиологической диагностики привело к появлению данных о наличии микробиологических и вирусных агентов в ранее считавшихся асептических суставных образованиях. Эти данные позволяют по-новому взглянуть на механизм развития столь необратимых при ОА деструктивных процессов суставных образований.

Цель работы — обобщение литературных данных о результатах исследований, посвященных роли микроорганизмов в этиологии и патогенезе остеоартрита, в том числе при сопутствующей ВИЧ-инфекции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В базах данных PubMed и электронной научной библиотеке eLIBRARY проведен поиск источников на двух языках (русский и английский) с использованием ключевых слов: остеоартрит, микробиота, остеонекроз, ВИЧ, асептический некроз (osteoarthritis, microbiome, osteonecrosis, HIV, aseptic necrosis). Глубина поиска — с 2010 по 2023 год включительно. Отобраны публикации, касающиеся влияния микробиологического фактора на развитие артропатии. По ключевым словам и аннотациям отобрано 53 полнотекстовых статьи. Выбор определялся актуальностью данных о результатах исследований, посвященных роли микроорганизмов в этиологии и патогенезе остеоартрита, в том числе и при сопутствующей ВИЧ-инфекции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В клинической практике травматологов-ортопедов лечение хронических заболеваний суставов с дегенеративными процессами суставного хряща сопряжено с большим количеством неудач. Мы наблюдаем неминуемое прогрессирование патологического процесса, несмотря на применение новых методик и препаратов при консервативном лечении и щадящих хирургических технологий. Радикального функционального восстановления на сегодняшний день удается достичь только при помощи эндопротезирования, которое, безусловно, имеет свои риски и недостатки. На наш взгляд, неудачи органосохраняющих методик лечения ОА связаны с ошибочными представлениями об этиологии и патогенезе заболевания, в том числе и недооценки микробиологического фактора. По данным анализируемых литературных источников, несмотря на определение ОА в русскоязычной литературе как дегенеративно-дистрофического заболевания с первичным поражением хряща, бесспорным является наличие воспалительного компонента с активацией провоспалительных цитокинов во всех тканях синовиального сустава и характерных тканевых реакций [26, 27]. В проанализированных исследованиях, благодаря появлению более совершенных микробиологических методик диагностики, приведены данные о наличии достаточно широкого спектра микроорганизмов, в том числе патогенных и условно патогенных, в суставных образованиях при отсутствии как клинических, так и лучевых признаков ОА. Это меняет представления об этиологии и патогенезе дистрофических процессов суставного хряща и обуславливает необходимость пересмотра протоколов лечения целого ряда заболеваний суставов.

Соответственно закономерным является предположение о важной, возможно ключевой, роли микроорганизмов в развитии ОА. Одними из первых микроорганизмов, выделенных из суставов животных и человека, были микоплазмы. Соответственно, еще в конце прошлого века рядом авторов была высказана идея о роли микоплазм в развитии синовита у ревматологических и ортопедических пациентов. Микоплазмы выделены из артритных суставов многих животных [28]. У некоторых пациентов с серологически подтвержденной инфекцией, вызванной *M. pneumoniae*, развился артрит [29, 30, 31], а четырехлетние пики заболеваемости *M. pneumoniae* в Канаде показали значительную эпидемиологическую связь с новыми случаями ювенильного хронического артрита [32]. *M. pneumoniae* и *M. salivarium* также выделены из суставов пациентов с гипогаммаглобулинемией [33, 34, 35]. И хотя этот микроорганизм обычно не рассматривают как патогенный, есть одно сообщение о том, что он вызвал воспалительные изменения в суставе [36]. *M. pneumoniae* и *M. salivarium* также обнаружены в синовиальной жидкости у 24 из 33 пациентов с патологией височно-нижнечелюстного сустава [37].

Значимым фактом, подтверждающим возможность инфекционной природы артропатии, явилось сообщение А. Rozin, ревматолога из медицинского центра Rambam, об успешном применении антибактериального препарата ко-тримоксазол (сульфометаксазол/триметоприм) в терапии остеоартрита. На этом основании и анализе мирового опыта он сделал вывод, что дегенеративные заболевания суставов и позвоночника могут иметь связь с инфекцией [38].

Дальнейшие исследования расширили спектр микроорганизмов, выделенных из суставов. А. Stirling et al. обнаружили в дегенеративно измененных межпозвонковых дисках у пациентов с ишиалгией *Propionibacterium acnes* [39].

