

ISSN 1028-4427 (Print)
ISSN 2542-131X (Online)

2025

№4 ^{Том}
31

ГЕНИЙ ОРТОПЕДИИ

Научно-теоретический
и практический журнал



Гений Ортопедии

Orthopaedic Genius

Том 31
№ 4
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)
 Миromanов 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

<https://ilizarov-journal.com>

<https://elibrary.ru>

<https://cyberleninka.ru>



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

Адрес: 640021, Россия, г. Курган, ул. М. Ульяновой, 6

Телефоны: (3522) 43-06-94 – редакция

(3522) 23-42-60 – реклама

Интернет: <https://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

Оригинальные статьи

- Сравнительный анализ различных модификаций остеосинтеза интрамедуллярными эластичными стержнями при лечении детей с внесуставными переломами проксимального отдела плечевой кости 407
Д.И. Шабанов, А.А. Коробейников
- Результаты хирургической аллопластики дефектов костной ткани различной локализации при переломах дистального отдела плечевой кости 415
А.П. Давыдов, А.Г. Чибриков, В.Ю. Ульянов, И.А. Норкин
- Валидация видеоассистированного на основе компьютерного зрения гониометрического исследования двигательной функции отведения плечевого сустава 424
С.А. Демкин, А.А. Малякина, С.А. Ахрамович, О.А. Каплунов, И.Е. Обременко, И.Э. Симонова
- Ошибки и осложнения при устранении посттравматических фронтальных деформаций локтевого сустава методом корригирующей надмыщелковой остеотомии аппаратом Илизарова 433
Ю.П. Солдатов, А.Н. Дьячков
- Гистологические проявления остеоартроза запястья в зависимости от давности и тяжести заболевания 444
Н.А. Шудло, Т.А. Ступина, Ш.К. Куттыгул
- Роль микробиологических методов исследования при диагностике перипротезной инфекции у больных с асептической нестабильностью эндопротезов тазобедренного сустава 452
С.А. Линник, Е.А. Оришак, А.М. Ермаков, И.О. Кучеев, Л.Ю. Нилова, Е.М. Фадеев, Г. Карагезов, Д.Ю. Коршунов, Я.Б. Цололо, В.В. Усиков, А.В. Поликарпов
- Клинико-функциональные результаты лечения пациентов со свежими переломами дистального отдела большеберцовой кости с использованием аппарата Илизарова: ретроспективное исследование 463
M. Dhawan, B. Nandan, M.Sch. Iqbal, S.K. Singh, M. Prasad
- Частота и факторы риска развития дисфагии после операции на переднем шейном отделе позвоночника: проспективное исследование 471
J. Singh, N. Singh, P. Gupta, B. Kapil
- Результаты применения внутрисуставных и комбинированных вмешательств у пациентов с ишемической деформацией головки бедра 478
М.П. Тепленький, В.С. Бунов, А.В. Акимова, Э.М. Парфёнов

Клинические случаи

- Антистафилококковая активность титановых 3D-имплантатов с магнийсодержащим многокомпонентным покрытием 487
Е.М. Гордина, С.А. Божкова, Д.В. Лабутин, М.В. Богма, А.А. Ерузин
- Экспериментальное топографо-анатомическое обоснование гибридного остеосинтеза малоберцовой кости у пострадавших с переломами лодыжек 495
В.О. Цапенко, Ю.Б. Кашанский, Р.В. Вашетко, И.П. Кондратьев, А.В. Поликарпов

Новые технологии

- Вариант восстановления плечевой кости при псевдоартрозе свободными аутооттрансплантатами малоберцовой кости в условиях чрескостного остеосинтеза 502
Ш.М. Давиров, П.У. Уринбаев, Д.Ш. Мансуров, Ф.А. Гафуров, Д.Ю. Борзунов
- Гиперкоррекция оси нижней конечности как исход одномыщелкового эндопротезирования коленного сустава 510
Н.Н. Корнилов, Д.В. Чугаев, П.П. Иванов, М.Ш. Магомедов, Т.А. Куляба, А.С. Филь

Обзорные статьи

- Эффективность использования антибактериальных покрытий титановых имплантатов при лечении огнестрельных переломов 520
Д.В. Давыдов, Л.К. Брижань, А.А. Керимов, И.В. Хоминец, К.К. Бекшиков, А.А. Грицюк, Е.А. Кукушко, В.Д. Беседин
- Специфика ротационного планирования и интраоперационного размещения бедренного компонента эндопротеза коленного сустава с применением навигационных устройств 537
Р.А. Зубавленко, Д.А. Марков, В.В. Островский

Original Articles

- Comparative analysis of different modifications of elastic nail osteosynthesis in the treatment of children with extra-articular proximal humeral fractures 407
D.I. Shabanov, A.A. Korobeynikov
- Results of surgical alloplasty for bone defects of various locations due to distal humerus fractures 415
A.P. Davydov, A.G. Chibrikov, V.Yu. Ulyanov, I.A. Norkin
- Validation of video-assisted computer vision goniometry to measure shoulder abduction motor function 424
S.A. Demkin, A.A. Malyakina, S.A. Akhramovich, O.A. Kaplunov, I.E. Obramenko, I.E. Simonova
- Errors and complications with post-traumatic frontal deformities of the elbow joint corrected with supracondylar osteotomy with the Ilizarov apparatus 433
Yu.P. Soldatov, A.N. Dyachkov
- Histological manifestations of wrist osteoarthritis and their dependence on the duration and severity of the disease 444
N.A. Shchudlo, T.A. Stupina, Sh.K. Kuttygul
- The role of microbiological methods in diagnosis of periprosthetic joint infection in patients with aseptic loosening of total hip arthroplasty 452
S.A. Linnik, E.A. Orishak, A.M. Ermakov, I.O. Kucheev, L.Yu. Nilova, E.M. Fadeev, G. Karagezov, D.Yu. Korshunov, Ya.B. Tsololo, V.V. Usikov, A.V. Polikarpov
- Clinical and functional outcomes of acute distal tibia fractures treated with Ilizarov external fixation: a retrospective study 463
M. Dhawan, B. Nandan, M. Sch. Iqbal, S.K. Singh, M. Prasad
- The incidence and risk factors related to post-operative dysphagia after anterior cervical spine surgery: a prospective study 471
J. Singh, N. Singh, P. Gupta, B. Kapil
- Results of intra-articular and combined interventions in patients with ischemic deformity of the femoral head 478
M.P. Teplenkiy, V.S. Bunov, A.V. Akimova, E.M. Parfenov

Clinical Cases

- Antistaphylococcal activity of 3D-printed titanium implants with magnesium-containing multicomponent coating 487
E.M. Gordina, S.A. Bozhkova, D.V. Labutin, M.V. Bogma, A.A. Eruzin
- Experimental topographic and anatomical substantiation of hybrid osteosynthesis of the fibula in patients with ankle fractures 495
V.O. Tsapenko, Yu.B. Kashansky, R.V. Vashetko, I.P. Kondratiev, A.V. Polikarpov

New technologies

- Variant of bone restoration in humeral nonunion with a free fibular autograft in the conditions of transosseous osteosynthesis 502
Sh.M. Davirov, P.U. Urinbaev, Dz.Sh. Mansurov, F.A. Gafurov, D.Yu. Borzunov
- Overcorrected lower limb axis as an outcome of unicompartmental knee arthroplasty 510
N.N. Kornilov, D.V. Chugaev, P.P. Ivanov, M.Sh. Magomedov, T.A. Kulyaba, A.S. Phil

Review Articles

- Efficiency of using antibacterial coatings on titanium implants in the treatment of gunshot fractures 520
D.V. Davydov, L.K. Brizhan, A.A. Kerimov, I.V. Khominets, K.K. Bekshokov, A.A. Gritsyuk, E.A. Kukushko, V.D. Besedin
- Specifics of rotational planning and intraoperative alignment of the femoral component in the knee implant with navigation devices (systematic review) 537
R.A. Zubavlenko, D.A. Markov, V.V. Ostrovskij

Научная статья

УДК 616.717.41/.43-001.5-089.227.84-089.223-089.168-053.2:001.53

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-4-407-414>

Сравнительный анализ различных модификаций остеосинтеза интрамедуллярными эластичными стержнями при лечении детей с внесуставными переломами проксимального отдела плечевой кости

Д.И. Шабанов^{1,2}✉, А.А. Коробейников^{1,2}¹ Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова, Курган, Россия² Курганская областная детская клиническая больница имени Красного Креста, Курган, Россия**Автор, ответственный за переписку:** Дмитрий Игоревич Шабанов, mitya.schabanov@yandex.ru**Аннотация**

Введение. Актуальность исследований методов и результатов лечения детей с переломами проксимального отдела плечевой кости обусловлена распространенностью переломов данной локализации и отсутствием единого подхода к реабилитации данных пациентов, что создаёт необходимость определения тактики лечения, учитывающей особенности детского организма и специфику различных типов переломов.

Цель работы — сравнить результаты применения двухстержневой и одностержневой модификаций интрамедуллярного остеосинтеза эластичными стержнями при лечении детей с внесуставными переломами проксимального отдела плечевой кости.

Материалы и методы. Пациенты с переломами проксимального отдела плечевой кости разделены на две группы: в основную группу ($n = 39$) включены пациенты, получавшие хирургическое лечение с использованием одного эластичного стержня, в контрольную группу ($n = 32$), — с использованием двухстержневой модификации остеосинтеза эластичными стержнями. Эффективность лечения анализировали в стационарных и амбулаторных условиях с использованием клинических, рентгенологических и социологических методов оценки.

Результаты. Послеоперационные показатели (длительность болевого синдрома, срок госпитализации, возвращение к школе, срок консолидации) сопоставимы в обеих группах, что говорит о равнозначной эффективности методов лечения. Статистически значимые различия наблюдали только в параметрах времени операции ($p < 0,05$), что напрямую связано с особенностями техники выполнения операции в каждой группе. Предложенная одностержневая методика позволяет сократить время операции, не оказывая при этом негативного влияния на ключевые показатели анатомического и функционального восстановления пациентов. Удовлетворенность результатами лечения была высокой и сопоставимой в группах.

Обсуждение. В отличие от общепринятой двухстержневой конфигурации интрамедуллярного остеосинтеза применение одностержневой модификации позволяет значительно сократить время операции, снижая риски, связанные в т.ч. с анестезией, и незначительно сократить длительность болевого синдрома. Исследование имело ограничение по срокам наблюдения пациентов после операции (не более 12 мес. после травмы и 1 мес. после удаления импланта), не учитывало тип перелома (разделение на метафизарные и эпифизарные переломы) и имело ограниченную выборку пациентов.

Заключение. Метод остеосинтеза с использованием одного эластичного стержня обеспечивает сопоставимые с двухстержневой методикой интрамедуллярного остеосинтеза функциональные результаты восстановления поврежденного сегмента и общую активность ребенка, консолидация перелома наступает с корректным положением отломков в обычные сроки.

Ключевые слова: перелом проксимального отдела плечевой кости, дети, остеосинтез, интрамедуллярный остеосинтез

Для цитирования: Шабанов Д.И., Коробейников А.А. Сравнительный анализ различных модификаций остеосинтеза интрамедуллярными эластичными стержнями при лечении детей с внесуставными переломами проксимального отдела плечевой кости. *Гений ортопедии*. 2025;31(4):407-414. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-407-414.



Comparative analysis of different modifications of elastic nail osteosynthesis in the treatment of children with extra-articular proximal humeral fractures

D.I. Shabanov^{1,2✉}, A.A. Korobeynikov^{1,2}

¹ Ilizarov National Medical Research Centre for Traumatology and Orthopedics, Kurgan, Russian Federation

² Kurgan Regional Children's Clinical Hospital named after the Red Cross, Kurgan, Russian Federation

Corresponding author: Dmitry I. Shabanov, mitya.schabanov@yandex.ru

Abstract

Introduction The relevance of studying the treatment of proximal humeral fractures in children stems from the high incidence of fractures in this anatomical region and the absence of a standardized treatment approach. This highlights the need for further research to develop treatment protocols that account for the unique characteristics of the pediatric body and the specific features of these fracture types.

Objective of the study was to analyze and compare the outcomes of treating children with extra-articular proximal humeral fractures using double-nail versus single-nail modifications of intramedullary osteosynthesis with elastic nails.

Materials and Methods Patients were divided into two groups. The study group ($n = 39$) patients underwent surgical treatment with a single elastic rod while patients in the control group ($n = 32$) received treatment using a double-nail modification of osteosynthesis. Treatment efficacy was analyzed in both inpatient and outpatient settings with clinical, radiological, and sociological assessment methods.

Results Postoperative parameters (duration of pain syndrome, hospitalization period, return to school, and fracture consolidation time) were comparable in both groups, indicating similar efficacy of the treatment methods in these studied parameters. Statistically significant differences were observed only in operative time, directly linked to the specific surgical techniques employed in each group. The proposed method in the main study group allowed for faster surgery and did not significantly affect other key parameters of anatomical and functional recovery. Patients in both groups were satisfied with the treatment outcomes.

Discussion Unlike the conventional two-nail configuration, the single-rod approach significantly reduces operative time, thereby lowering the risks associated with anesthesia, and slightly reduces the duration of pain syndrome. The study had limitations, including a short follow-up period (no more than 12 months post-injury and 1 month post-implant removal) and a lack of differentiation between fracture configurations (metaphyseal vs. epiphyseal fractures).

Conclusion The single elastic nail osteosynthesis method provides functional recovery of the injured segment and restoration of the child's overall activity comparable to the double-nail technique. Fracture consolidation occurs with correct fragment alignment within standard timeframes.

Keywords: proximal humeral fracture, children, osteosynthesis, intramedullary osteosynthesis

For citation: Shabanov DI, Korobeynikov AA. Comparative analysis of different modifications of elastic nail osteosynthesis in the treatment of children with extra-articular proximal humeral fractures. *Genij Ortopedii*. 2025;31(4):407-414. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-407-414.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы лечения детей с переломами проксимального отдела плечевой кости связана не только с высокой распространенностью травмы данной локализации, на которую приходится 14 % травм верхней конечности и 1,45–2 % всей скелетной травмы [1, 2], но и длительному нарушению функции верхней конечности после проведенного лечения, в особенности у детей старшего возраста [3].

Увеличение частоты травм опорно-двигательного аппарата, включая множественные и сочетанные повреждения, а также растущие требования со стороны пациентов к качеству жизни обуславливают необходимость внедрения современных малоинвазивных хирургических методов при лечении детей с переломами проксимального отдела плечевой кости. Малоинвазивные технологии позволяют обеспечить раннюю реабилитацию и максимально восстановить функциональные возможности верхней конечности [4].

Лечение детей с переломами проксимального отдела плечевой кости сопряжено с рядом сложностей, связанных с анатомо-биомеханическими характеристиками этого сегмента. Основные факторы, затрудняющие лечение: малый размер проксимального отломка, что усложняет его стабилизацию и фиксацию; высокая подвижность костных фрагментов из-за мышечного воздействия и биомеханической нагрузки на плечевой сустав; локализация перелома в области эпифизарных пластинок, повышающая риск нарушений дальнейшего развития кости [5]. Данные особенности требуют применения специализированных методик для минимизации осложнений и восстановления функциональной активности конечности.

Среди хирургических методов лечения переломов плечевой кости наиболее предпочтительными являются малоинвазивные технологии, минимизирующие риск осложнений. Одним из таких методов является FIN (*англ.*: Flexible Intramedullary Nailing), который обеспечивает стабильную фиксацию отломков за счет гибких внутрикостных стержней, позволяет сократить сроки реабилитации, обеспечить раннюю активизацию пациентов и возвращение к повседневной активности [6–8].

Цель работы — сравнить результаты применения двухстержневой и одностержневой модификаций интрамедуллярного остеосинтеза эластичными стержнями при лечении детей с внесуставными переломами проксимального отдела плечевой кости.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проведен анализ хирургического лечения детей ($n = 71$) с переломами проксимального отдела плечевой кости, получивших хирургическое лечение на базе ОДКБ им. Красного креста (Курган) с 2016 по 2023 гг. В контрольную группу включены пациенты ($n = 32$), оперированные с использованием технологии двухстержневой конфигурации, истории болезни анализировали ретроспективно. В основную группу включены пациенты проспективного исследования ($n = 39$), оперированные с использованием технологии одностержневого интрамедуллярного остеосинтеза.

Критерии не включения для обеих групп: пациенты с тяжелой черепно-мозговой травмой (ЧМТ), ангионеврологические осложнения перелома, патологические переломы плечевой кости, отказ пациента / законного представителя пациента принимать участие в исследовании.

Настоящее исследование проведено в соответствии с Хельсинкской декларацией Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» с учетом поправок 2000 г.

У всех пациентов анализировали данные по следующим параметрам: возраст, пол, локализация травмы, механизм повреждения, тип перелома в соответствии с классификацией АО PCCF (*англ.*: Pediatric Comprehensive Classification of Long-Bone Fractures) [9], наличие сопутствующих травм, состояние периферических нервов и сосудов, послеоперационные осложнения, сроки госпитализации и сроки удаления имплантата. Продолжительность болевых ощущений оценивали по потребности в анальгетиках. Расположение костных фрагментов, фиксирующих устройств и стадии сращения перелома, анализировали с помощью исследования рентгенограмм в стандартных проекциях.

Осмотр пациентов на амбулаторном этапе производили не реже одного раза в месяц. Для оценки функционального восстановления и удовлетворенности пациентов полученным лечением использовали опросник QuickDASH [10], данный опросник валидирован для детей в возрасте от 8 до 18 лет и является сокращённой версией оригинальной анкеты «Нарушения функций руки, плеча и кисти» (DASH).

Средний возраст пациентов на момент получения травмы составил ($11,28 \pm 2,78$) лет (от 7 до 15) в основной группе и ($11,15 \pm 2,45$) лет (от 6 до 16) в контрольной группе. Давность травмы на момент хирургического пособия — от 16 час. до 7 сут. в основной группе и от 14 час. до 11 сут. в контрольной группе. В представленных группах не было достоверного различия по возрасту и половому распределению.

Наиболее частым механизмом травмы было падение с высоты собственного роста в бытовых условиях, зарегистрированное в 22 (69 %) случаях контрольной группы и 26 (67 %) случаях основной группы. Прочие механизмы включали падение с велосипеда или самоката (четыре пациента в обеих группах), травмы во время занятий спортом, включая единоборства, (три случая в обеих группах), высокоэнергетические повреждения (три пациента в контрольной группе и шесть пациентов в основной группе).

У трех детей контрольной группы и пяти детей основной группы перелом плечевой кости сопровождался закрытой ЧМТ по типу сотрясения головного мозга. В одном случае у семилетнего пациента контрольной группы, получившего травму в результате дорожно-транспортного происшествия, диагностировали сочетание перелома плечевой кости, ЧМТ и перелома бедра.

Во всех наблюдаемых случаях в обеих группах переломы были закрытыми. Распределение переломов по классификации АО PCCF представлено в таблице 1.

Таблица 1

Распределение пациентов по типам переломов по классификации АО PCCF

Тип перелома	Контрольная группа (n = 32)		Основная группа (n = 39)	
	абс.	%	абс.	%
11E/1.1	9	28,1	9	23,1
11E/2.1	12	37,5	12	30,8
11M/3.1	11	34,4	18	46,2

Статистический анализ данных исследования выполняли с использованием программного обеспечения Statistica 12.0 (StatSoft Inc.) на персональном компьютере. Результаты представлены в формате среднего арифметического (M) и стандартной ошибки среднего ($\pm m$) для количественных показателей. Для сравнения средних значений между группами применяли t-критерий Стьюдента, эффективный при работе с выборками, соответствующими нормальному распределению. Для проверки соответствия распределения качественных признаков ожидаемому при нулевой гипотезе использовали критерий Пирсона (χ^2). Статистически значимыми считали различия $p \leq 0,05$.

Хирургическая техника

В случае применения одностержневой конфигурации интрамедуллярного остеосинтеза операцию проводят под общим наркозом. Пациента укладывают на операционный стол в положение на спине с возможностью придания «позы приветствия», — отведение плечевого сустава до прямого угла со сгибанием локтевого сустава 90°.

Входное отверстие в дистальной части латеральной колонны формируют с помощью костного шила на 10–20 мм проксимальнее латерального надмыщелка с предварительным кожным разрезом. В костномозговой канал вводят титановый стержень с предварительно изогнутым концом, используя Т-образную рукоятку. Репозиция достигается за счет аккуратной тракции и, как правило, требует отведения и внутренней ротации для устранения смещения. Важно помнить, что центр вращения плечевой кости при переломах проксимального отдела, капсулопериостальный лоскут, располагается заднедиагонально. Качество репозиции проверяют с помощью рентгеноскопии в переднезадней, боковой проекциях и проекции по С. Neer [11].

Если репозиция удовлетворительная, стержень вбивают в проксимальный эпифиз. В случаях неудовлетворительной репозиции из-за интерпоната мягких тканей в зоне перелома рекомендуется усиление деформации в обеих плоскостях, продвижение стержня до достижения зоны перелома и его вращение в области перелома с одновременной тракцией для освобождения зажатых тканей. Затем предварительно изогнутым стержнем фиксируют проксимальный фрагмент и поворачивают для устранения остаточного смещения. После достижения удовлетворительной репозиции стержень импактируют в субхондральную кость через зону роста, чтобы обеспечить максимальную стабильность фиксации и предотвратить миграцию стержня. Стабильность фиксации перелома проверяют под рентгеноскопическим контролем, осуществляя ротацию плечевой кости.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Группы сопоставимы по всем предоперационным характеристикам. При операциях в обеих группах для оптимизации репозиции стержень предварительно изгибали на 10°. Диаметр стержня подбирали на основании предоперационной рентгенографии с учетом соотношения диаметра стержня к диаметру костномозгового канала в его наиболее узкой части. Для двухстержневой конфигурации данный коэффициент составил 0,3, для одностержневой конфигурации — 0,4 (с целью повышения стабильности фиксации). Диаметр стержней составил от 2,0 до 3,5 мм. В контрольной группе в восьми случаях

использовали титановый стержень 2,0 мм, в 17 случаях — 2,5 мм, в семи случаях — 3,0 мм. Для пациентов основной группы применяли стержни 2,0 мм в четырех случаях, 2,5 мм в девяти случаях, 3,0 мм в 21 случае, 3,5 мм в пяти случаях (табл. 2).

Таблица 2

Распределение пациентов по диаметрам используемых стержней

Диаметр стержня, мм	Контрольная группа (<i>n</i> = 32)		Основная группа (<i>n</i> = 39)	
	абс.	%	абс.	%
2,0	8	25,0	4	10,3
2,5	17	53,1	9	23,1
3,0	7	21,9	21	53,8
3,5	0	0	5	12,8

В раннем послеоперационном периоде все пациенты использовали косыночный бандаж до купирования болевого синдрома, срок не превышал семи суток. В период иммобилизации проводили занятия пассивной ЛФК, после окончания иммобилизации переходили к активной ЛФК. Средняя продолжительность госпитализации составила ($5,8 \pm 2,6$) суток в контрольной группе и ($5,3 \pm 2,1$) суток в основной группе ($p > 0,05$). Это было обусловлено длительностью болевого синдрома и желанием пациента находиться в стационарных условиях.

Время оперативного пособия статистически значимо отличалось в группах (табл. 3). Сокращение времени операции связано не только с меньшим количеством имплантатов и, следовательно, вдвое меньшим временем, необходимым для их постановки, но и техническим упрощением процедуры установки и удаления за счет отсутствия перекреста стержней.

Таблица 3

Время хирургического пособия

Процедуры	Время, мин		<i>P</i> -критерий
	Основная группа	Контрольная группа	
Установка импланта	$31,0 \pm 9,4$ (18–65)	$41,0 \pm 11,4$ (24–70)	$< 0,05$
Удаление импланта	$18,0 \pm 7,8$ (14–35)	$25,0 \pm 9,2$ (19–38)	$< 0,05$
Общее время	$51,0 \pm 17,2$ (32–100)	$64,0 \pm 20,6$ (43–108)	$< 0,05$

Продолжительность болевого синдрома (оценка потребности в анальгетических препаратах и по шкале ВАШ) составила ($3,7 \pm 2,0$) сут. для основной группы и ($3,8 \pm 2,1$) сут. для контрольной. Дети обеих групп возобновили занятие в образовательных или дошкольных учреждениях в срок от шести до 15 дней.

На амбулаторном этапе детей осматривали с периодичностью 4–5 недель. На каждом приеме проводили клиническую оценку консолидации, включая пальпацию области перелома для исключения патологической подвижности и болевых ощущений при осевой нагрузке, а также оценку восстановления функции конечности. Функциональная оценка включала определение объема активных и пассивных движений в суставах верхней конечности, оценку мышечного тонуса и трофики. Особое внимание уделяли оценке отведения и ротации в плечевом суставе. Кроме того, проводили рентгенологическую оценку степени консолидации: исчезновение межотломковой щели, формирование костной мозоли однородной плотности, пересекающей линию перелома, полное восстановление кортикального слоя кости.

Клинические признаки сращения перелома отмечены у всех пациентов обеих групп в период от одного до двух месяцев. Решение об удалении имплантов принимали на основании комплексной клинико-рентгенологической оценки. В основной группе срок до удаления металлоконструкции составил ($5,8 \pm 1,2$) мес., в контрольной группе — ($5,9 \pm 1,4$) мес.

Оценку результатов оперативного лечения проводили с использованием шкалы J.M. Flynn [12]. Критерии оценки результатов включали несколько ключевых параметров, позволяющих оценить как клинические, так и функциональные результаты лечения. Согласно шкале отличные результаты получены в 37 (95 %) случаях в основной группе и в 31 (97 %) случае в контрольной группе, удовлетворительные результаты получены в двух (5 %) и одном (3 %) наблюдениях соответственно. Во всех случаях в обеих группах удовлетворительный результат связан с остаточной угловой деформацией менее 10° . Неудовлетворительных результатов среди исследуемых больных не зарегистрировано.

В связи с валидацией опросника QuickDASH для детей в возрасте от восьми лет, при прохождении опроса из основной группы исключен один ребенок, из контрольной группы — три ребенка в возрасте младше восьми лет. Через семь дней после операции у пациентов основной группы получен результат

($20,16 \pm 1,98$) баллов, контрольной группы — ($20,74 \pm 2,21$) баллов; после удаления стержня в основной группе — ($0,81 \pm 0,28$) балла, в группе контроля — ($0,74 \pm 0,32$) балла. Полученные после удаления стержней значения свидетельствуют о минимальных функциональных ограничениях, что соответствует отличным результатам лечения по шкале QuickDASH.

В контрольной группе зафиксировано четыре случая локального раздражения кожи в зоне введения стержней, осложнённого бурситом, и пять таких случаев выявлены в основной группе. Данное состояние не потребовало досрочного удаления имплантата, было успешно купировано после планового извлечения фиксатора в предусмотренные сроки и не повлияло на результат лечения.

Клинический пример

Пациент 12 лет поступил в приемный покой ОДКБ им. Красного креста 17.03.2022 с переломом плечевой кости 11E/2.1. Анамнез травмы: упал с лестницы в школе в день обращения. Выполнено хирургическое лечение по технологии одностержневой модификации интрамедуллярного остеосинтеза (рис. 1).



Рис. 1. Рентгенограммы пациента: а — при поступлении; б — через 1 мес. после операции; в — через 12 мес. после операции

ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время большую часть пострадавших детского возраста с переломами проксимального отдела плечевой кости лечат консервативно. Высокий потенциал ремоделирования данного сегмента допускает значительное остаточное смещение [13]. Консервативное лечение, несмотря на свою популярность и эффективность, в большинстве случаев, особенно при сложных переломах или при переломах у детей старшего возраста, имеет ряд ограничений и рисков: вторичное смещение, длительная иммобилизация, сложность в соблюдении ограничительного режима [14, 15]. Высокий уровень запроса на качество жизни, необходимость быстрой социальной реинтеграции, желание избежать иммобилизации увеличивают количество сторонников хирургического метода лечения [16, 17].

Переломы проксимального отдела плечевой кости нередко отличаются нестабильностью, что делает выбор метода фиксации критически важным и во многом определяется квалификацией хирурга. Для фиксации переломов проксимального отдела плечевой кости у детей, требующих оперативного лечения, применяют различные методы, включая использование винтов, пластин, внешних фиксаторов, чрескожную фиксацию спицами или эластичный интрамедуллярный остеосинтез [18–20]. Наибольшее распространение получили чрескожная фиксация спицами Киршнера и интрамедуллярный остеосинтез, демонстрирующие схожую эффективность и удовлетворительные клинические исходы. Спицы Киршнера устанавливают перкутанно, они требуют послеоперационной иммобилизации конечности. Выступающие концы спиц способны вызывать раздражение мышц и мягких тканей, а также подвержены риску миграции [21]. При переломах со смещением интрамедуллярный стержневой остеосинтез является методом выбора по причине отличных функциональных исходов, низкой частоты осложнений и возможности ранней мобилизации [22], но и он не лишен недостатков. Интрамедуллярные методы, как правило, отличаются большей длительностью хирургического вмешательства, сопряжены с повышенной интраоперационной кровопотерей и необходимостью последующего удаления фиксирующих элементов [23, 24].

С целью минимизации длительности хирургического пособия предложена одностержневая модификация интрамедуллярного стержневого остеосинтеза. Первое упоминание данной методики принадлежит Y. Chee et al. [25], подтвердившим её эффективность на 11 клинических случаях. E. Samara et al. при оценке эффективности одного ретроградного эластичного стержня у 19 пациентов отметил стабильную фиксацию и отсутствие серьезных осложнений [26]. Техника рекомендована, в том числе и для детей старше 11 лет с низким потенциалом ремоделирования. Наши данные, полученные на расширенной выборке, согласуются с этими выводами.

Во всех случаях нашего исследования репозицию выполняли закрытым путем, что расходится с данными литературы, где описаны случаи интерпозиции мягких тканей и нерепонируемых переломов [27]. Препятствием к выполнению закрытой репозиции может быть интерпозиция надкостницы, дельтовидной мышцы или сухожилия длинной головки бицепса [28].

Применение второго стержня, по нашему мнению, не является обязательным, хотя и обеспечивает более равномерное распределение биомеханических нагрузок за счёт расходящегося воздействия на зоны растяжения и компрессии. Один стержень, создавая направленное компрессионное усилие вдоль вогнутости дуги, выполняет функцию внутренней шины, фиксируя фрагменты до консолидации перелома, а остаточный потенциал ремоделирования проксимального отдела плечевой кости может скорректировать допустимые рентгенологические деформации [29]. Отказ от использования второго стержня для предотвращения ротации проксимального сегмента обоснован потенциалом ремоделирования и адаптивными возможностями плечевого сустава, многоплоскостная подвижность которого нивелирует риски биомеханических нарушений [30].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведённого исследования свидетельствуют о клинической эффективности методики хирургического лечения детей с проксимальными переломами плечевой кости посредством ретроградного интрамедуллярного остеосинтеза в одностержневой конфигурации. У всех пациентов достигнуто рентгенологическое сращение с восстановлением полного безболезненного объема движений после удаления имплантата.

Методика одностержневого интрамедуллярного остеосинтеза обеспечивает сопоставимое с двухстержневой методикой функциональное восстановление поврежденного сегмента и общей активности ребенка, консолидация перелома наступает в обычные сроки. Использование одного стержня сокращает время операции, снижает затраты, упрощает установку и удаление имплантата по сравнению с двухстержневой техникой. Отсутствует необходимость в длительной иммобилизации. Отмечена высокая удовлетворённость результатами лечения среди детей и их родителей.

Конфликт интересов. Не заявлен.

Источник финансирования. Не заявлен.

Этические нормы. Исследование проведено в соответствии с Хельсинкской декларацией Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» с учетом поправок 2000 г.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Наттуветти Р.Р. Лечение переломов плечевой кости и их последствий на основе биомеханической концепции фиксации отломков. В кн: Наттуветти Р.Р., Чернышов А.А. *Диагностика и лечение политравм*. М.; 1999:169-170.
2. Shore BJ, Hedequist DJ, Miller PE, et al. Surgical management for displaced pediatric proximal humeral fractures: a cost analysis. *J Child Orthop*. 2015;9(1):55-64. doi: 10.1007/s11832-015-0643-2.
3. Ломтатидзе Е.Ш., Ломтатидзе В.Е., Поцелуйко С.В., Торопов Е.А. Анализ функциональных результатов внутреннего остеосинтеза при переломах проксимального отдела плечевой кости. *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова*. 2003;10(3):62-66. doi: 10.17816/vto200310362-66.
4. Гаврилов И.И., Брысук Г.П., Гайдук М.В. и др. Остеосинтез переломов проксимального отдела плечевой кости пластинами с угловой стабильностью. *Травма*. 2011;12(3):30-33.
5. Bahrs C, Zipplies S, Ochs BG, et al, Weise K. Proximal humeral fractures in children and adolescents. *J Pediatr Orthop*. 2009;29(3):238-242. doi: 10.1097/BPO.0b013e31819bd9a7.
6. Lascombes P, Nespola A, Poiricuitte JM, et al. Early complications with flexible intramedullary nailing in childhood fracture: 100 cases managed with precurved tip and shaft nails. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2012;98(4):369-375. doi: 10.1016/j.otsr.2011.11.011.
7. Flynn JM, Hresko T, Reynolds RA, et al. Titanium elastic nails for pediatric femur fractures: a multicenter study of early results with analysis of complications. *J Pediatr Orthop*. 2001;21(1):4-8. doi: 10.1097/00004694-200101000-00003.
8. Andreacchio A., Alberghina F., Canavese F. Применение эластичных стабильных интрамедуллярных стержней для лечения переломов длинных костей у пациентов с незрелым скелетом. *Гений ортопедии*. 2021;27(4):406-412. doi: 10.18019/1028-4427-2021-27-4-406-412.
9. Joeris A, Lutz N, Blumenthal A, et al. The AO Pediatric Comprehensive Classification of Long Bone Fractures (PCCF). *Acta Orthop*. 2017;88(2):129-132. doi: 10.1080/17453674.2016.1258533.
10. Kennedy CA, Beaton DE, Smith P, et al. Measurement properties of the QuickDASH (disabilities of the arm, shoulder and hand) outcome measure and cross-cultural adaptations of the QuickDASH: a systematic review. *Qual Life Res*. 2013;22(9):2509-2547. doi: 10.1007/s11136-013-0362-4.