В 2016 г. белорусские ученые провели исследования методами полимеразной цепной реакции (ПЦР) и иммуноферментного анализа (ИФА) 90 пациентов с целью «определения этиологически значимых микроорганизмов и антител к ним в биологическом материале пациентов с аваскулярным некрозом головки бедренной кости нетравматического происхождения». Исследовали суставную синовиальную жидкость, удаленные фрагменты головки бедренной кости и капсулы сустава, полученные в результате эндопротезирования. По данным ПЦР-исследования 59 образцов синовиальной жидкости обнаружены ДНК вируса Эпштейна – Барр в 15,3 %, ДНК вируса простого герпеса (ВПГ) 1 и 2 типов в 5,1 %, ДНК цитомегаловирусной инфекции (ЦМВ) в 3,4 %, ДНК *C. trachomatis* в 5,1 % образцов. «В 3,4 % образцов обнаружена ДНК *Mycoplasma hominis*. В синовиальной оболочке у 1 из 51 (2,0 %) пациента обнаружена ДНК ЦМВ и у 1 (2,0 %) — наличие фрагмента ДНК плазмиды *C. trachomatis*. ДНК вируса

Эпштейна – Барр обнаружена в 9 (17,7 %) образцах. ДНК *M. genitalium* и ДНК *U. urealyticum/parvum* обнаружены в 2,0 %. В хрящевой ткани тазобедренного сустава в 2 из 53 (3,8 %) случаях детектирована ДНК *S. trachomatis*. В 1 случае (1,9 %) обнаружена ДНК ВПГ 1 и 2 типов. В 4 случаях (7,6 %) обнаружена ДНК вируса Эпштейна – Барр. В 1 случае (1,9 %) обнаружена ДНК *Ureaplasma urealyticum/parvum*. По результатам исследования у 26 из 90 (28,9 %) пациентов с аваскулярным некрозом головки бедренной кости нетравматического генеза на фоне ранее установленного микробиологического заключения «асептический некроз» выделен целый ряд внутриклеточных микроорганизмов. В значительном числе случаев определялись маркеры вируса герпеса и хламидийной инфекции (у 22,2 % и 14,4 % обследованных соответственно). Авторы сделали вывод о возможной диссеминации патогенов из первичных урогенитальных очагов инфекции и их роли в развитии и прогрессировании аваскулярного некроза головки бедренной кости [40].

В последние годы с появлением более совершенных методик обнаружения микроорганизмов во множестве исследований начали изучать микробиому человека, в том числе микробиоту суставов. Группа исследователей в 2020 г. изучила состав микробиоты в коленном и тазобедренном суставах у больных с ОА в сравнении со здоровыми пациентами. Основными микроорганизмами, выделенными из коленного сустава, были бактерии семейства *Micrococcaceae*, *Exiguobacterium*. Превалирующими семействами бактерий в тазобедренном суставе были *Rhodocyclaceae* и *Proteobacteria*. Более того, показано, что микроорганизмы из разных суставов были генетически далеки друг от друга [41].

Несколько исследований оценили состав и разнообразие кишечного микробиома у пациентов с ОА. Большинство сообщило о снижении бактериального разнообразия (альфа-разнообразия) у пациентов с ОА, тогда как некоторые свидетельствовали о росте микробной массы, ассоциированной с ОА. Крупнейшим из этих исследований является работа, опубликованная в 2019 году C.G. Boer et al., где фекальный микробиом оценен у 1427 пациентов с ОА коленного сустава и контрольной группой здоровых пациентов [42]. Таким образом выделены бактериальные маркеры (класс *Bacilli*, порядок *Lactobacillales*, семейство *Streptococcaceae*, род *Streptococcus*), ассоциированные с болью и выпотом в коленном суставе, подтвержденным при МРТ у пациентов с ОА [43]. Изменения микробиома тесно связаны с процессом заболевания ОА и с отдельными факторами риска ОА. Вмешательства, направленные на микробиом, по данным авторов, потенциально предотвращают или замедляют прогрессирование ОА [44].

В 2018 году B. Chen et al. опубликовали данные сравнительного анализа орофарингиальной микрофлоры 155 здоровых пациентов, 110 пациентов с ревматоидным артритом и 67 пациентов с ОА коленного сустава, идентифицированной с помощью секвенирования гена 16S рРНК. Пациенты с ОА показали повышение бактериального разнообразия в сравнении с контрольной группой, включая *Firmicutes*, *Streptococcus*, *Actinomyces*, *Ruminococcus*, *Bifidobacterium* [45].