11. Neer CS 2nd, Horwitz BS. Fractures of the proximal humeral epiphysial plate. *Clin Orthop Relat Res*. 1965;41:24-31.
12. Flynn JM, Hresko T, Reynolds RA, et al. Titanium elastic nails for pediatric femur fractures: a multicenter study of early results with analysis of complications. *J Pediatr Orthop*. 2001;21(1):4-8. doi: 10.1097/00004694-200101000-00003.
13. de Cort BA, Ten Duis K, Govaert GAM, Ijma FFA. Proximal humeral fractures in children: large remodeling capacity, conservative treatment. *Ned Tijdschr Geneesk*. 2021;165:D5420. (In Dutch).
14. Bishop JY, Flatow EL. Pediatric shoulder trauma. *Clin Orthop Relat Res*. 2005;(432):41-48. doi: 10.1097/01.blo.0000156005.01503.43.
15. Dameron TB Jr, Reibel DB. Fractures involving the proximal humeral epiphyseal plate. *J Bone Joint Surg Am*. 1969;51(2):289-297.
16. Cruz AI Jr, Kleiner JE, Gil JA, et al. Inpatient surgical treatment of paediatric proximal humerus fractures between 2000 and 2012. *J Child Orthop*. 2018;12(2):111-116. doi: 10.1302/1863-2548.12.170220.
17. Chaus GW, Carry PM, Pishkenari AK, Hadley-Miller N. Operative versus nonoperative treatment of displaced proximal humeral physeal fractures: a matched cohort. *J Pediatr Orthop*. 2015;35(3):234-239. doi: 10.1097/BPO.0000000000000265.
18. Fernandez FF, Eberhardt O, Langendörfer M, Wirth T. Treatment of severely displaced proximal humeral fractures in children with retrograde elastic stable intramedullary nailing. *Injury*. 2008;39(12):1453-1459. doi: 10.1016/j.injury.2008.04.001.
19. Rowles DJ, McGrory JE. Percutaneous pinning of the proximal part of the humerus. An anatomic study. *J Bone Joint Surg Am*. 2001;83(11):1695-1699. doi: 10.2106/00004623-200111000-00012.
20. Wang Y, Wang Q, Yao W, et al. Kirschner wire versus external fixation in the treatment of proximal humeral fractures in older children and adolescents: a comparative study. *BMC Musculoskelet Disord*. 2023;24(1):899. doi: 10.1186/s12891-023-07037-x.
21. Swarup I, Hughes MS, Bram JT, et al. Percutaneous Pinning of Pediatric Proximal Humeral Fractures. *JBJS Essent Surg Tech*. 2019;9(4):e33.1-6. doi: 10.2106/JBJS.ST.19.00002.
22. Hohloch L, Eberbach H, Wagner FC, et al. Age- and severity-adjusted treatment of proximal humerus fractures in children and adolescents-A systematical review and meta-analysis. *PLoS One*. 2017;12(8):e0183157. doi: 10.1371/journal.pone.0183157.
23. Hutchinson PH, Bae DS, Waters PM. Intramedullary nailing versus percutaneous pin fixation of pediatric proximal humerus fractures: a comparison of complications and early radiographic results. *J Pediatr Orthop*. 2011;31(6):617-622. doi: 10.1097/BPO.0b013e3182210903.
24. Freisleder F, Bensler S, Specht T, et al. Plate Fixation for Irreducible Proximal Humeral Fractures in Children and Adolescents — A Single-Center Case Series of Six Patients. *Children (Basel)*. 2021;8(8):635. doi: 10.3390/children8080635.
25. Chee Y, Agorastides I, Garg N, et al. Treatment of severely displaced proximal humeral fractures in children with elastic stable intramedullary nailing. *J Pediatr Orthop B*. 2006;15(1):45-50. doi: 10.1097/01202412-200601000-00010.
26. Samara E, Tschopp B, Kwiatkowski B, et al. A Single Retrograde Intramedullary Nail Technique for Treatment of Displaced Proximal Humeral Fractures in Children: Case Series and Review of the Literature. *JB JS Open Access*. 2021;6(1):e20.00119. doi: 10.2106/JBJS.OA.20.00119.
27. Rajan RA, Hawkins KJ, Metcalfe J, et al. Elastic stable intramedullary nailing for displaced proximal humeral fractures in older children. *J Child Orthop*. 2008;2(1):15-19. doi: 10.1007/s11832-007-0070-0.
28. Bahrs C, Zipplies S, Ochs BG, et al. Proximal humeral fractures in children and adolescents. *J Pediatr Orthop*. 2009;29(3):238-242. doi: 10.1097/BPO.0b013e31819bd9a7.
29. Haering D, Raison M, Begon M. Measurement and description of three-dimensional shoulder range of motion with degrees of freedom interactions. *J Biomech Eng*. 2014;136(8). doi: 10.1115/1.4027665.
30. Bourgain M, Hybois S, Thoreux P, et al. Effect of shoulder model complexity in upper-body kinematics analysis of the golf swing. *J Biomech*. 2018;75:154-158. doi: 10.1016/j.jbiomech.2018.04.025.

Статья поступила 04.04.2025; одобрена после рецензирования 05.05.2025; принята к публикации 05.06.2025.

The article was submitted 04.04.2025; approved after reviewing 05.05.2025; accepted for publication 05.06.2025.

Информация об авторах:

Дмитрий Игоревич Шабанов — врач — травматолог-ортопед, аспирант,
mitya.schabanov@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-9364-1959>;

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

Information about the authors:

Dmitry I. Shabanov — orthopaedic surgeon, post-graduate fellow,
mitya.schabanov@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-9364-1959>;

Anatoly A. Korobeynikov — Candidate of Medical Sciences, Head of the Laboratory,
koroban@list.ru, <https://orcid.org/0009-0005-0326-8285>.

Научная статья

УДК 616.717.46-001.514-06:616.71-004.8-089.843-089.168

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-4-415-423>

Результаты хирургической аллопластики дефектов костной ткани различной локализации при переломах дистального отдела плечевой кости

А.П. Давыдов[✉], А.Г. Чибриков, В.Ю. Ульянов, И.А. Норкин

Саратовский государственный медицинский университет имени В.И. Разумовского, Саратов, Россия

Автор, ответственный за переписку: Алексей Павлович Давыдов, alexeydawidow@gmail.com**Аннотация**

Введение. В настоящее время после хирургического лечения до 30 % пациентов с переломами дистального отдела плечевой кости получают стойкую утрату трудоспособности. Актуальным является совершенствование оперативных методик, обеспечивающих восстановление анатомической целостности данного сегмента.

Цель работы — выполнить сравнительный анализ результатов хирургической пластики костных дефектов с применением донорского блочного и кубического кадаверного аллотрансплантатов на основании оценки жесткости костной ткани и васкуляризации зоны трансплантации при переломах дистального отдела плечевой кости с дефектами различной локализации.

Материалы и методы. Объектом исследования стали 56 пациентов с переломами дистального отдела плечевой кости, которые разделены на три группы в зависимости от локализации дефекта и две подгруппы в зависимости от способа хирургической пластики. Сравнительный анализ исходов лечения проведен на основании значений показателей индекса васкуляризации зоны замещения дефекта, полученных при ультразвуковом исследовании, а также значений индекса Хаунсфилда, полученных при компьютерной томографии поврежденного сегмента. Оценке подвергали участок аллотрансплантации, разделенный на три зоны интереса, — центральную, краевую и нативную костные структуры.

Результаты. Применение блочного аллотрансплантата способствует увеличению значений индекса Хаунсфилда через 3 мес. после операции в центральной трансплантатной зоне при дефекте медиальной колонны до значения 190 HU ($p = 0,01$), при латеральном дефекте — до 185 HU ($p = 0,01$), при центральном дефекте — до 170 HU ($p = 0,03$). В краевой зоне трансплантата значение индекса Хаунсфилда через 3 мес. после операции повышается при медиальном дефекте до 210 HU ($p = 0,01$), латеральном дефекте — до 200 HU ($p = 0,01$), центральном дефекте — до 185 HU ($p = 0,02$). Использование данной технологии способствует повышению значений индекса васкуляризации зоны замещения при дефекте медиальной колонны в 1,2 раза ($p = 0,01$), латеральной колонны — в 1,15 ($p = 0,01$), центральной зоны — в 1,18 ($p = 0,02$).

Обсуждение. Применение блочного аллотрансплантата способствует увеличению жесткости костной ткани в краевой и центральной зонах замещения дефекта через 3 мес. после операции, особенно при его локализации в области медиальной и латеральной колонн, способствует усилению интенсивности кровотока в зоне замещения дефекта через 2 мес. после операции.

Заключение. Сравнение результатов пластики посттравматических костных дефектов при оскольчатых переломах дистального отдела плечевой кости показало преимущество использования нативного блочного аллотрансплантата при дефектах латеральной и медиальной колонн ввиду оптимизации остеointеграционных процессов в зоне замещения в среднесрочном послеоперационном периоде.

Ключевые слова: плечевая кость, оскольчатый перелом, хирургическое лечение, аллотрансплантат, жесткость костной ткани, васкуляризация

Для цитирования: Давыдов А.П., Чибриков А.Г., Ульянов В.Ю., Норкин И.А. Результаты хирургической аллопластики дефектов костной ткани различной локализации при переломах дистального отдела плечевой кости. *Гений ортопедии*. 2025;31(4):415-423. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-415-423.



Results of surgical alloplasty for bone defects of various locations due to distal humerus fractures

A.P. Davydov✉, A.G. Chibrikov, V.Yu. Ulyanov, I.A. Norkin

Saratov State Medical University n.a. V. I. Razumovsky, Saratov, Russian Federation

Corresponding author: Alexey P. Davydov, alexeydavidow@gmail.com

Abstracts

Introduction Currently, up to 30 % of cases after surgical treatment in distal humerus fractures result in permanent disability. It is important to improve the surgical techniques to ensure the restoration of the anatomical integrity of this department.

The **aim** of the work was to perform a comparative analysis of the results of surgical plasty with donor block and cubic cadaver allografts for bone defects of various locations in the distal humerus fractures based on an assessment of bone density and vascularization of the grafted area.

Materials and methods The study involved 56 patients with distal humerus fractures, divided into three groups based on the defect location and two subgroups depending on the method of surgical plastic surgery. A comparative analysis of treatment outcomes was conducted based on the values of the vascularization index of the defect zone obtained by ultrasound study, as well as the Hounsfield index values obtained by computed tomography of the damaged segment. The allograft area was assessed in three zones of interest, the central, marginal and native bone structures.

Results The use of a block allograft provided increase in the values of the Hounsfield index 3 months after surgery in the central graft zone with a defect in the medial column to a value of 190HU ($p = 0.01$), with a lateral defect to 185HU ($p = 0.01$), with a central defect to 170HU ($p = 0.03$); increased the values of the Hounsfield index in the marginal zone 3 months after surgery, the graft area with a medial defect was 210HU ($p = 0.01$), a lateral defect was 200 HU ($p = 0.01$), and a central defect was 185 HU ($p = 0.02$). It provided the increase in the values of the vascularization index of the graft zone with a defect in the medial column by 1.2 times ($p = 0.01$), in the lateral column by 1.15 times ($p = 0.01$), in the central zone by 1.18 times ($p = 0.02$).

Discussion The results of the study indicate that the use of a block allograft increases the density of bone tissue in the marginal and central zones of defect grafting area 3 months after surgery, more expressed if it is localized in the medial and lateral columns, and increases the intensity of blood flow in the defect grafting area 2 months after surgery.

Conclusion Comparison of the results of plastic surgery for post-traumatic bone defects in comminuted fractures of the distal humerus showed the advantage of using native block allograft in defects of the lateral and medial columns due to the optimization of osteointegration processes in the defect zone in the medium-term postoperative period.

Keywords: humerus, comminuted fracture, surgical treatment, allograft, bone density, vascularization

For citation: Davydov AP, Chibrikov AG, Ulyanov VYu, Norkin IA. Results of surgical alloplasty for bone defects of various locations due to distal humerus fractures. *Genij Ortopedii*. 2025;31(4):415-423. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-415-423.

ВВЕДЕНИЕ

Оскольчатые переломы дистального отдела плечевой кости (ДОПК) являются тяжелой травматической патологией и встречаются в популяции с частотой 5,7 случаев на 100 тыс. взрослого населения, составляя до 15 % от всех травм плечевой кости [1]. В молодом трудоспособном возрасте подобные повреждения являются следствием высокоэнергетического механизма получения травмы, у пострадавших старшей возрастной группы — низкоэнергетического механизма в результате падений с высоты собственного роста на локтевой сустав. Учитывая бимодальность популяционного распределения данного вида повреждений, актуальность данной проблемы не вызывает сомнений в связи с увеличением продолжительности жизни, а также ростом абсолютного количества пользователей средств индивидуальной мобильности, таких как электросамокаты, моноколеса и т.д.

Оскольчатые переломы у пациентов старше 65 лет с сопутствующей остеопенией, а также мелкофрагментарные переломы у пациентов молодой возрастной группы сопровождаются посттравматическим дефектом костной ткани. В данном случае одним из видов лечения является тотальное эндопротезирование локтевого сустава. Но ввиду высокого риска послеоперационных осложнений и значительной доли (70 %) неудовлетворительных исходов лечения данный вариант оперативного лечения показан возрастным пациентам со сниженным индексом активности [2]. Открытая репозиция с внутренней фиксацией пластинами без восстановления дефектной зоны может привести к невозможности прочной интраоперационной фиксации фрагментов или сокращению площади контакта отломков в зоне перелома, вынуждая хирурга прибегать к дополнительной внешней иммобилизации в послеоперационном периоде, что способствует появлению контрактур локтевого сустава [3].

В настоящее время в качестве дефект замещающего материала возможно применение не только аутогенного, но и аллогенного трансплантата, существующего в виде различных форм [4]. Несмотря на высокие остеоиндуктивные свойства аутогенный трансплантат имеет недостатки в виде расширения операционного поля, повышения вероятности послеоперационных инфекционных осложнений и увеличения времени оперативного вмешательства [5]. Отсутствие данных недостатков у аллотрансплантата, высокие кондуктивные свойства, вариабельность применяемых форм трансплантата и неограниченность материала позволяют восполнять дефекты различных геометрических пропорций [6]. Но если при заполнении дефектной полости ввиду наличия кортикальных стенок ограничений к форме используемого трансплантата и способу его удержания в дефектном материнском ложе нет, то при наличии дефекта осевых кортикальных структур данная проблема все еще имеет место, особенно в случае, когда продольная внешняя иммобилизация нежелательна [7]. Поэтому в настоящее время актуальна разработка методов хирургического лечения и пластики дефектной зоны, направленных на реконструкцию ДОПК, которые могут обеспечить надежную фиксацию и улучшить результаты оперативного лечения [8].

Цель работы — выполнить сравнительный анализ результатов хирургической пластики костных дефектов с применением донорского блочного и кубического кадаверного аллотрансплантатов на основании оценки жесткости костной ткани и васкуляризации зоны трансплантации при переломах дистального отдела плечевой кости с дефектами различной локализации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования стали 56 пациентов с диагностированным закрытым оскольчатым переломом ДОПК типа 13C2 и 13C3 по классификации АО с первичным дефектом костной ткани, возникшим вследствие травматического воздействия. Пострадавшие сопоставимы по возрасту и времени, прошедшему с момента получения травмы. Показания к операции определяли согласно клиническим рекомендациям по лечению пациентов с переломами дистального отдела плечевой кости (Клинические рекомендации «Переломы дистального отдела плечевой кости», 2024, одобрены НПС МЗ РФ).

В зависимости от локализации посттравматического дефекта, установленного по данным рентгенографии в двух стандартных проекциях и компьютерной томографии локтевого сустава, пациенты разделены на три группы (табл. 1, рис. 1–3):

- группа 1 — пациенты с сопутствующим посттравматическим дефектом в области медиальной колонны;
- группа 2 — пациенты с посттравматическим костным дефектом в зоне латеральной колонны;
- группа 3 — пациенты с локализацией посттравматического метафизарного дефекта в области центральной зоны.

В зависимости от размера дефекта каждая группа была разделена на две подгруппы:

- тип А — размер дефекта до 1,5 см²;
- тип Б — размер дефекта 1,5–3 см².

Исходя из размера костного дефекта и технической возможности его фиксации, пациентам проводили два вида хирургической реконструкции зоны дефекта.

Пациентам с размером дефекта до 1,5 см³ выполняли пластику лиофилизированным, обработанным ультразвуком аллогенным трансплантатом кадаверного происхождения в виде кубиков путем импакции в костное ложе.