М.Т. Torchia et al., используя методики нового поколения (NGS) у 12 из 40 пациентов (30 %), перенесших первичное тотальное эндопротезирование, выделили, по крайней мере, один микроорганизм из пораженного коленного сустава. У всех пациентов идентифицировано 48 уникальных микроорганизмов, из них четыре были грибами (*Cladosporium herbarum*, *Alternaria alternata*, *Filobasidium magnum*, *Naganishia friedmannii*). Наиболее распространенным микроорганизмом была *E. coli* (выявлена у семи пациентов из 10 отдельных образцов) [46]. На основании исследования авторы высказали мнение, что наибольшую опасность представляют не патогенные микробы, а нативный микробиом. Мнение о роли микробиома как этиологического фактора развития остеоартрита поддержали и другие авторы. Так, исследователи из США показали, что в синовиальных оболочках суставов присутствует микробиом и проиллюстрировали его роль в прогрессировании заболевания ОА. Данные секвенирования РНК синовиальной ткани пациента с ОА сопоставлены с библиотекой эталонных микробных геномов для выявления микробных считываний, указывающих на обилие микробов. После поправки на контаминацию авторы идентифицировали 43 микроба, численность которых различается в группе пациентов с ОА и в образцах здоровых пациентов. Авторы подчеркнули, что выделенные микробы являются частью микробиома кишечника. Особо отмечен тот факт, что с помощью высокопроизводительного секвенирования РНК идентифицированы легитимные отдельные бактериальные последовательности, и количество микробной массы было значительно выше при ОА по сравнению с нормой, хотя все биопсии получены в одном и том же медицинском учреждении [47]. В качестве механизма инфицирования суставной полости предполагалось нарушение барьерной функции кишечника, приводящее к микробной транслокации. Ряд других опубликованных исследований подтверждает, что миграция патогенных бактерий из кишечника в синовиальную оболочку у пациентов с ОА может способствовать патогенезу ОА [48, 49, 50]. Таким образом, в отличие от первоначального мнения о стерильности суставов все больше данных указывает на наличие микробиома синовиальной жидкости и синовиальной ткани [51, 52]. К. Goswami et al., используя метод секвенирования 16S-рРНК, в многоцентровой работе с высоким уровнем доказательности показали наличие микрофлоры в виде различных патогенных и условно-патогенных бактерий в полости крупных суставов у пациентов с артрозом после внутрисустав-

ставных инъекций и введения гиалуроната натрия и кортикостероидов [53]. Результаты этого исследования подтверждают, что предшествующая внутрисуставная инъекция и внутрибольничная флора могут влиять на микробный состав сустава.

Больные ВИЧ-инфекцией составляют особую когорту ортопедических пациентов. Влиянию микроорганизмов на этиологию и патогенез ОА у данной категории больных посвящены работы целого ряда авторов. Еще в 1987 г. R.H. Withrington et al. выделили ВИЧ из синовиальной жидкости пациента с ВИЧ-ассоциированным олигоартритом и предположили «прямое воспалительное действие вируса иммунодефицита на костно-суставную систему» [54]. S.L. Lamers et al. привели данные о наличии ДНК ВИЧ в патологических тканях, полученных при аутопсии [55]. Обнаружение в синовиальной жидкости пораженных суставов антигена p24 в ряде случаев на порядок выше, чем в крови, ДНК ВИЧ и туберетикулярных включениях [55, 56], что также навело исследователей на мысль о возможной вирусной этиологии воспалительного процесса. В 2018 году французские ученые экспериментально доказали роль остеокластов, как резервуара вируса ВИЧ, и *in vivo* продемонстрировали «прямое разрушающее действие ВИЧ-1 на структуру и функцию остеокластов» [57]. Российские исследователи из НМИЦ ФПИ в своем исследовании обнаружили РНК вируса иммунодефицита в костных биоптатах из головки бедренной кости при ранее установленном диагнозе асептического некроза [58].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несомненным является наличие в значительном числе наблюдений в суставных образованиях патогенной микрофлоры, имеются доказательства развития местного инфекционного процесса в локальных клеточных элементах костно-хрящевой ткани у пациентов с ранее диагностированным асептическим ОА. Наиболее вероятными источниками инфицирования являются микробиом кишечника и урогенитальный тракт. Необходимы многоцентровые комплексные исследования микробиома суставных образований, крови и кишечника.

У больных ВИЧ-инфекцией вероятно локальное действие вируса иммунодефицита на развитие остеонекротических процессов в суставных образованиях.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Информированное согласие на публикацию. Не требуется.

Этическая экспертиза. Не применима.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Hunter DJ, Bierma-Zeinstra S. Osteoarthritis. *Lancet*. 2019;393(10182):1745-1759. doi: 10.1016/S0140-6736(19)30417-9.
- Arendt-Nielsen L, Nie H, Laursen MB, et al. Sensitization in patients with painful knee osteoarthritis. *Pain*. 2010;149(3):573-581. doi: 10.1016/j.pain.2010.04.003.
- McAlindon TE, Cooper C, Kirwan JR, Dieppe PA. Determinants of disability in osteoarthritis of the knee. *Ann Rheum Dis*. 1993;52(4):258-262. doi: 10.1136/ard.52.4.258.
- Sharif B, Garner R, Sanmartin C, et al. Risk of work loss due to illness or disability in patients with osteoarthritis: a population-based cohort study. *Rheumatology* (Oxford). 2016;55(5):861-868. doi: 10.1093/rheumatology/kev428.
- Gleicher Y, Croxford R, Hochman J, Hawker G. A prospective study of mental health care for comorbid depressed mood in older adults with painful osteoarthritis. *BMC Psychiatry*. 2011;11:147. doi: 10.1186/1471-244X-11-147.
- Veronese N, Cereda E, Maggi S, et al. Osteoarthritis and mortality: A prospective cohort study and systematic review with meta-analysis. *Semin Arthritis Rheum*. 2016;46(2):160-167. doi: 10.1016/j.semarthrit.2016.04.002.
- McDonough CM, Jette AM. The contribution of osteoarthritis to functional limitations and disability. *Clin Geriatr Med*. 2010;26(3):387-399. doi: 10.1016/j.cger.2010.04.001.
- Балабанова Р.М., Дубинина Т.В. Динамика пятилетней заболеваемости болезнями костно-мышечной системы и их распространенности среди взрослого населения России за 2013-2017 гг. *Современная ревматология*. 2019;13(4):11-17. doi: 10.14412/1996-7012-2019-4-11-17.
- Галушко Е.А., Большакова Т.В., Виноградова И.Б. и др. Структура ревматических заболеваний среди взрослого населения России по данным эпидемиологического исследования (предварительные результаты). *Научно-практическая ревматология*. 2009;47(1):11-17. doi: 10.14412/1995-4484-2009-136.
- Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Prevalence of doctor-diagnosed arthritis and arthritis-attributable activity limitation - United States, 2007-2009. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep*. 2010;59(39):1261-1265.
- Arthritis-related statistics. Available from: <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/150479>.
- Vos T, Flaxman AD, Naghavi M, et al. Years lived with disability (YLDs) for 1160 sequelae of 289 diseases and injuries 1990-2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *Lancet*. 2012;380(9859):2163-96. doi: 10.1016/S0140-6736(12)61729-2.
- Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Prevalence of doctor-diagnosed arthritis and arthritis-attributable activity limitation--United States, 2010-2012. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep*. 2013;62(44):869-73.
- Yelin E, Murphy L, Cisternas MG, et al. Medical care expenditures and earnings losses among persons with arthritis and other rheumatic conditions in 2003, and comparisons with 1997. *Arthritis Rheum*. 2007;56(5):1397-1407. doi: 10.1002/art.22565.
- Losina E, Thornhill TS, Rome BN, et al. The dramatic increase in total knee replacement utilization rates in the United States cannot be fully explained by growth in population size and the obesity epidemic. *J Bone Joint Surg Am*. 2012;94(3):201-207. doi: 10.2106/JBJS.J.01958.
- Wallace IJ, Worthington S, Felson DT, et al. Knee osteoarthritis has doubled in prevalence since the mid-20th century. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2017;114(35):9332-9336. doi: 10.1073/pnas.1703856114.