Пациентам с дефектом костной ткани от 1,5 до 3 см³ осуществляли пластику костного дефекта способом (рис. 4) [9], включающим:

- формирование в области материнского ложа шиповидного паза, а на поверхности трансплантата — шиповидного выступа;
- формирование костных каналов, связывающих блок аллотрансплантата с костномозговой полостью;
- проведение блокирующих винтов через наконечную пластину и костный блок аллогенного трансплантата во взаимопересекающихся плоскостях.

Таблица 1

Распределение больных в зависимости от локализации и размера костного дефекта

Показатели		Группа 1 (n = 19)		Группа 2 (n = 19)		Группа 3 (n = 18)	
		1А	1Б	2А	2Б	3А	3Б
Количество больных		10	9	9	10	9	9
Пол женский	абс.	6	6	5	6	5	6
	%	60	66	55	60	55	66
Возраст, годы		42 (21–60)	37 (25–59)	39 (19–58)	46 (22–57)	44 (28–55)	39 (25–56)
Тип перелома по АО		13С3	13С2	13С2	13С3	13С2	13С3
ИМТ, кг/м ²		28 (24–32)	30 (26–34)	34 (30–39)	30 (25–32)	31 (26–35)	35 (28–38)
Время, прошедшее с травмы, дни		4	2	3	5	3	4



Рис. 1. Рентгенограмма пациента 43 лет, перелом дистального отдела плечевой кости с костным дефектом латеральной колонны (прямая и боковая проекции)



Рис. 3. Рентгенограмма пациентки 38 лет, перелом дистального отдела плечевой кости с костным дефектом медиальной колонны (прямая и боковая проекции)



Рис. 2. Рентгенограмма пациента 49 лет, перелом дистального отдела плечевой кости с костным дефектом центральной метафизарной зоны (прямая и боковая проекции)

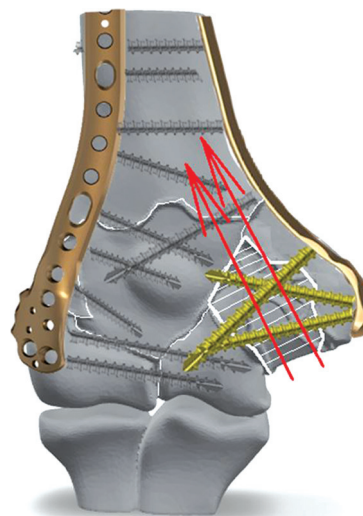


Рис. 4. Схема аллопластики блочным аллотрансплантатом посттравматического костного дефекта при оскольчатых переломах дистального отдела плечевой кости

В качестве контроля процессов консолидации проводили рентгенологическое исследование с использованием универсального комплекса OPERA SWING производства Джeneral Медикал Мерате С.п.А. (Италия). Пациентам выполняли рентгенографию ДОПК в прямой и боковой проекциях. Для объективизации процессов минерализации костной ткани и количественной оценки жесткости костных структур выполняли мультиспиральную компьютерную томографию (МСКТ) на аппарате Phillips с подсчетом индекса Хаунсфилда (шкала денситометрических показателей, HU). Проводили оценку ослабления рентгеновского излучения, проходящего через исследуемую костную ткань, по отношению к дистиллированной воде. В случае замещения костного дефекта и применения аллогенного трансплантата изменение данного показателя во времени при динамическом наблюдении свидетельствует об активности процессов репарации и минерализации костного трансплантата. В качестве оценочной шкалы применяли классификацию Misch, согласно которой можно проводить сравнение абсолютных показателей в единицах HU.

Для проведения исследования МСКТ ДОПК определены три зоны интереса, соответствующие участку аллопластического материала и смежной кости пациента:

- зона R1 размером 0,5–1 см² соответствовала краевому участку трансплантата, граничащему с костью реципиента;
- зона R2 размером 0,5–1 см² соответствовала центральному участку аллотрансплантата;
- зона R3 размером 0,5–1 см² являлась участком метафизарной кости пациента, граничащей с трансплантатом.

Подсчет индекса Хаунсфилда проводили с учетом размера использованного аллопластического материала [10–14].

Для установления активности протекания обменных процессов в зоне формирования костной мозоли у пациентов разных групп использовали метод ультразвуковой (УЗ) доплерографии с подсчетом индекса васкуляризации (ИБ), при котором происходит подсчет вновь образованных сосудов в зоне перелома. Их появление происходит на 7–10 день после травмы. Количество сосудов увеличивается пропорционально росту мягкой костной мозоли, к моменту формирования зрелой мозоли активность данного процесса сокращается. Вычисление интенсивности обменных процессов проводили путем подсчета площади визуализированных сосудов в зоне костной мозоли. Участок исследования составлял 2 × 2 см с захватом периостальной и интермедиарной зон проксимальнее и дистальнее линии перелома (рис. 5). Подсчет проводили по формуле: $ИБ = S \text{ сосудов} / S \text{ костной мозоли}$ [15–18].

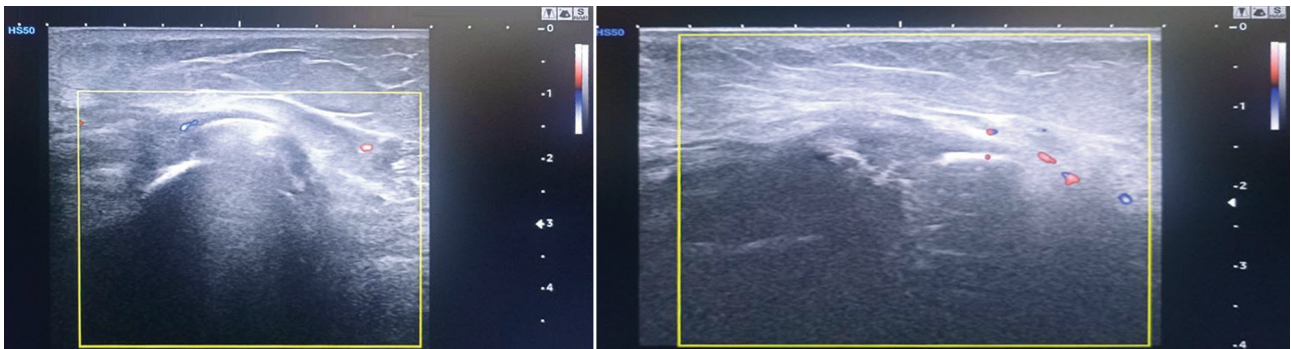


Рис. 5. Ультразвуковая доплерография зоны перелома ДОПК пациента 42 лет: через 14 дней и через 2 мес. после оперативного лечения

Период наблюдения пациентов исследуемых групп составил 6 мес. Рентгенологическое исследование выполняли через 1,5 мес. после операции с динамическим контролем через 3–3,5 мес. после операции для визуализации процесса образования костной мозоли, финальная рентгенография — через 6 мес. после операции для фиксации окончательных признаков консолидации перелома или осложнений, в случае их наличия. Компьютерную томографию выполняли через 1,5, 3,5 и 6 мес. для подсчета индекса Хаунсфилда, что позволило провести объективное сравнение жесткости костной ткани и трансплантата, проходящего через 6 мес. после операции стадии интеграции, остеокластической и начальной стадии остеобластической регенерации. УЗ доплерографию с подсчетом ИБ выполняли через 14 дн., 1,5 и 3,5 мес. после операции. Сроки обусловлены стадийностью процесса формирования сосудов в костной мозоли, которые начинают образовываться в зоне перелома через 7–10 дн. после травмы, достигают наибольшей плотности на единицу костной ткани к 1,5–2 мес. после травмы и уменьшаются до начального значения через 3,5 мес.

Статистическую обработку полученных данных осуществляли при помощи пакета программ IBMSPSS 20 Statistics. Ввиду несоответствия большинства полученных данных закону нормального распределения, для сравнения значений использовали непараметрический U-критерий Манна – Уитни, критерий Вилкоксона и показатель достоверности (*p*).

Проведение данного исследования одобрено этическим комитетом Саратовского ГМУ им В.И. Разумовского и выполнено в соответствии с Хельсинкской декларацией. Все пациенты заранее проинформированы об условиях исследования и дали письменное согласие на участие.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценивая динамические изменения показателей ИВ в зоне замещения дефекта, во всех подгруппах выявили увеличение значений через 2 мес. после операции. Более выражено значение увеличилось в подгруппах 1Б, 2Б, 3Б, – в $(7,9 \pm 1,27)$ раз ($p = 0,01$), в подгруппах 1А, 2А, 3А оно увеличилось в $(6,9 \pm 1,13)$ раз ($p = 0,02$). Через 3,5 мес. после операции отмечали уменьшение показателей ИВ по сравнению с данными, полученными через 14 дней после операции. При этом средние значения ИВ в подгруппах 1А, 2А, 3А были ниже в $(1,65 \pm 1,13)$ раз ($p = 0,001$), а в подгруппах 1Б, 2Б, 3Б – в 1,03 раза ($p = 0,002$) (табл. 2).

Таблица 2

Динамика изменений значения ИВ

Группы	Средние значения ИВ после операции, %					
	14 дней	2 месяца	p	4 месяца	p_1	p_2
1А	$3,46 \pm 0,14$	$24,02 \pm 0,55$	0,001	$3,60 \pm 0,09$	0,017	$> 0,05$
2А	$3,32 \pm 0,10$	$25,80 \pm 0,68$	0,001	$3,61 \pm 0,12$	0,003	0,047
3А	$3,65 \pm 0,15$	$23,17 \pm 0,83$	0,002	$3,80 \pm 0,10$	0,002	0,048
1Б	$3,57 \pm 0,25$	$28,44 \pm 0,46$	0,012	$5,42 \pm 0,18$	0,003	0,040
2Б	$3,48 \pm 0,18$	$29,51 \pm 0,29$	0,019	$6,18 \pm 0,25$	0,005	0,045
3Б	$3,54 \pm 0,12$	$27,12 \pm 0,72$	0,022	$5,90 \pm 0,16$	0,007	0,039

Примечание: p – показатель достоверности по сравнению с данными через 2 нед.; p_1 – показатель достоверности по сравнению с данными через 2 мес.; p_2 – показатель достоверности по сравнению с данными через 2 нед.

При сравнении показателей отмечали, что способ пластики костного дефекта блочным аллотрансплантатом оказывал положительное влияние на значение жесткости костной ткани в приграничной краевой зоне R1 и центральной зоне R2 через 3 мес. после операции при всех локализациях дефекта ($p < 0,05$).

При динамическом анализе показателей центральной зоны замещенного дефекта отмечали, что значения, полученные через 3 мес. после операции, ниже, чем значения через 1,5 мес. при всех локализациях дефекта ($p < 0,05$).

При сравнении жесткости трансплантата в центральной зоне отмечали, что при оскольчатых переломах с дефектом центральной метафизарной зоны значения (170 НУ, $p = 0,032$) были ниже в 1,12 раза, чем при медиальных дефектах (190 НУ, $p = 0,001$), и в 1,1 раза, чем при латеральных (185 НУ, $p = 0,002$) (табл. 3).

Таблица 3

Значение индекса Хаунсфилда по данным КТ при динамическом контроле

	Значение индекса Хаунсфилда, НУ																	
	1А			2А			3А			1Б			2Б			3Б		
	1,5 мес.	3 мес.	6 мес.	1,5 мес.	3 мес.	6 мес.	1,5 мес.	3 мес.	6 мес.	170	210	250	170	200	260	160	185	270
R1	100	130	200	105	140	205	110	140	200	0,031	0,003	0,046	0,03	0,009	0,02	0,001	0,026	$> 0,05$
p_1	0,027	0,005	0,039	0,031	0,012	0,008	0,033	0,04	0,037	$> 0,05$	0,015	$> 0,05$	$> 0,05$	0,006	$> 0,05$	$> 0,05$	0,002	$> 0,05$
p_3		0,009			0,01			0,011			0,012			0,013			0,015	
p_4			0,02			0,001			0,021			0,03			0,02			0,01
R2	140	120	190	130	120	200	130	110	190	210	190	250	205	185	240	190	170	250
p_2	0,011	0,01	0,029	0,025	0,002	0,031	0,026	0,001	0,031	0,025	0,001	0,04	0,008	0,007	0,003	0,03	0,032	$> 0,05$
p_3		0,038			0,012			0,003		0,021	0,003	0,026	0,023	0,009	0,025	0,02	0,01	0,028
p_4			0,021			0,001			0,001		0,014			0,015			0,012	
R3	220	280	330	210	270	310	230	260	300			0,041			0,01			0,022
p_3		0,015			0,012			0,019		240	280	320	240	285	305	220	255	300
p_4			0,01			0,002			0,021	$> 0,05$	0,05	$> 0,05$	$> 0,05$	$> 0,05$	$> 0,05$	$> 0,05$	0,033	$> 0,05$

Примечание: p – показатель достоверности при межгрупповом сравнении показателей; p_1 – показатель достоверности значения R1 относительно R3; p_2 – показатель достоверности значения R2 относительно R3; p_3 – значение коэффициента корреляции внутри группы при сравнении показателей через 3 мес. и через 1,5 мес.; p_4 – значение вероятности внутри группы при сравнении показателей через 6 мес. и через 1,5 мес.

В ходе наблюдений отмечали 14 случаев развития осложнений лечения (25 %), большинство из которых (шесть случаев, 9 %) встречались среди пациентов с дефектом центральной метафизарной зоны (табл. 4).

Таблица 4

Осложнения хирургической реконструкции при переломах ДОПК

Вид осложнения		Количество осложнений					
		1А	2А	3А	1Б	2Б	3Б
Остеорезорбция	абс.	0	1	1	0	1	0
	%		1,8	1,8		1,8	
	<i>p</i>		0,002	0,002		0,002	
Замедленная консолидация	абс.	2	2	3	1	1	2
	%	3,6	3,6	5,3	1,8	1,8	3,6
	<i>p</i>	0,02	0,007	0,01	0,02	0,03	0,07

ОБСУЖДЕНИЕ

Аллогенный трансплантат для замещения посттравматических дефектов костной ткани ДОПК используют для анатомической реконструкции сегмента, что создает возможность возвращения физиологической биомеханики движений локтевого сустава, для которого ранняя разработка движений имеет критическое значение. При этом недостаточная фиксация трансплантата в зоне дефекта или компрометированная стабильность костных отломков в зоне перелома вынуждает хирурга прибегать к продлению иммобилизации. В свою очередь жесткая фиксация отломков и трансплантата благодаря снижению микроподвижности последних способствует консолидации перелома и активным репаративным процессам, происходящим на границе «собственная кость – трансплантат» [2, 3, 19–21]. При этом анализ активности данных процессов почти невыполним в материале *in vitro* ввиду невозможности воссоздать множество клеток, с которыми трансплантат взаимодействует в процессе остеорепаляции. При этом на активность самих последовательно сменяющих друг друга клеточных реакций влияют не только остеоиндуктивные, но и остеокондуктивные свойства трансплантата, такие как архитектура и размер пор. Поэтому нативная структура играет важную роль в процессе адаптации костного трансплантата в костном ложе [22, 23]. Имея в арсенале рентгенологический метод, а именно возможность выполнять МСКТ поврежденного сегмента, исследованию поддается непосредственно зона замещаемого дефекта. При использовании данного метода появляется возможность количественной оценки. Так как интеграция костного трансплантата происходит через стадию лизиса и дальнейшего неоостеогенеза в периферийной зоне последнего в направлении от периферии к центру, зона замещенного трансплантата разделена на три области одинакового радиуса, — R1, R2, R3 [13, 24, 25]. Согласно данным, полученным при выполнении КТ, в зонах исследуемого трансплантата можно установить несколько закономерностей. При исследовании зоны R1 во всех группах отмечено постепенное увеличение абсолютных значений HU, что свидетельствует об увеличении жесткости аллотрансплантата. Данный феномен может быть объяснен процессом минерализации костного трансплантата, начинающимся через 1–1,5 мес. после оперативного замещения дефекта. При этом отложение минеральных солей в субстрате костного вещества сопутствует процессу неоангиогенеза в сегменте костной ткани, уже прошедшей стадию лизиса. Внутри одной зоны замещенного сегмента разнонаправленные процессы лизиса и минерализации вновь образованной костной ткани могут происходить параллельно. Этим феноменом одновременной неоднородности трансплантата можно объяснить разброс количественных значений индекса Хаунсфилда [13, 19, 22]. При этом значение показателей приграничной зоны трансплантата R1 являлось, по нашему мнению, наиболее важным ввиду количественной характеристики прочности контакта между трансплантатом и костным ложем. Пограничная зона контакта по типу фиброзно-костного блока, соответствующая 201–300 HU у пациентов подгрупп 1А, 2А, 3А, была достигнута через 6 мес. после имплантации, в то время как у пациентов подгрупп 1Б, 2Б, 3Б — уже через 3 мес. после хирургического вмешательства (табл. 3). При этом значения 300 HU, соответствующее костному блоку, ни в одной подгруппе достигнуто не было [26–28].