17. Singh JA, Saag KG, Bridges SL Jr, et al. 2015 American College of Rheumatology Guideline for the Treatment of Rheumatoid Arthritis. *Arthritis Rheumatol.* 2016;68(1):1-26. doi: 10.1002/art.39480.
18. Sandell LJ. Etiology of osteoarthritis: genetics and synovial joint development. *Nat Rev Rheumatol.* 2012;8(2):77-89. doi: 10.1038/nrrheum.2011.199.
19. Magnusson K, Scurrah K, Ystrom E, et al. Genetic factors contribute more to hip than knee surgery due to osteoarthritis - a population-based twin registry study of joint arthroplasty. *Osteoarthritis Cartilage.* 2017;25(6):878-884. doi: 10.1016/j.joca.2016.12.015.
20. Reddy R, Daftary MN, Delapenha R, et al. Avascular necrosis and protease inhibitors. *J Natl Med Assoc.* 2005;97(11):1543-1546.
21. Pisanu F, Fiore V, Corradi M, et al. Joint replacement for avascular necrosis in people living with HIV. *Acta Biomed.* 2022;92(S3):e2021560. doi: 10.23750/abm.v92iS3.12551.
22. Turkiewicz A, Petersson IF, Björk J, et al. Current and future impact of osteoarthritis on health care: a population-based study with projections to year 2032. *Osteoarthritis Cartilage.* 2014;22(11):1826-1832. doi: 10.1016/j.joca.2014.07.015.
23. Алексеева Л.И. Медикаментозное лечение остеоартроза. *ПМЖ.* 2002;22:996.
24. Liu Z, Huang J, Wang X, et al. Dapagliflozin suppress endoplasmic reticulum stress mediated apoptosis of chondrocytes by activating Sirt1. *Chem Biol Interact.* 2023;384:110724. doi: 10.1016/j.cbi.2023.110724.
25. Clarke J. Bone stresses out cartilage in OA. *Nat Rev Rheumatol.* 2021;17(5):250. doi: 10.1038/s41584-021-00612-3.
26. Yasuda T, Poole AR. A fibronectin fragment induces type II collagen degradation by collagenase through an interleukin-1-mediated pathway. *Arthritis Rheum.* 2002;46(1):138-148. doi: 10.1002/1529-0131(200201)46:1<138::AID-ART10051>3.0.CO;2-K.
27. Aigner T, Kurz B, Fukui N, Sandell L. Roles of chondrocytes in the pathogenesis of osteoarthritis. *Curr Opin Rheumatol.* 2002;14(5):578-584. doi: 10.1097/00002281-200209000-00018.
28. Simecka JW, Davis JK, Davidson MK, et al. Mycoplasma diseases of animals. In: Maniloff J, McElhaney RN, Finch LR, Baseman JB. (eds.) *Mycoplasmas: molecular biology and pathogenesis.* Washington, D.C: American Society for Microbiology; 1992:391-415.
29. Davis C.P., Cochran S., Lisse J. et al. Isolation of Mycoplasma pneumoniae from synovial fluid samples in a patient with pneumonia and polyarthritis. *Arch Intern Med.* 1988;148(4):969-70.
30. Johnson SM, Bruckner FE, Collins DA. Mycoplasmal RNA and 5'-nucleotidase in synovial fluid from arthritis patients. IOM letters, vol. 4. In: *Program Abstr. 11th Congr. Int. Organ. Mycoplasma.* International Organization for Mycoplasmaology, Ames, Iowa. 1996:140.
31. Johnson SM, Bruckner F, Collins D. Distribution of Mycoplasma pneumoniae and Mycoplasma salivarium in the synovial fluid of arthritis patients. *J Clin Microbiol.* 2007;45(3):953-957. doi: 10.1128/JCM.01973-06.
32. Oen K, Fast M, Postl B. Epidemiology of juvenile rheumatoid arthritis in Manitoba, Canada, 1975-92: cycles in incidence. *J Rheumatol.* 1995;22(4):745-750.
33. Tully JG, Rose DL, Baseman JB, et al. Mycoplasma pneumoniae and Mycoplasma genitalium mixture in synovial fluid isolate. *J Clin Microbiol.* 1995;33(7):1851-1855. doi: 10.1128/jcm.33.7.1851-1855.1995.
34. Furr PM, Taylor-Robinson D, Webster AD. Mycoplasmas and ureaplasmas in patients with hypogammaglobulinaemia and their role in arthritis: microbiological observations over twenty years. *Ann Rheum Dis.* 1994;53(3):183-187. doi: 10.1136/ard.53.3.183.
35. Johnston CL, Webster AD, Taylor-Robinson D, et al. Primary late-onset hypogammaglobulinaemia associated with inflammatory polyarthritis and septic arthritis due to Mycoplasma pneumoniae. *Ann Rheum Dis.* 1983;42(1):108-110. doi: 10.1136/ard.42.1.108.
36. So AK, Furr PM, Taylor-Robinson D, Webster AD. Arthritis caused by Mycoplasma salivarium in hypogammaglobulinaemia. *Br Med J (Clin Res Ed).* 1983;286(6367):762-763. doi: 10.1136/bmj.286.6367.762.
37. Watanabe T, Shibata K, Yoshikawa T, et al. Detection of Mycoplasma salivarium and Mycoplasma fermentans in synovial fluids of temporomandibular joints of patients with disorders in the joints. *FEMS Immunol Med Microbiol.* 1998;22(3):241-246. doi: 10.1111/j.1574-695X.1998.tb01212.x.
38. Rozin A. Is osteoarthritis an infection-associated disease and a target for chemotherapy? *Chemotherapy.* 2007;53(1):1-9. doi: 10.1159/000098243.
39. Stirling A, Worthington T, Rafiq M, et al. Association between sciatica and Propionibacterium acnes. *Lancet.* 2001;357(9273):2024-2025. doi: 10.1016/S0140-6736(00)05109-6.
40. Рубаник Л.В., Полещук Н.Н., Асташинок А.Н. и др. Является ли аваскулярный некроз головки бедренной кости всегда асептическим? Санитарно-эпидемиологическая служба Республики Беларусь: история, актуальные проблемы на современном этапе и перспективы развития: Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Здоровье и окружающая среда», посвященной 90-летию санитарно-эпидемиологической службы Республики Беларусь (Минск, 28 октября 2016 г.) Т. 2. Минск: Белорусский государственный медицинский университет; 2016:293-297.
41. Dunn CM, Velasco C, Rivas A, et al. Identification of Cartilage Microbial DNA Signatures and Associations With Knee and Hip Osteoarthritis. *Arthritis Rheumatol.* 2020;72(7):1111-1122. doi: 10.1002/art.41210.
42. Boer CG, Radjabzadeh D, Medina-Gomez C, et al. Intestinal microbiome composition and its relation to joint pain and inflammation. *Nat Commun.* 2019;10(1):4881. doi: 10.1038/s41467-019-12873-4.
43. Dunn CM, Jeffries MA. The Microbiome in Osteoarthritis: a Narrative Review of Recent Human and Animal Model Literature. *Curr Rheumatol Rep.* 2022;24(5):139-148. doi: 10.1007/s11926-022-01066-6.
44. Boer CG, Radjabzadeh D, Uitterlinden AG, et al. The role of the gut microbiome in osteoarthritis and joint pain. *Osteoarthritis Cartilage.* 2017;25:S10. doi: 10.1016/j.joca.2017.02.033.
45. Chen B, Zhao Y, Li S, et al. Variations in oral microbiome profiles in rheumatoid arthritis and osteoarthritis with potential biomarkers for arthritis screening. *Sci Rep.* 2018;8(1):17126. doi: 10.1038/s41598-018-35473-6.
46. Torchia MT, Amakiri I, Werth P, Moschetti W. Characterization of native knee microorganisms using next-generation sequencing in patients undergoing primary total knee arthroplasty. *Knee.* 2020;27(3):1113-1119. doi: 10.1016/j.knee.2019.12.013.
47. Tsai JC, Casteneda G, Lee A, et al. Identification and Characterization of the Intra-Articular Microbiome in the Osteoarthritic Knee. *Int J Mol Sci.* 2020;21(22):8618. doi: 10.3390/ijms21228618.
48. Collins KH, Paul HA, Reimer RA, et al. Relationship between inflammation, the gut microbiota, and metabolic osteoarthritis development: studies in a rat model. *Osteoarthritis Cartilage.* 2015;23(11):1989-1998. doi: 10.1016/j.joca.2015.03.014.
49. Ulici V, Kelley KL, Azcarate-Peril MA, et al. Osteoarthritis induced by destabilization of the medial meniscus is reduced in germ-free mice. *Osteoarthritis Cartilage.* 2018;26(8):1098-1109. doi: 10.1016/j.joca.2018.05.016.
50. Berthelot JM, Sellam J, Maugars Y, Berenbaum F. Cartilage-gut-microbiome axis: a new paradigm for novel therapeutic opportunities in osteoarthritis. *RMD Open.* 2019;5(2):e001037. doi: 10.1136/rmdopen-2019-001037.
51. Hammad DBM, Liyanapathirana V, Tonge DP. Molecular characterisation of the synovial fluid microbiome in rheumatoid arthritis patients and healthy control subjects. *PLoS One.* 2019;14(11):e0225110. doi: 10.1371/journal.pone.0225110.
52. Zhao Y, Chen B, Li S, et al. Detection and characterization of bacterial nucleic acids in culture-negative synovial tissue and fluid samples from rheumatoid arthritis or osteoarthritis patients. *Sci Rep.* 2018;8(1):14305. doi: 10.1038/s41598-018-32675-w.
53. Goswami K, Clarkson S, Tipton C, et al., The Microbiome of Osteoarthritic Hip and Knee Joints: A Prospective Multicenter Investigation. *J Bone Joint Surg Am.* 2023. doi: 10.2106/JBJS.22.00594.
54. Withrington RH, Cornes P, Harris JR, et al. Isolation of human immunodeficiency virus from synovial fluid of a patient with reactive arthritis. *Br Med J (Clin Res Ed).* 1987;294(6570):484. doi: 10.1136/bmj.294.6570.484.