У пациентов подгрупп 1А, 2А, 3А, которым в качестве дефект замещающего материала применен аллотрансплантат кадаверной природы в виде кубиков, во всех зонах исследования R1–R3 отмечены более низкие исходные значения HU в пограничной зоне, что сходно с данными жесткости костной ткани без замещения зоны дефекта [22, 30]. Учитывая вид и форму используемого материала, перед хирургом возникала необходимость в дополнительной фиксации замещаемого трансплантата посредством его прессования в дефектном ложе с помощью надставки. При этом происходило разрушение трабекулярной архитектуры аллотрансплантата на границе слоя «материнская кость — костный блок», что проявлялось уменьшением количественных показателей жесткости костной ткани и изменяло свойства и характеристики применяемого материала. С одной стороны, дополнительное прессование замещающего материала способствует его механическому уплотнению в материнском ложе, в то же время вследствие данной манипуляции качество ткани применяемого трансплантата снижалось ввиду микроповреждений и нарушения костной архитектуры и геометрии, что находит отражение в недостаточно прочной фиксации материала [28–30].

Уменьшение показателя индекса Хаунсфилда в зоне R2 через 3 мес. после проведенного оперативного вмешательства по сравнению со значениями, полученными через 1,5 мес., можно объяснить физиологическим разрежением костного вещества. В процессе остеорепаляции формирование вновь образованной костной ткани происходит через стадию лизиса, в результате чего жесткость ткани, выраженная в НУ, уменьшилась. Увеличение данного показателя к 6 мес. после операции свидетельствует о преобладании процессов аккумуляции минерального субстрата в замещенной костной ткани над процессами ее распада, что выражается в увеличении жесткости костного трансплантата. При сравнении показателей через 6 мес. после операции можно увидеть различия при межгрупповых сравнениях соответствующих зон исследования, при этом не происходит достижения показателей «здоровой» метафизарной костной ткани без остеопении [23, 25, 29, 31, 32].

При изучении результатов доплерографии зоны перелома отмечено, что у всех пациентов имелась общая тенденция к сравнительно низким показателям индекса васкуляризации в период репарации и начала формирования первичный костной мозоли через 2 нед., а также к моменту окончания репаративной фазы остеозамещения через 4 мес. после травмы. При этом через 2 мес. после операции в период высокой активности фазы формирования вторичной костной мозоли отмечен рост данного показателя. Учитывая, что активное кровоснабжение зоны перелома, а именно наружной части костной мозоли, способствует дифференцировке остеогенных клеток в остеобласты, можно предположить, что наличие остеопластического материала не изменяет общего направления остеорепаративных процессов [15, 17, 18].

Отмеченный через 2 мес. после операции рост площади мелких вновь образованных сосудов в зоне формирования костной мозоли у пациентов подгрупп 1Б, 2Б, 3Б можно объяснить как более высокими остеointегративными свойствами используемого материала, так и дополнительными интраоперационными мероприятиями, способствующими увеличению биоактивных веществ в зоне перелома [9]. Уменьшение площади образованных сосудов в зоне костной мозоли через 4 мес. после хирургического вмешательства более выражено у пациентов подгрупп 1А, 2А, 3А и свидетельствует о снижении активности кровоснабжения и обменных процессов в зоне формирования костной мозоли [16, 17]. В случае с положительной рентгенологической картиной и наличием признаков консолидации перелома можно предположить благоприятное течение и пролонгированный характер остеорепаративных процессов при использовании аллогенного блочного трансплантата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При сравнении результатов использования аллогенного трансплантата разной природы при оскольчатых переломах ДОПК типа 13С2 и 13С3, сопровождавшихся посттравматическими дефектами костной ткани, установлено, что показатели среднесрочной остеointеграции более выражены при применении нативного аллогенного материала блочного типа при локализации дефекта в области медиальной и латеральной колонн. Однако наличие осложнений и неудовлетворительных исходов лечения определяет необходимость дальнейшего изучения применения данных материалов и методик пластики костных дефектов.

Конфликт интересов. Не заявлен.

Источник финансирования. Не заявлен.

Этические нормы. Исследование одобрено этическим комитетом Саратовского ГМУ им В.И. Разумовского и выполнено в соответствии с Хельсинкской декларацией.

Информированное согласие. Все пациенты заранее проинформированы об условиях исследования и дали письменное согласие на участие.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чибиров Г.М., Солдатов Ю.П. Лечение больных с нарушением функции локтевого сустава, сопровождающимся посттравматическим псевдоартрозом мыщелка плечевой кости. *Гений ортопедии*. 2013;(3):80-81.
2. Грицюк А.А., Лычагин А.В., Крюков Е.В. и др. Особенности протезирования локтевого сустава при ранениях и травмах: отдаленные результаты. *Военно-медицинский журнал*. 2017;338(12):37-44. doi: 10.17816/RMMJ73433.
3. Ходжанов И.Ю., Борзунов Д.Ю., Байимбетов Г.Д. Лечение детей с множественными повреждениями костей, образующих локтевой сустав. *Гений ортопедии*. 2023;29(1):12-19. doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-1-12-19.
4. Попков А.В., Попков Д.А. Биосовместимые имплантаты в ортопедии: инженерия костной ткани. *Гений ортопедии*. 2023;29(6):662-668. doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-6-662-668.
5. 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.
6. Molenaars RJ, Schoolmeesters BJA, Viven J, et al. There is a role for allografts in reconstructive surgery of the elbow and forearm. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2019;27(6):1840-1846. doi: 10.1007/s00167-018-5221-y.
7. Kirilova IA, Sharkeev YuP, Podorozhnaya VT, et al. Structural and functional studies of bioobjects prepared from femoral heads. *AIP Conf. Proc.* 2015;1688(1): 030005. doi: 10.1063/1.4936000.
8. Еремин А.В., Сорокин Г.В., Горкун А.А. и др. Адгезивные свойства природного и искусственных остеопластических материалов. *Кафедра травматологии и ортопедии*. 2014;(2):11-15.

9. Давыдов А.П., Петров А.Б. Способ пластики посттравматических околоуставных дефектов длинных трубчатых костей (варианты). Патент РФ на изобретение № 2798904. 28.06.2023. Бюл. № 19. Доступно по: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2798904&TypeFile=html. Ссылка активна на 23.05.2025.
10. Moreno M, Amaral MH, Lobo JM, Silva AC. Scaffolds for Bone Regeneration: State of the Art. *Curr Pharm Des.* 2016;22(18):2726-2736. doi: 10.2174/1381612822666160203114902.
11. Слетов А.А., Жидовинов А.В., Можейко Р.А. и др. Сравнительный анализ эффективности визуальных методов диагностики у пациентов с остеонекрозами и асептическими остеомиелитами челюстных костей. *Вестник Волгоградского государственного медицинского университета.* 2017;(1):78-81.
12. Vasyliov R, Oksymets V, Rodnichenko A, et al. Tissue engineering-based approach for restoration of combat related critical sized bone defects. *Cytotherapy.* 2017;19(5):223-224.
13. Рерих В.В., Предеин Ю.А., Батаев В.А. и др. Формирование костного блока при выполнении межтелового спондилодеза остеотрансплантатом и аутокостью в условиях фиксации позвоночного сегмента керамическими имплантатами в эксперименте. *Современные проблемы науки и образования.* 2020;(5):131-133. doi: 10.17513/spno.30221.
14. Misch CE. The implant quality scale: a clinical assessment of the health--disease continuum. *Oral Health.* 1998;88(7):15-20, 23-25; quiz 25-26.
15. Кормилина А.Р., Тухбатуллин М.Г. Возможности мультипараметрического УЗИ в оценке созревания костной мозоли. *Материалы XV Всероссийского национального конгресса лучевых диагностов и терапевтов «Радиология-2021».* М.: МЕДИ Экспо; 2021:46-47. URL: https://www.mediexpo.ru/fileadmin/user_upload/content/pdf/rad2021--abstracts.pdf.
16. Кормилина А.Р. Мультипараметрическое ультразвуковое исследование при переломах длинных трубчатых костей: дисс... канд. мед. наук. Казань: 2016:123. Доступно по: <https://www.disscat.com/content/multiparametricheskoe-ultrazvukovoe-issledovanie-pri-perelomakh-dlinnykh-trubchatykh-kostei>. Ссылка активна на 23.05.2025.
17. Nicholson JA, Tsang STJ, MacGillivray TJ, et al. What is the role of ultrasound in fracture management?: Diagnosis and therapeutic potential for fractures, delayed unions, and fracture-related infection. *Bone Joint Res.* 2019;8(7):304-312. doi: 10.1302/2046-3758.87.BJR-2018-0215.R2.
18. Cocco G, Ricci V, Villani M, et al. Ultrasound imaging of bone fractures. *Insights Imaging.* 2022;13(1):189. doi: 10.1186/s13244-022-01335-z.
19. Kennedy OD, Herman BC, Laudier DM, et al. Activation of resorption in fatigue-loaded bone involves both apoptosis and active pro-osteoclastogenic signaling by distinct osteocyte populations. *Bone.* 2012;50(5):1115-1122. doi: 10.1016/j.bone.2012.01.025.
20. Дьячков А.Н., Мигалкин Н.С., Стогов М.В. и др. Безопасность и эффективность использования трубчатого аллотрансплантата при замещении крупных дефектов биэпифизарных костей в эксперименте. *Российский медико-биологический вестник имени академика И.П. Павлова.* 2022;30(2):139-148. doi: 10.17816/PAVLOVJ100480.
21. Tipton S, Nunez FA, Vazquez FAN, et al. Reconstruction of Distal Humerus Fractures with Severe Bone Loss: A Case Series and Review of the Literature. *J Surg Orthop Adv.* 2020;29(2):65-72.
22. Чесноков С.А., Ковылин Р.С., Юдин В.В. и др. Костнозамещающие материалы на основе олигоэфирметакрилатов. *Олигомеры-2024: сборник трудов XX Международной конференции по химии и физикохимии олигомеров. Пленарные лекции.* Черноголовка: ФИЦ ПХФ и МХ РАН; 2024;(1):178-200. Доступно по: https://oligomers.ru/wp-content/uploads/2024/09/Сборник-Том1-2024_c.pdf. Ссылка активна на 23.05.2025.
23. Shibuya N, Jupiter DC. Bone graft substitute: allograft and xenograft. *Clin Podiatr Med Surg.* 2015;32(1):21-34. doi: 10.1016/j.cpm.2014.09.011.
24. Misch CE. Bone character: second vital implant criterion. *Dent Today.* 1988;7:39-40.
25. Ежов М.Ю., Ежов И.Ю., Кашко А.К. Нерешённые вопросы регенерации хрящевой и костной ткани (обзорно-аналитическая статья). *Успехи современного естествознания.* 2015;(5):126-131. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=35113>.
26. Кириленко С.И., Николаев В.И., Надыров Э.А. и др. Результаты трансформинального межтелового спондилодеза с использованием нового способа костной пластики. *Медицинские новости.* 2022;(3):69-72.
27. Нецветов П.В., Худяев А.Т., Дьячкова Г.В. и др. Роль компьютерной томографии в оценке плотности костного блока поврежденного сегмента позвоночника на различных этапах лечения аппаратом наружной транспедикулярной фиксации. *Вестник рентгенологии и радиологии.* 2007;(2):23-26.
28. Черняев В.С., Фоменко М.А., Цыганкова А.В. Клинические аспекты современной лучевой диагностики в травматологии и ортопедии. *Тенденции развития науки и образования.* 2021;71:65-68. doi: 10.18411/ij-03-2021-15.
29. Дьячкова Г.В., Митина Ю.Л., Дьячков К.А. и др. Клинические аспекты современной лучевой диагностики в травматологии и ортопедии. *Гений ортопедии.* 2011;(2):84-90.
30. Burr DB. Bone quality: understanding what matters. *J Musculoskelet Neuronal Interact.* 2004;4(2):184-186.
31. Рожинская Л.Я. Концепция качества кости: влияние на параметры качества кости антирезорбтивных препаратов. *Остеопороз и остеопатия.* 2003;3:25-29.
32. Александров С.М. Мультирезцовая компьютерная томография в определении качества кости у больных с хроническим остеомиелитом: дисс... канд. мед. наук. Санкт-Петербург; 2016:172. Доступно по: <https://www.dslib.net/luch-diagnostika/multisrezovaya-kompjuteraja-tomografija-v-opredelenii-kachestva-kosti-u-bolnyh-s.html>. Ссылка активна на 23.05.2025.

Статья поступила 23.04.2025; одобрена после рецензирования 22.05.2025; принята к публикации 05.06.2025.

The article was submitted 23.04.2025; approved after reviewing 22.05.2025; accepted for publication 05.06.2025.

Информация об авторах:

Алексей Павлович Давыдов — ассистент кафедры, alexeydavidow@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4181-3844>;
 Андрей Геннадьевич Чибриков — кандидат медицинских наук, заведующий отделением, <https://orcid.org/0009-0006-8273-4113>;
 Владимир Юрьевич Ульянов — доктор медицинских наук, доцент, проректор, v.u.ulyanov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9466-8348>;
 Игорь Алексеевич Норкин — доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой, norkingsmu@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6770-3398>.

Information about the authors:

Aleksey P. Davydov — Assistant, alexeydavidow@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4181-3844>;
 Andrej G. Chibrikov — Candidate of Medical Sciences, Head of Department, <https://orcid.org/0009-0006-8273-4113>;
 Vladimir Yu. Ulyanov — Doctor of Medical Sciences, Associate Professor, Vice-Rector, v.u.ulyanov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9466-8348>;
 Igor A. Norkin — Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of Department, norkingsmu@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6770-3398>.

Научная статья

УДК 004.9:616.727.2-008.1-071.3

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-4-424-432>

Валидация видеоассистированного на основе компьютерного зрения гониометрического исследования двигательной функции отведения плечевого сустава

С.А.Демкин^{1✉}, А.А. Малякина¹, С.А. Ахрамович², О.А. Каплунов¹,
И.Е. Обраменко¹, И.Э. Симонова³

¹ Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Россия

² ООО «Мета-Технологии», Москва, Россия

³ Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

Автор, ответственный за переписку: Сергей Анатольевич Демкин, smdem@mail.ru

Аннотация

Введение. Гониометрическое исследование движений в плечевом суставе играет важную роль в оценке функционального состояния сустава, диагностике различного рода нарушений, мониторинге проводимого восстановительного лечения, его широко применяют в клинической практике. На сегодняшний день компьютерное зрение является перспективным направлением в решении проблемы унификации и объективизации гониометрических исследований различных соматометрических признаков.

Цель работы — валидация видеоассистированного на основе компьютерного зрения гониометрического исследования двигательной функции отведения плечевого сустава с использованием с использованием потенциала нейросетей.

Материалы и методы. В исследовании приняли участие 33 добровольца, — мужчины и женщины от 18 до 56 лет, с массой тела — от 53 до 108 кг, ростом — от 155 до 195 см. Для валидации авторской методики гониометрического исследования отведения в плечевом суставе сравнивали результаты связанных выборок: обследование с помощью классической гониометрии (группа 1); рентгенологическое изучение изменения положения костных структур плечевого сустава (группа 2); обследование с использованием видеоассистированной методики гониометрии компьютерное зрение (группа 3). Исследование выполнено на аппаратно-программном комплексе «Артро-Про». Статистическая обработка проведена с использованием программного пакета Statgraphics.

Результаты. Среднее отличие показателей амплитуды отведения в группах 1 и 2 — незначительно, оно составило $(0,62 \pm 0,63)^\circ$ от минимума $5,2^\circ$ до максимума 1° (доверительный интервал надежности $p = 0,95$). Разница значений угла отведения групп 1 и 3 колеблется в диапазоне от $-11,8^\circ$ до $22,7^\circ$, средняя разность составляет 6° (доверительный интервал надежности $p = 0,95$).

Обсуждение. Незначительная разница углов отведения, полученных в результате применения технологий компьютерного зрения и классической гониометрии, свидетельствует о сопоставимости двух методов и открывает возможность внедрения технологии оценки функции опорно-двигательного аппарата на основе искусственного интеллекта в клиническую практику.

Заключение. Видеоассистированная технология гониометрического исследования функции отведения плечевого сустава на основе компьютерного зрения является валидным методом, который можно правомерно применять в клинической практике.

Ключевые слова: плечевой сустав, захват движений, компьютерное зрение, рентгенография, гониометрия

Для цитирования: Демкин С.А., Малякина А.А., Ахрамович С.А., Каплунов О.А., Обраменко И.Е., Симонова И.Э. Валидация видеоассистированного на основе компьютерного зрения гониометрического исследования двигательной функции отведения плечевого сустава. *Гений ортопедии*. 2025;31(4):424-432. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-424-432.

Original article

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-4-424-432>

Validation of video-assisted computer vision goniometry to measure shoulder abduction motor function

S.A. Demkin^{1✉}, A.A. Malyakina¹, S.A. Akhramovich², O.A. Kaplunov¹, I.E. Obramenko¹, I.E. Simonova³

¹ Volgograd State Medical University, Volgograd, Russian Federation

² LLC «Meta-Technologies», Moscow, Russian Federation

³ Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

Corresponding author: Sergey A. Demkin, smdem@mail.ru

Abstract

Introduction Goniometry is used to measure shoulder abduction range of motion aiding in diagnosis, rehabilitation planning and monitoring progress in rehabilitation evaluating a patient's shoulder function. Computer vision technology holds promising potential for the assessment of movement by unifying and objectifying goniometric studies of different somatometric parameters.