55. Lamers SL, Rose R, Maidji E, et al. HIV DNA Is Frequently Present within Pathologic Tissues Evaluated at Autopsy from Combined Antiretroviral Therapy-Treated Patients with Undetectable Viral Loads. *J Virol*. 2016;90(20):8968-8983. doi: 10.1128/JVI.00674-16.
56. Adizie T, Moots RJ, Hodgkinson B, et al. Inflammatory arthritis in HIV positive patients: A practical guide. *BMC Infect Dis*. 2016;16:100. doi: 10.1186/s12879-016-1389-2.
57. Raynaud-Messina B, Bracq L, Dupont M, et al. Bone degradation machinery of osteoclasts: An HIV-1 target that contributes to bone loss. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2018;115(11):E2556-E2565. doi: 10.1073/pnas.1713370115.
58. Перецманас Е.О., Тюлькова Т.Е., Зубиков В.С. и др. Вирус иммунодефицита человека в очаге деструкции костной ткани при асептическом некрозе головки бедренной кости: клинические наблюдения. *Травматология и ортопедия России*. 2023;29(3):94-101. doi: 10.17816/2311-2905-7989.

Статья поступила 19.08.2024; одобрена после рецензирования 29.08.2024; принята к публикации 10.12.2024.

The article was submitted 19.08.2024; approved after reviewing 29.08.2024; accepted for publication 10.12.2024.

Информация об авторах:

Евгений Оркович Перецманас — доктор медицинских наук, руководитель отдела, peretsmanas58@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7140-3200>;

Вадим Владимирович Зар — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, vzar@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4021-798X>;

Ярослав Алексеевич Рукин — доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник, yar.rukin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7355-8556>;

Анастасия Александровна Казюлина — научный сотрудник, nastellka@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3116-0616>;

Азиза Дамировна Пахлавонова — кандидат медицинских наук, научный сотрудник, azizapakhlavonova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3994-2620>.

Information about the authors:

Evgeny O. Peretsmanas — Doctor of Medical Sciences, Head of Department, peretsmanas58@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7140-3200>;

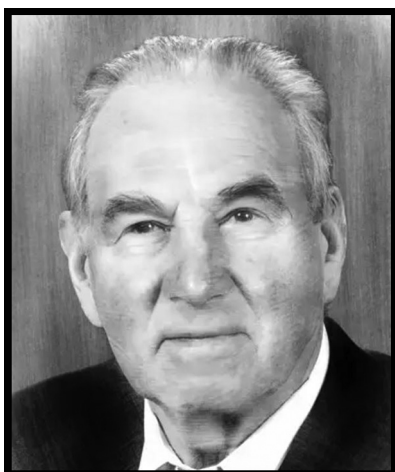
Vadim V. Zar — Candidate of Medical Sciences, orthopaedic surgeon, vzar@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4021-798X>;

Yaroslav A. Rukin — Doctor of Medical Sciences, Leading Researcher, yar.rukin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7355-8556>;

Anastasia A. Kazyulina — Researcher, nastellka@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3116-0616>;

Aziza D. Pakhlavonova — Candidate of Medical Sciences, Researcher, azizapakhlavonova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3994-2620>

Профессор Введенский Станислав Петрович (2.06.1930–11.11.2024)



11 декабря 2024 года на 95-ом году жизни скончался выдающийся врач, доктор медицинских наук, профессор Введенский Станислав Петрович.

Введенский Станислав Петрович родился 2 июля 1930 года в Нижнем Новгороде в семье врачей. Завершив обучение в средней школе, поступил в Горьковский медицинский институт, который окончил с отличием в 1954 году, после чего был направлен хирургом в участковую больницу поселка Вахтан Горьковской области. В 1958 году был принят в аспирантуру на кафедру оперативной хирургии ГМИ. Под руководством профессора Б.В. Парина в 1961 году успешно защитил кандидатскую диссертацию на тему «Механический шов мочеточника с помощью сосудосшивающего аппарата в эксперименте».

С 1960 по 1984 годы С.П. Введенский работал в Горьковском НИИ травматологии и ортопедии младшим, затем старшим научным сотрудником. В течение 18 лет руководил отделением вялых и спастических параличей детской ортопедии и травматологии, а впоследствии — отделением компрессионно-дистракционного остеосинтеза. В 1983 году в ЦИТО Станислав Петрович защитил докторскую диссертацию «Клинико-биомеханическое обоснование и дифференциро-

ванное применение методов удлинения нижних конечностей». В 1984 году он был принят на должность профессора кафедры травматологии, ортопедии и военно-полевой хирургии Нижегородской государственной медицинской академии. Кафедра располагалась на базе Горьковского НИИ травматологии, где Станислав Петрович продолжал активную хирургическую деятельность. В 1990 году ему присвоено ученое звание профессора. С 1993 по 2002 год С.П. Введенский возглавлял кафедру травматологии, ортопедии и военно-полевой хирургии, позже занимал должность профессора кафедры. С 2005 по 2010 год он работал в должности профессора кафедры Госпитальной и военно-полевой хирургии с курсом травматологии, ортопедии и комбустиологии института ФСБ. Совмещая работу на кафедре травматологии и ортопедии НижГМА, Станислав Петрович продолжал активно оперировать в НИИ травматологии и ортопедии.

Многие годы основным направлением и увлечением в хирургической и научной деятельности С.П. Введенского было удлинение и реконструкция конечностей с использованием компрессионно-дистракционного метода. Он внес значительный вклад в развитие и распространение метода Илизарова. Станислав Петрович был хорошо знаком с Гавриилом Абрамовичем Илизаровым. Первая их встреча состоялась в Горьковском НИИ травматологии и ортопедии в 1968 году, где автор нового метода выполнял показательные операции. Впоследствии они неоднократно встречались в Кургане и на различных конференциях и съездах. Следует отметить, что директор КНИИЭКОТ Г.А. Илизаров дал положительный отзыв на автореферат докторской диссертации С.П. Введенского. Станислав Петрович глубоко освоил принципы метода Г.А. Илизарова и проводил активную работу по распространению компрессионно-дистракционного остеосинтеза не только в отделениях травматологии в Горьковской области, но и в двенадцати областях зоны курации института. В Горьковском НИИ травматологии и ортопедии им организовано специализированное детское ортопедическое отделение, где осуществлялось лечение детей и подростков с использованием метода Илизарова, и проводилась большая научная работа по изучению и дальнейшему развитию компрессионно-дистракционного остеосинтеза. Сотрудниками отделения защищено пять кандидатских и две докторских диссертаций по лечению пациентов с использованием метода внешней фиксации, получено 26 патентов на новые способы и технические решения в области внеочагового остеосинтеза.

С.П. Введенским проведены обширные исследования в области биомеханики и физиологии компрессионно-дистракционного остеосинтеза при удлинении конечностей. По его инициативе и при его участии разработаны динамометры, с помощью которых изучены дистракционные усилия при удлинении бедра, голени, плеча, дистракционным эпифизеолизе, раскрыты причины возникновения деформаций при удлинении сегментов конечностей. Исследовано влияние дистракционных усилий на смежные суставы. На основании клинических и электрофизиологических исследований впервые установлены объективные критерии допустимого удлинения конечности при укорочениях различного генеза, разработаны показания и противопоказания к дистракционному эпифизеолизу при бескровном удлинении голени, предложены оригинальные способы устранения контрактур тазобедренного, коленного и голеностопного суставов.

Большой опыт клинических наблюдений и результаты биомеханических исследований позволили С.П. Введенскому предложить новаторские конструктивные решения. В числе первых в стране в 1971 году им были внедрены шарнирные соединения в аппарат Илизарова, запатентован аппарат для артродеза плечевого сустава. В 1975 году Станиславом Петровичем впервые был предложен и использован спице-стержневой аппарат, а принцип спице-стержневой фиксации нашел повсеместное применение в мире. В 1979 году им был предложен и использован в клинике первый в мире автоматический компрессионно-дистракционный аппарат для удлинения конечностей.

Станислав Петрович является автором более 150 научных работ, 13 патентов на изобретения, 50 рационализаторских предложений, удостоен званий «Отличник здравоохранения», «Ветеран труда», «Изобретатель СССР», Почетного профессора Национального медицинского исследовательского центра травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова, лауреат премии им. академика И.Н. Блохиной за работы в области развития медицинских биотехнологий.

В памяти коллег, друзей и учеников Станислав Петрович останется талантливым ученым, экспериментатором, педагогом и прекрасным человеком.

Коллектив Приволжского исследовательского медицинского университета и редакционная коллегия журнала «Гений ортопедии» скорбит и выражает искренние соболезнования родным и близким.

Главный редактор А.В. Бурцев

Компьютерная верстка М.А. Беляева

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций
ПИ № ФС77-68207 от 30 декабря 2016 года

Территория распространения: Российская Федерация, зарубежные страны

Подписано в печать 17.02.2025. Дата выхода 28.02.2025

Формат 60 × 84 1/8. Усл. печ. л. 16,04

Тираж 75 экз. Заказ № 14085. Свободная цена

Адрес издателя, редакции журнала «Гений ортопедии»
640014, Россия, г. Курган, ул. М. Ульяновой, 6
<http://ilizarov-journal.com>

Отпечатано в Типографии «Эталон». 198097, г. Санкт-Петербург, ул. Трефолева, 2 литера БН, помещение 3-Н, офис 1