The **objective** was to validate a video-assisted computer vision goniometry of the motor function of shoulder abduction using the potential of neural networks.

Material and methods The study involved 33 volunteers, males and females aged 18 to 56 years, with the weight of 53 to 108 kg and the height of 155 to 195 cm. Measurements of related samples were compared to validate the author's method of goniometric examination of shoulder abduction. Classical goniometry was used for patients of group 1. Changes in the shoulder position were radiologically explored in group 2 and video-assisted goniometry computer vision was employed for examinations in group 3. The study was performed using hardware and software "Arthro-Pro" system. Statistical processing was produced using the Statgraphics software package.

Results The average difference in the abduction was insignificant in groups 1 and 2 measuring $(0.62 \pm 0.63)^\circ$ from a minimum of 5.2° to a maximum of 1° with confidence interval of $p = 0.95$. The difference in the abduction angle ranged from -11.8° to 22.7° in groups 1 and 3 with the average difference of 6° and confidence interval of $p = 0.95$.

Discussion The minor difference in the abduction angles obtained with computer vision technologies and classical goniometry indicated the comparability of the two methods facilitating the possibility of introducing artificial intelligence for assessing musculoskeletal function in clinical practice.

Conclusion The video-assisted computer vision goniometry is practical for measurements of shoulder abduction in clinical practice.

Keywords: shoulder joint, motion capture, computer vision, radiography, goniometry

For citation: Demkin SA, Malyakina AA, Akhramovich SA, Kaplunov OA, Obramenko IE, Simonova IE. Validation of video-assisted computer vision goniometry to measure shoulder abduction motor function *Genij Ortopedii*. 2025;31(4):424-432. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-424-432.

ВВЕДЕНИЕ

Гониометрическое исследование движений в плечевом суставе играет важную роль в оценке функционального состояния сустава, диагностике различного рода нарушений, мониторинге проводимого восстановительного лечения, исследование широко применяют в клинической практике [1]. Первые упоминания метода можно встретить в трудах Гиппократ, Цельса Корнелия, Галена и других великих учёных древности. Современные же рекомендации по проведению гониометрии воплотились в руководстве В.А. Гамбурцева [1], нашли отражение в диагностике заболеваний опорно-двигательной системы, вошли в алгоритмы работы травматолого-ортопедических служб, отделений медицинской реабилитации, военно-врачебных комиссий, медико-социальных экспертных комиссий и других структур.

Несмотря на долгую историю применения гониометрии, актуальной на сегодняшний день остается проблема отсутствия унификации исследований ряда соматометрических признаков. Также недостаточно разработаны методы измерений движений в суставах, в том числе в плечевом. Отсутствие унификации гониометрических исследований движений в плечевом суставе обусловлено тем, что каждый исследователь проводит измерения не стандартизированно, а также крайней сложностью идентичного расположения ручного гониометра даже у одного пациента [2].

Плечевой сустав, являясь самым мобильным в человеческом теле, обладает максимальным количеством степеней свободы, сложностью и многокомпонентностью движений, ввиду чего весьма проблематична его оценка, как с помощью ручной гониометрии, так и с использованием современных технологий захвата движений [3]. Уже не одно десятилетие ведется поиск различных технологических решений, позволяющих объективизировать метод, повысить его точность. Наиболее успешной на сегодняшний день является бесконтактная технология захвата движений с использованием маркерной видеосъемки, позволяющей регистрировать движения человека с помощью светоотражающих маркеров, видеокамер и компьютерной техники, что является существенным прорывом в объективизации гониометрических исследований. Тем не менее, существующие минусы данной технологии, например, дороговизна оборудования, сложность и трудоемкость реализации метода, существенно сдерживают массовое внедрение методики в клиническую практику. Более того, такие факторы как освещение, положение датчиков, которые во время движений могут смещаться и наслаиваться друг на друга на теле человека, влияют на точность проводимых измерений [4–8].

На сегодняшний день компьютерное зрение на основе потенциала нейросети, относящееся к оптической безмаркерной и бесконтактной технологии захвата движений, является перспективным направлением в решении проблемы унификации и объективизации гониометрических исследований разных соматометрических признаков. Существующие достижения в обучении нейросетей позволяют с высокой точностью распознавать движения человека и формировать проекционную кинематическую модель человеческого тела, на основе которой возможно проведение различных измерений [9–16]. Тем не менее, существенное влияние на процесс реализации метода оказывает техника выполнения диагностических движений, освещение и другие факторы, которые могут существенно искажать показатели. Аналогичным образом остается нерешенным вопрос интерпретации полученных данных и их роли в диагностике заболеваний, сопровождающихся нарушением функционирования опорно-двигательного аппарата человека [17–21].

Существующие правила проведения гониометрических измерений на плечевом суставе имеют ряд «подводных камней», существенно влияющих на показатели движений, в том числе и с помощью компьютерного зрения. Во-первых, это сам параметр «объем движений», который предполагает начало измерения от «нулевого положения», а завершение — максимальным значением отведения. На исходное (нулевое) положение существенно влияет положение туловища, особенно во время проведения диагностического упражнения. Так, сколиоз может изменять траекторию движений верхней конечности. Кроме того, следует отметить, что видеосъемка производится в плоскости, а отведение в плечевом суставе далеко не всегда происходит только во фронтальной плоскости, что может искажать получаемые значения [22–26].

Таким образом, точность измерений, проводимых с помощью технологий компьютерного зрения, обусловлена как особенностями исследования изменения положения распознанных сегментов плечевого сустава в процессе его движения, так и выполнением диагностического упражнения. Учитывая существующую на сегодняшний день проблематику, на основе технологии компьютерного зрения нами разработан аппаратно-программный комплекс «Артро-Про» (свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2023667718 от 17.08.2023 г.). Аппаратно-программный комплекс позволяет осуществлять видеозахват и оценку движений человека с помощью специально созданного алгоритма проведения измерений на проекционной кинематической модели, полученной с использованием искусственного интеллекта, а также путем выполнения специально разработанных диагностических упражнений. Представляет интерес валидация данной технологии с уже существующими методами гониометрических исследований.

Цель работы — валидация видеоассистированного на основе компьютерного зрения гониометрического исследования двигательной функции отведения плечевого сустава с использованием с использованием потенциала нейросетей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводили на базах кафедр медицинской реабилитации и спортивной медицины, нормальной физиологии Волгоградского государственного медицинского университета. К исследованию допускали добровольцев обоего пола, соответствовавших критериям включения ($n = 33$), прошедших медицинский осмотр (травматолог-ортопед, реабилитолог) и подписавших информированное согласие на участие в клиническом исследовании, одобренном ВолГМУ (протокол от 21.10.2022 № 2022/149).

Для валидации авторской методики гониометрического исследования отведения в плечевом суставе сравнивали результаты связанных выборок, полученные при проведении ряда серий обследований:

- группа 1 включала обследование с помощью гониометрии «Классическая гониометрия» (КГ);
- группа 2 — рентгенологическое изучение изменения положения костных структур плечевого сустава «Рентген-снимок» (R);
- группа 3 — обследование с использованием видеоассистированной методики гониометрии «Компьютерное зрение» (КЗ).

Критерии включения в клиническое исследование:

- клинически здоровые мужчины и женщины нормостенического типа телосложения;
- возраст от 18 до 60 лет;
- нормальное функционирование плечевого сустава по данным клинического осмотра.

Критерии не включения:

- выявленные нарушения функционирования плечевых суставов;
- повреждения внутренних и околоуставных структур плечевого сустава, выявленные с помощью специальных методов исследования (рентгенография, МРТ, УЗИ);
- психомоторные, психоорганические и неврологические нарушения;
- синдром дисплазии соединительной ткани;
- системные заболевания соединительной ткани.

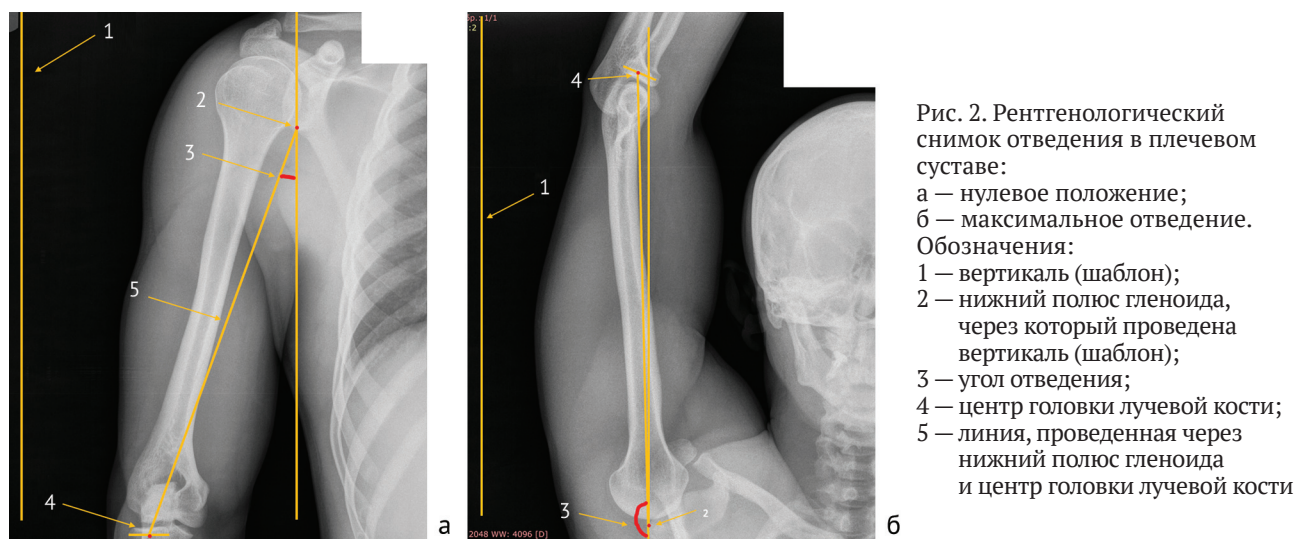
В исследовании приняли участие мужчины и женщины от 18 до 56 лет, с массой тела — от 53 до 108 кг, ростом — от 155 до 195 см.

КГ плечевого сустава осуществляли с применением ручного гониометра. Обследуемого располагали в основной стойке, движение производили во фронтальной плоскости. Гониометр прикладывали к суставу сзади в месте совпадения шарнира с головкой плечевой кости. Одну из браншей устанавливали вертикально вдоль оси позвоночника, другую — вдоль оси плеча. Исходное положение признавали нулевым (рис. 1, а) [6]. Результатом обследования являлась максимальная амплитуда отведения в плечевом суставе после трёхкратного повторения. Отклонение от анатомической позиции описывали положительным числом градусов в диапазоне от 0 до 180°. Измерения объема движений проводили справа (рис. 1, б).



Рис. 1. Измерение амплитуды отведения плеча с помощью ручного гониометра: а — нулевое положение; б — максимальное отведение

Учитывая существенную вариабельность значений гониометрического исследования с помощью ручного гониометра [6], проведена регистрация отведения в плечевом суставе у обследуемых с помощью рентгенографии (2-я серия). При анализе рентгенографического снимка оценивали следующие анатомические ориентиры (линии, стрелки) в исходном положении (рис. 2, а) и при максимальном отведении (рис. 2, б).

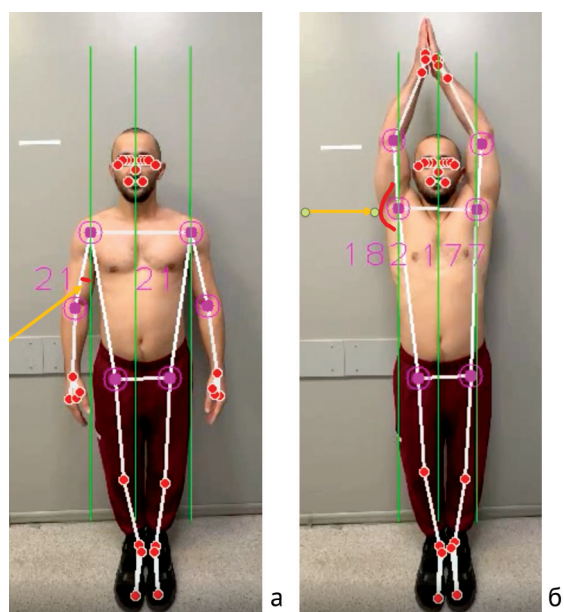


Изначально измерение движений в плечевом суставе предполагает определение оси ротации, проходящей через центр головки плечевой кости и её наружный надмыщелок. Тем не менее, точное сопоставление указанных ориентиров в нулевом положении и при максимальном отведении верхней конечности провести невозможно ввиду двухплоскостного характера изображения рентгенограммы. В связи с этим найдены анатомические точки, которые отчетливо прослеживаются как в нулевом положении, так и при максимальном отведении. Эти точки располагаются максимально близко к общепринятым (рис. 2): нижний полюс гленоида и центр головки лучевой кости, через которые проведена линия. Для обеспечения унификации измерений за второй ориентир принята вертикаль (1), проведенная через нижний полюс гленоида, между которыми измеряется угол отведения (3) (рис. 2).

В 3-й серии оценку амплитуды активного отведения в плечевом суставе проводили по авторской методике гониометрии КЗ с использованием аппаратно-программного комплекса «АртроПро», включающего видеокамеру разрешения HD, штатив и компьютер с предустановленной программой. Обследуемого располагали фронтально по отношению к видеокамере с прижатыми к вертикальной опоре лопатками. Видеокамеру размещали на расстоянии 1,5 м от обследуемого на высоте 1,5 м от пола. За нулевое положение принимали положение рук, опущенных вниз с направленным вперед первым пальцем кисти. Далее обследуемый дугообразно отводил руки вверх до максимального положения.

Распознавание движений человека производили с помощью предварительно обученной нейросети MediaPipe, которая после обработки видеоизображений формировала проекционные точки в области плечевых, локтевых, лучезапястных, тазобедренных, коленных и голеностопных суставов, соединяя их линиями. Для унификации измерений авторами введена вертикаль через точку в плечевом суставе. В итоге формировался угол отведения (стрелка), величину которого и регистрировала программа (рис. 3).

Исследование проводили с использованием триальной версии статистического пакета прикладных программ Statgraphics, свободно распространяемой через интернет (www.statgraphics.com).



Подтверждение соответствия видеоассистированной методики на основе компьютерного зрения её целевому использованию получали с помощью статистической обработки исходных данных путем анализа рангового критерия знаков, t-критерия Стьюдента и построением в программе графика Блэнда – Альтмана. В качестве статистически значимого уровня принимали значения $p \leq 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Средняя амплитуда отведения в серии измерений КЗ с использованием «Артро-Про» составила $(178,90 \pm 0,63)^\circ$ (доверительный интервал надежности $p = 0,95$), в серии КГ тот же параметр зарегистрирован на уровне $(179,5 \pm 0,1)^\circ$ (доверительный интервал надежности $p = 0,95$).

Так как наблюдения являются парными (Paired Samples — по два измерения для каждого пациента), то при изучении отличий между двумя выборками проанализирована разность показателей. Среднее отличие показателей КЗ и КГ амплитуды отведения в двух группах измерений незначительно, оно составило $(-0,62 \pm 0,63)^\circ$ (доверительный интервал надежности $p = 0,95$) от минимума $-5,2^\circ$ до максимума 1° , причем единственное наблюдение с разницей показателей $5,2^\circ$ (более 5°) являлось «резко выделяющимся» (рис. 4, а).

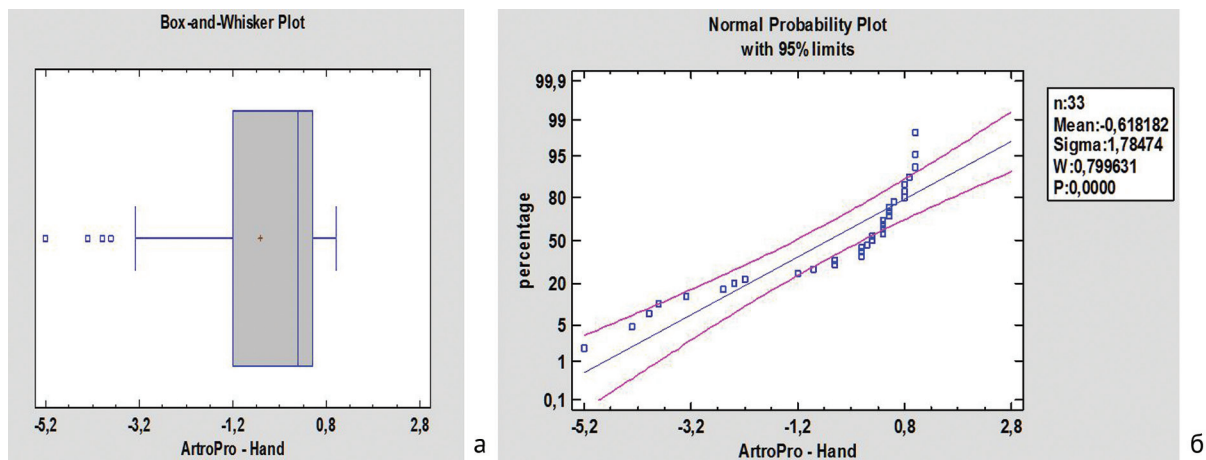


Рис. 4. Графический анализ разницы амплитуды отведения в плечевом суставе клинко-гониометрической серии и серии с использованием компьютерного зрения: а — «ящик с усами» (Box-and-Whisker Plot); б — график на нормальной вероятностной бумаге

Разница в показателях не распределена по нормальному закону (рис. 4, б), поэтому при сравнении показателей применяли два критерия — ранговый критерий знаков для проверки гипотезы, что медианы двух выборок равны, и критерий Стьюдента (для парных наблюдений) проверки гипотезы «средняя разница в измерениях углов отведения равна нулю». Оба критерия показали, что гипотезы верны на уровне значимости 0,05 (5 %), т. е. разница в медианах и в различиях средних двух выборок несущественна. Среднее значение разницы — это предполагаемая систематическая ошибка. Тем самым показано, что измерения методом КЗ не содержат систематической ошибки.

Мощным графическим инструментом для сравнения двух методов измерения и оценки согласованности между двумя наборами данных являются графики Блэнда – Альтмана [27]. Другое их название — разностные графики. Они представляют собой визуальное отображение разницы между двумя измерениями по оси Y и средним значением двух измерений по оси X. На рис. 5 представлен график Блэнда – Альтмана, построенный в Excel.

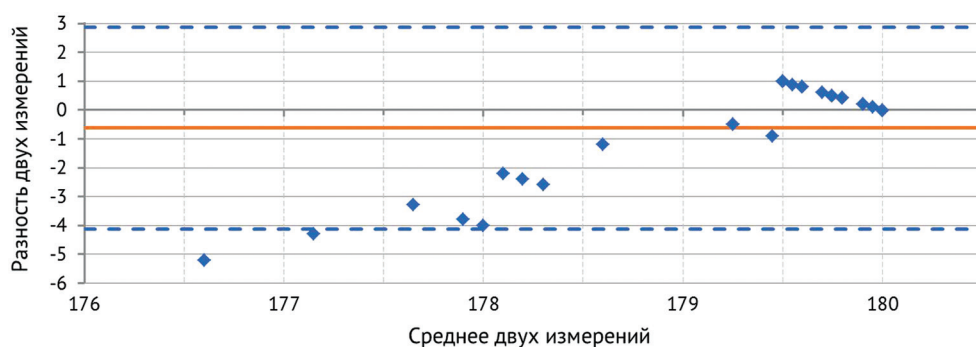


Рис. 5. График Блэнда – Альтмана

По оси Y отложена разница измерений КЗ и КГ, по оси X — полусумма $0,5 \times (КЗ + КГ)$. Горизонтальная линия в середине $Y = -0,62$ незначительно смещена относительно нуля и показывает, что средняя разница показателей незначительна. Пунктирные линии обозначают 95 %-е пределы согласия (limits of agreement) (средняя разница $\pm 1,96$ стандартных отклонений разницы), которые показывают, насколько сильно могут отличаться результаты измерений, полученных двумя методами, у большинства (95 %) людей. В нашем случае стандартное отклонение $SD = 1,78$ и пределы согласия $(-0,62 \pm 1,96) \times SD$ задают диапазон $(-4,11^\circ; 2,87^\circ)$. Разница в пределах, не превышающих 5° , не имеет клинического значения, поэтому два метода КЗ и КГ можно использовать взаимозаменяемо.

Проведено сравнение результатов измерений амплитуды отведения в плечевом суставе групп с использованием ручной (классической) гониометрии (КГ) и рентгенологического метода (R). В результате статистического исследования выявлено их существенное различие. Разница в измеренных двумя методами углах отведения колеблется в диапазоне от $-11,8$ до $22,7^\circ$, средняя разность составляет 6° [доверительный интервал надежности $p = 0,95$ для нее $(6 \pm 2,8)^\circ$]. Тем самым рентгенографический метод дает в среднем существенно заниженные показатели угла отведения (в среднем на 6° меньше). Кроме того, индивидуальные показатели оказались как занижены на $22,7^\circ$, так и завышены на $11,8^\circ$.

В связи с этим сравнение показателей угла отведения в плечевом суставе, измеренных с использованием компьютерного зрения и с помощью рентгенологического метода, не проводили.

ОБСУЖДЕНИЕ

Важным аспектом измерения угла отведения плечевого сустава является точность. Плечевой сустав — самый мобильный, его движения характеризуются многокомпонентностью. По А.И. Капанджи, первые 60° угла отведения реализуются преимущественно в плече-лопаточном суставе, затем с увеличением объема возрастает роль движений лопатки в акромиально-ключичном и грудино-ключичном сочленениях. Еще одним аспектом измерений является нулевое положение, на которое могут влиять мягкие ткани верхней конечности и туловища, а также сколиотическая деформация, которая может существенно изменять паттерн отведения. В условиях классической гониометрии одну браншу прикладывают параллельно позвоночнику, что в зависимости от его оси предположительно может исказить само измерение. Введенная в программу «Артро-Про» вертикаль через проекционную точку в плечевом суставе автоматически привязывается к шаблону на заднем фоне, нивелирует сколиотически обусловленные искажения. Данный аспект существенно влияет и на совместимость показателей сравниваемых методик (КГ – КЗ) [28–32].

В то же время существуют отличия и в проекционных точках для бранш гониометра и вертикалей КЗ. Очевидно, что проекции отличаются, обуславливая отличия значений угла отведения. Такие существенные различия в проекциях точек и явились причиной появления случаев, где значения выходили за пределы доверительного интервала. Вместе с тем, небольшой разброс средней разницы укладывается в общепризнанные критерии проведения измерений [1–3, 33–35].

Оценка результатов рентгенологических измерений угла отведения плечевого сустава позволяет выявить больший межквартальный разброс средней разницы по отношению к данным, полученным с помощью методик КЗ и КГ. Во многом это обусловлено системой самих рентгенологических измерений.

Первостепенным является определение оси ротации плеча, для чего используют линию, проведенную через центр головки плечевой кости и наружный надмыщелок плечевой кости. Тем не менее, ротация плечевой кости во время отведения, а также двухплоскостной формат рентгенологических изображений не дают возможности точно сопоставить оси ротации в исходном положении и при максимальном отведении верхней конечности. Поэтому возникла необходимость поиска новых ориентиров, которые локализовались бы точно и одновременно в двух положениях (исходное — максимальное). Таковыми явились нижний полюс гленоида и центр головки плечевой кости.

Следует отметить еще несколько причин, обуславливающих различия измеряемого параметра в сериях 1, 2 и 3. Одна из таких причин — меньшая амплитуда отведения при рентгенологическом формате исследования в сравнении с двумя другими сериями. Для рентгенографии требовалось зафиксировать руку как в исходном, так и в отведенном положениях на небольшой промежуток времени, что, особенно во втором положении, могло вызывать некоторое опущение верхней конечности. При этом выявлены наибольшие отклонения при сравнении углов отведения плечевого сустава (серии 1, 2, 3) у обследуемых с большей окружностью плеча.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Средняя разница углов отведения в сериях с использованием КЗ и КГ не выходит за пределы общепризнанных различий в 5° . Рентгенологическая оценка положения костей имеет особенности выбора проекционных точек для проведения измерений, которые влияют на показатели угла отведения.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что измерение амплитуды угла отведения плечевого сустава с использованием компьютерного зрения является валидным методом, который можно правомерно применять для гониометрических исследований в клинической практике.

Конфликт интересов. Авторы статьи заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Источник финансирования. Финансирование не предусматривалось.

Этические нормы. Исследование одобрено локальным этическим комитетом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный медицинский университет» Министрства здравоохранения Российской Федерации (протокол № 2022/149 от 21.10.2022 г.).

Информированное согласие. Все пациенты, участвовавшие в научной исследовании подписали добровольное информированное согласие на участие в клиническом исследовании.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гамбурцев В.А. Гониометрия человеческого тела. М.: Медицина, 1973:200.
2. Гереев А.М., Бондарук Е.В., Малахова И.С. и др. Исследование амплитуд движений в крупных суставах верхних и нижних конечностей и сочленениях позвоночника при использовании промышленных экзоскелетов. *Российский журнал биомеханики*. 2020;24(4):475-490. doi: 10.15593/RZhBiomeh/2020.4.06.
3. Глухих О.Н., Коломиец А.А. Биомеханика суставов конечностей. *Scientist*. 2020;4(14):14.
4. Агапов А.А., Небаба А.Н. Интеллектуальные системы захвата движений: виды, преимущества, применение. *Труды Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2019;(2):5-7.
5. Андреева Е.А., Кожеев Л.Г. Использование искусственных нейронных сетей в медицине. *Перспективы развития математического образования в эпоху цифровой трансформации: материалы II Всероссийской научно-практ. конф. (25-27 марта 2021 года, г. Тверь)*. Тверь: Тверской государственный университет; 2021:17-21.
6. Борзиков В.В., Рукина Н.Н., Воробьева О.В. и др. Видеоанализ движений человека в клинической практике (обзор). *Современные технологии в медицине*. 2015;7(4):201-210. doi: 10.17691/stm2015.7.4.26.
7. Бондарук Е.В., Меркулова А.Г., Калинина С.А. Возможность применения инерционных систем захвата движений для решения задач физиологии труда. *Медицина труда и промышленная экология*. 2020;60(11):734-737. doi: 10.31089/1026-9428-2020-60-11-734-737.
8. Аксенов А.Ю., Хит Г.Х., Клишкова Т.А., Долганова Т.И. Методология видеоанализа в диагностике нарушений локомоторной функции у детей с церебральным параличом при использовании ограниченного числа светоотражающих камер (обзор литературы). *Гений ортопедии*. 2019;25(1):102-110. doi: 10.18019/1028-4427-2019-25-1-102-110.
9. Горбунова А.В., Шмакова Я.В., Калугина О.Ф. и др. Использование методов компьютерного зрения и больших языковых моделей для проведения доклинических исследований. *Медицина*. 2024;12(3):55-68. doi: 10.29234/2308-9113-2024-12-3-55-68.
10. Горелов И.А., Немтинов В.А. Применение технологий компьютерного зрения при поиске патологий на рентгенограммах органов грудной клетки. *Восточно-европейский научный журнал*. 2016;(7, часть 2):6-13.
11. Гурий И.В. Системы видеоанализа движений человека. *Научный журнал «А POSTERIORI»*. 2022;12:120-122.
12. Гусейнов Д.И. Сравнительный анализ биомеханических показателей в системах маркерного и безмаркерного видеозахвата движений. *Доклады БГУИР*. 2023;21(1):35-42. doi: 10.35596/1729-7648-2023-21-1-35-42.
13. Иванова М.Д., Муравьев С.В., Клоян Г.З. и др. Системы захвата движений: медико-техническая оценка современного этапа развития технологии. Обзор литературы. *Спортивная медицина: наука и практика*. 2023;13(1):28-40. doi: 10.47529/2223-2524.2023.1.9.
14. Колесниченко О.Ю., Мартынов А.В., Пулит В.В. и др. Современный передовой уровень искусственного интеллекта для умной медицины. Ремедиум. *Журнал о российском рынке лекарств и медицинской технике*. 2019;(4):36-43. doi: 10.21518/1561-5936-2019-04-36-43.
15. Конурова А.С., Бикмуллина И.И. Исследование безмаркерной системы захвата движения. Известия Тульского государственного университета. *Технические науки*. 2023;(1):118-121. doi: 10.24412/2071-6168-2023-1-118-121.
16. Князь В.А. Оптическая система захвата движения для анализа и визуализации трехмерных процессов. *ГРАФИКОН 2015*. 2015:232-236.
17. Куимов В.Ю., Чикуров А.И., Бурмистров А.Д., Епишев В.В. Сравнительная характеристика оборудования при измерении биомеханических и кинематических характеристик спортсменов в циклических видах спорта. *Человек. Спорт. Медицина*. 2023;23(2):165-172. doi: 10.14529/hsm230220.
18. Hellsten T, Karlsson J, Shamsuzzaman M, Pulkkinen G. The Potential of Computer Vision-Based Marker-Less Human Motion Analysis for Rehabilitation. *Rehabil Process Outcome*. 2021 Jul 5;10:11795727211022330. doi: 10.1177/11795727211022330.
19. Moreira R, Fialho R, Teles AS, et al. A computer vision-based mobile tool for assessing human posture: A validation study. *Comput Methods Programs Biomed*. 2022 Feb;214:106565. doi: 10.1016/j.cmpb.2021.106565.
20. Лутохин А.С., Тычков А.Ю., Сотников А.М., Алимуратов А.К. Анализ систем захвата движения в среде виртуальной реальности. *Вестник Пензенского государственного университета*. 2021;(2):102-106.
21. Мавлютова И.Ф., Буторин А.В. Основные концепции принципа захвата движения лица. *Системный анализ и синтез моделей научного развития общества: Сборник по итогам Международной научно-практической (Саратов, 04 февраля 2021 г.)*. Стерлитамак: АМИ; 2021:58-59. Доступно по: <https://ami.im/sbornik/MNPK-320.pdf>. Ссылка активна на 17.06.2025.
22. Морозов С. П., Владимировский А.В., Ледихова Н.В. и др. Московский эксперимент по применению компьютерного зрения в лучевой диагностике: вовлеченность врачей-рентгенологов. *Врач и информационные технологии*. 2020;(4):14-23. doi: 10.37690/1811-0193-2020-4-14-23.
23. Нопин С.В., Копанев А.Н., Абуталимова С.М. Современные системы тестирования и анализа движений человека. *Современные вопросы биомедицины*. 2020;4(4):65-73.
24. Овезова Г.С. Исследование новых методов компьютерного зрения для распознавания объектов и обработки изображений. *Наука и мировоззрение*. 2024;1(19):40-45.
25. Пальмов С.В., Андрияшова О.О. Применение технологии MOTION-CAPTURE. *Индустриальная экономика*. 2023;2:134-137. doi: 10.47576/2949-1886_2023_2_134.
26. Debnath B. et al. A review of computer vision-based approaches for physical rehabilitation and assessment. *Multimedia Systems*. 2022;28:209-239. doi: 10.1007/s00530-021-00815-4.
27. Bland JM, Altman DG. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet*. 1986;1(8476):307-310.
28. Silva N, Zhang D, Kulvicius T, et al. The future of General Movement Assessment: The role of computer vision and machine learning - A scoping review. *Res Dev Disabil*. 2021;110:103854. doi: 10.1016/j.ridd.2021.103854.

29. Zhang M, Chen CH. Biomechanics of the Shoulder. In: Cheng CK, Woo SLY. (eds.). *Frontiers in Orthopaedic Biomechanics*. Singapore: Springer; 2020:131-145. doi: 10.1007/978-981-15-3159-0_6.
30. Funk L. Biomechanics of the Shoulder. In: Milano G, Grasso A, Brzóška R, Kovačič L. (eds.). *Shoulder Arthroscopy*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2023:17-32. doi: 10.1007/978-3-662-66868-9_2.
31. Li L, Ren F, Baker JS. The biomechanics of shoulder movement with implications for shoulder injury in table tennis: a minireview. *Appl Bionics Biomech*. 2021;2021:9988857. doi: 10.1155/2021/9988857.
32. Чирков Н.Н., Яковлев В.Н., Алексеева А.В. и др. Хирургическое лечение невосстановимых массивных повреждений вращательной манжеты плечевого сустава. *Гений ортопедии*. 2022;28(1):12-17. doi: 10.18019/1028-4427-2022-28-1-12-17.
33. Шейко Г.Е., Белова А.Н., Рукина Н.Н., Короткова Н.Л. Возможности применения биомеханических систем захвата движений человека в медицинской реабилитации (обзор). *Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация*. 2022;4(3):181-196. doi: 10.36425/rehab109488.
34. Шинелёв И.Н., Тарасов И.Е. Использование искусственных нейронных сетей в медицине. *Электронный научный журнал «ИТ-Стандарт»*. 2020;(4).
35. Щербанев А.Ю., Карпов Д.С., Бурханова Р.А. Обзор современных систем трехмерного моделирования движений человека. *Вестник современных исследований*. 2019;(3.13(30)):205-208.

Статья поступила 24.03.2025; одобрена после рецензирования 11.04.2025; принята к публикации 05.06.2025.

The article was submitted 24.03.2025; approved after reviewing 11.04.2025; accepted for publication 05.06.2025.

Информация об авторах:

Сергей Анатольевич Демкин — кандидат медицинских наук, старший преподаватель, smdem@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2914-5807>;

Анастасия Александровна Малякина — ассистент кафедры, amalyakina0320@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3703-6667>;

Сергей Алексеевич Ахрамович — генеральный директор, akhramovichsa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5790-2924>;

Олег Анатольевич Каплунов — доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры, volortho@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6634-4162>;

Ирина Евгеньевна Обраменко — доктор медицинских наук, доцент, доцент кафедры, custvol@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8677-9024>;

Ирина Эдуардовна Симонова — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры, simonova-vstu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6510-4789>.

Information about the authors:

Sergey A. Demkin — Candidate of Medical Sciences, Senior Lecturer, smdem@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2914-5807>;

Anastasia A. Malyakina — Assistant Professor, amalyakina0320@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3703-6667>;

Sergey A. Akhramovich — General Director, akhramovichsa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5790-2924>;

Oleg A. Kaplunov — Doctor of Medical Sciences, Professor, Professor of the Department, volortho@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6634-4162>;

Irina E. Obramenko — Doctor of Medical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department, custvol@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8677-9024>;

Irina E. Simonova — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department, simonova-vstu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6510-4789>.

Вклад авторов:

Демкин С.А. — существенный вклад в разработку концепции или дизайна исследования; сбор, анализ или интерпретация данных; написание текста рукописи или ее редактирование; утверждение окончательного варианта рукописи для публикации; согласие нести ответственность за все аспекты рукописи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

Малякина А.А. — существенный вклад в разработку концепции или дизайна исследования; сбор, анализ или интерпретация данных; написание текста рукописи или ее редактирование; утверждение окончательного варианта рукописи для публикации; согласие нести ответственность за все аспекты рукописи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

Ахрамович С.А. — утверждение окончательного варианта рукописи для публикации; согласие нести ответственность за все аспекты рукописи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

Каплунов О.А. — существенный вклад в разработку концепции или дизайна исследования; утверждение окончательного варианта рукописи для публикации; согласие нести ответственность за все аспекты рукописи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

Обраменко И.Е. — существенный вклад в разработку концепции или дизайна исследования; утверждение окончательного варианта рукописи для публикации; согласие нести ответственность за все аспекты рукописи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

Симонова И.Э. — написание текста рукописи или ее редактирование; утверждение окончательного варианта рукописи для публикации; согласие нести ответственность за все аспекты рукописи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

Научная статья

УДК 616.727.3-007.2-089.168.1-06:616-035:(616.71-089.85+616.71-089.227.84)

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-4-433-443>

Ошибки и осложнения при устранении посттравматических фронтальных деформаций локтевого сустава методом корригирующей надмыщелковой остеотомии аппаратом Илизарова

Ю.П. Солдатов✉, А.Н. Дьячков

Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии
имени академика Г.А. Илизарова, Курган, РоссияАвтор, ответственный за переписку: Юрий Петрович Солдатов, soldatov-up@mail.ru

Аннотация

Введение. Травматологи-ортопеды становятся сторонниками чрескостного остеосинтеза для устранения деформаций локтевого сустава благодаря его преимуществам, управляемости, мобильности и малоинвазивности. Однако работ, посвященных профилактике ошибок и осложнений при применении аппаратов внешней фиксации для восстановления биомеханической оси верхней конечности, представлено не достаточно.

Цель работы — выявить ошибки и осложнения при лечении больных с посттравматическими фронтальными деформациями локтевого сустава с применением аппарата Илизарова и определить рациональный алгоритм их устранения.

Материалы и методы. В исследование включены 68 пациентов с деформациями локтевого сустава во фронтальной плоскости в возрасте от 4 до 56 лет, прооперированные с 1990 по 2024 гг. Пациенты распределены на 2 группы (контрольная и основная). В контрольной группе (41 пациент, операции — до 2018 г.) восстановление оси конечности осуществляли одномоментно во время операции или постепенно в послеоперационном периоде дистракцией аппаратом Илизарова на вогнутой стороне деформации. С целью профилактики ошибок и осложнений с 2018 г. лечение больных данной патологии стали осуществлять по разработанному протоколу, содержащему последовательность выполнения манипуляций на этапах операции и в послеоперационном периоде, а также учитывающему временные факторы. Эти больные вошли в основную группу исследования (27 пациентов).

Результаты. Выявлены осложнения со стороны: биомеханики конечности (остаточная деформация, нарушение оси конечности); сустава (контрактуры); кости (оскольчатый характер остеотомии, наличие зубцов); регенерата (ишемический регенерат); нервов (краткосрочные и длительные нейропатии лучевого, локтевого нервов).

Обсуждение. Количество осложнений у больных основной группы было в семь раз меньше по сравнению с литературными данными, при этом общее количество осложнений после надмыщелковой остеотомии плечевой кости и остеосинтеза аппаратом Илизарова было ниже в 1,6 раза. Анализ ошибок и осложнений при лечении больных с посттравматическими фронтальными деформациями локтевого сустава с применением надмыщелковой остеотомии и аппарата Илизарова позволил определить рациональный алгоритм их устранения.

Заключение. Посредством корригирующей надмыщелковой остеотомии плечевой кости и управления аппаратом Илизарова возможно восстановить ось конечности и биомеханику локтевого сустава. Разработанный алгоритм лечения больных с деформациями локтевого сустава, содержащий строгую последовательность действий с временными факторами, снижает процент ошибок и осложнений в виде погрешностей в выполнении остеотомии, остаточной деформации, неудовлетворительного регенерата, контрактур и нейропатий в 6,3 раза.

Ключевые слова: локтевой сустав, деформация, варус, вальгус, надмыщелковая остеотомия, чрескостный остеосинтез, аппарат Илизарова, ошибки, осложнения

Для цитирования: Солдатов Ю.П., Дьячков А.Н. Ошибки и осложнения при устранении посттравматических фронтальных деформаций локтевого сустава методом корригирующей надмыщелковой остеотомии аппаратом Илизарова. *Гений ортопедии*. 2025;31(4):433-443. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-433-443.



Errors and complications with post-traumatic frontal deformities of the elbow joint corrected with supracondylar osteotomy with the Ilizarov apparatus

Yu.P. Soldatov✉, A.N. Dyachkov

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

Corresponding author: Yuri P. Soldatov, soldatov-up@mail.ru

Abstract

Introduction Transosseous osteosynthesis has the advantages of controllability, mobility and minimal invasiveness and is commonly used by trauma and orthopaedic surgeons for elbow deformity correction. There is a paucity of publications reporting errors and complications with external fixation devices used to restore the biomechanical axis of the upper limb.

The **objective** was to identify errors and complications in patients with post-traumatic coronal deformities of the elbow joint treated with the Ilizarov apparatus and to determine a rational algorithm for the prevention.

Material and methods The study included 68 patients with elbow deformities in the frontal plane. The patients age ranged from 4 to 56 years. The surgeries were performed between 1990 and 2024. Patients were divided into 2 groups: control and treatment. The control group included 41 patients who underwent correction surgery up to 2018. The limb was realigned either acutely or gradually post op through Ilizarov distraction produced on the concave side of the deformity. In order to prevent errors and complications, since 2018, patients with the condition have been treated according to a protocol developed to contain the sequence of intraoperative and postoperative manipulations taking into account time factors. These patients were included in the treatment group ($n = 27$).

Results Complications were identified in the limb biomechanics (residual deformity, disturbed limb axis); in the joint (contractures); in the bone (comminuted osteotomy, presence of teeth); in the bone regeneration (ischemic regenerate); in the nerves (short-term and long-term neuropathies of the radial and ulnar nerves).

Discussion The number of complications in patients of the treatment group was seven times less compared to literature data, while the total number of complications after supracondylar osteotomy of the humerus and Ilizarov fixation was 1.6 times lower. Review of errors and complications in the treatment of patients with post-traumatic frontal deformities of the elbow joint using supracondylar osteotomy and the Ilizarov fixation facilitated development of a rational algorithm for the correction.

Conclusion The limb axis can be realigned and biomechanics of the elbow joint restored with corrective supracondylar osteotomy of the humerus and manipulations with the Ilizarov apparatus. The algorithm developed for treatment of patients with elbow deformities suggested a strict sequence of actions with time factors, reducing errors and complications in the form of failures in performing osteotomy, residual deformity, poor regeneration, contractures and neuropathies by 6.3 times.

Keywords: elbow joint, deformity, varus, valgus, supracondylar osteotomy, transosseous osteosynthesis, Ilizarov apparatus, errors, complications

For citation: Soldatov YuP, Dyachkov AN. Errors and complications with post-traumatic frontal deformities of the elbow joint corrected with supracondylar osteotomy with the Ilizarov apparatus. *Genij Ortopedii*. 2025;31(4):433-443. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-433-443.

ВВЕДЕНИЕ

После травм верхней конечности часто возникают различные деформации, контрактуры, анкилозы, остеоартриты локтевого сустава, которые снижают качество жизни человека [1]. Варусная деформация локтевого сустава является частым осложнением переломов дистального отдела плечевой кости у детей [2, 3] и может приводить к дистрофическим изменениям кости во внутренней части его мыщелка [4]. Деформация нарушает ось конечности, направление силового воздействия трехглавой мышцы плеча, что обуславливает нестабильность локтевого сустава, компрессию суставных поверхностей и остеоартрит [4]. Все это является причиной хронического болевого синдрома локтевого сустава и ограничений функции верхней конечности [5]. При чрезмыщелковых и надмыщелковых переломах ростковая зона мыщелка плеча не остается нейтральной, образуется вальгусная деформация локтевого сустава [6].

При длительном существовании деформации локтевого сустава, обусловленной перенесенным чрезмыщелковым переломом плечевой кости, из-за нарушения оси конечности и смещения мыщелка плечевой кости во фронтальной плоскости в надмыщелковой зоне часто возникает штыкообразная деформация. Данная деформация в литературе описана как «надмыщелковый синдром» [7].

При изучении литературы, посвященной приобретенным деформациям локтевого сустава, выявлена огромная проблема по их устранению и реабилитации больных [8]. Причинами неудач являются недостаточная жесткость фиксации фрагментов костей после остеотомии и высокая травматичность операции (вскрытие полости сустава, повреждение его структур) [9].

Известны различные методы лечения больных с фронтальными деформациями: внутрисуставные и внесуставные корригирующие остеотомии, выбор которых определяется локализацией и степенью деформации плечевой кости [10], в том числе надмыщелковые [11, 12] поперечные, клиновидные и куполообразные [13].

Фиксацию кости осуществляют скелетным вытяжением или спицами Киршнера, однако из-за иммобилизации сустава часто образуются контрактуры. Поэтому при надмыщелковой остеотомии некоторые хирурги применяют внешнюю фиксацию стержнями Шанца [14] и погружную фиксацию наkostной пластиной [15, 16].

Травматологи-ортопеды становятся сторонниками применения чрескостного остеосинтеза для устранения деформаций локтевого сустава благодаря его преимуществам [8], — управляемости, мобильности и малоинвазивности. Однако работ, посвященных профилактике ошибок и осложнений при применении аппаратов внешней фиксации для восстановления биомеханической оси верхней конечности, представлено не достаточно.

Цель работы — выявить ошибки и осложнения при лечении больных с посттравматическими фронтальными деформациями локтевого сустава с применением аппарата Илизарова и определить рациональный алгоритм их устранения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование — ретроспективное, когортное, сплошное, одноцентровое. Характеристика статистической совокупности представлена в виде средних величин, — средней арифметической и стандартного отклонения ($\bar{X} \pm SD$).

Применены этические принципы, изложенные в Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» с соответствующими поправками. Имеются информированные согласия пациентов на публикацию полученных результатов исследования.

В исследование включены 68 пациентов с посттравматическими фронтальными деформациями локтевого сустава в возрасте от 4 до 56 лет, прооперированные с 1990 по 2024 гг. Больные поступили на лечение в сроки от 6 мес. до 15 лет после травмы. По месту жительства по поводу перелома им выполняли консервативное или оперативное лечение. Консервативное лечение было представлено закрытой репозицией костных фрагментов с фиксацией верхней конечности гипсовой повязкой или скелетным вытяжением, оперативное лечение — открытой репозицией, фиксацией плечевой кости различными металлоконструкциями или аппаратом Илизарова.

Для устранения деформаций локтевого сустава во фронтальной плоскости выполняли надмыщелковую остеотомию плечевой кости, остеосинтез аппаратом Илизарова (рис. 1).

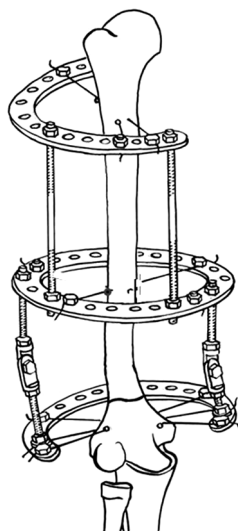


Рис. 1. Эскиз компоновки аппарата Илизарова в передне-задней проекции для коррекции деформации локтевого сустава во фронтальной плоскости с применением надмыщелковой остеотомии плечевой кости (например, для устранения варусной деформации локтевого сустава)

Пациенты, участвующие в исследовании, распределены на две группы (контрольная и основная). В контрольной группе (41 пациент, операции — до 2018 г.) восстановление оси конечности осуществляли одномоментно во время операции или постепенно в послеоперационном периоде, дистракцией аппаратом Илизарова на вогнутой стороне деформации. С целью профилактики ошибок и осложнений с 2018 г. лечение больных данной патологии стали осуществлять по разработанному алгоритму, содержащему последовательность выполнения манипуляций на этапах операции и в послеоперационном периоде, а также учитывающему временные факторы. Эти больные вошли в основную группу исследования (27 пациентов).

Алгоритм устранения посттравматических деформаций локтевого сустава с применением аппарата Илизарова

Операционный этап

— Проведение спиц через плечевую кость:

- проксимальный отдел — спицы с упорными площадками навстречу;
- средний отдел — в косо-сагиттальной (одна или две спицы);
- дистальный отдел — над ямкой локтевого отростка (три спицы, две из них с упорными площадками навстречу).

— Монтаж аппарата Илизарова:

- проксимальный отдел плечевой кости — удлиненное полукольцо;
- средний отдел или на границе среднего и дистального отделов — кольцо;
- дистальный отдел — удлиненное полукольцо, которое устанавливают с учетом деформации и соединяют с базой стержнями с шарнирами; плоскость шарниров ориентируют на плоскость деформации, оси вращения шарниров располагают на уровне предполагаемой остеотомии.

— Кортикотомия в надмыщелковой области плечевой кости с предварительной туннелизацией (шесть туннелей) на уровне предполагаемой кортикотомии.

Послеоперационный этап

— Начало дистракции:

- на четвертые сутки после операции — перевод компрессионных усилий на стержнях аппарата Илизарова в умеренные дистракционные; равномерная дистракция 1 мм в день за четыре приема в течение пяти дней.

— Послеоперационный контроль остеотомии:

- рентгенография сегмента в двух проекциях на пятые сутки после начала дистракции.

— Устранение деформации:

- дистракция на стержнях аппарата на вогнутой стороне деформации 1,5 мм в день за шесть приемов.

- Контроль качества регенерата и оси конечности:
 - рентгенография сегмента в двух проекциях каждые 10 дней distraction.
- Заключительная коррекция оси конечности:
 - одномоментное смещение дистального фрагмента кости по ширине аппаратом Илизарова (при необходимости) для заключительной коррекции оси конечности;
 - сравнительная рентгенометрия (сопоставление рентгенограммы оперированной руки с рентгенограммой контралатеральной конечности).
- Фиксация:
 - контроль регенерации один раз в месяц;
 - гимнастика сустава;
 - контроль distractionных усилий на distractionных стержнях аппарата Илизарова и натяжения спиц.

Общая характеристика пациентов с фронтальными деформациями локтевого сустава представлена в таблице 1. Наибольшее количество пациентов было с варусной деформацией локтевого сустава (89,9 %). У семи пациентов с вальгусной деформацией локтевого сустава диагностирован псевдоартроз головчатого возвышения плечевой кости.

Таблица 1

Общая характеристика пациентов с фронтальными деформациями локтевого сустава ($n = 68$)

Показатели		Контрольная группа ($n = 41$)		Основная группа ($n = 27$)	
		абс.	%	абс.	%
Пол	мужской	28	68,3	19	70,4
	женский	13	31,7	8	29,6
Возраст	4–17 лет	33	80,5	17	63,0
	18–56 лет	8	19,5	10	37,0
Данные ангулометрии:					
а) варусная деформация локтевого сустава:	Всего	34	82,9	21	77,8
	0°	7	17,1	3	11,1
	5–14°	8	19,5	9	33,3
	15–24°	10	24,4	5	18,5
	25–30°	9	22,0	4	14,8
б) вальгусная деформация локтевого сустава:	Всего	7	17,1	6	22,3
	30°	6	14,6	5	18,5
	45°	1	2,4	1	3,7
в) дефицит угла сгибания:	10–19°	4	9,8	1	3,7
	20–25°	3	7,3	3	11,1
г) дефицит угла разгибания:	5–14°	1	2,4	2	7,4
	15–20°	2	4,9	1	3,7
	30°	4	9,8	3	11,1
д) дефицит сгибания и разгибания:	5–20°	6	14,6	3	11,1
	25–55°	4	9,8	6	22,3
е) дефицит угла отсутствует		17	41,4	8	29,6
Данные рентгенографии:					
а) деформации дистального отдела плечевой кости:	варусная	34	82,9	21	77,8
	вальгусная	7	17,1	6	22,2
б) краевые костные разрастания суставных поверхностей		12	29,3	5	18,5
в) деформация и остеофиты ямки локтевого отростка		13	31,7	6	22,2
г) неравномерное сужение суставной щели		7	17,1	5	18,5
д) псевдоартроз головчатого возвышения плечевой кости		6	14,3	1	3,7

Пациенты три раза в день по 60 мин. выполняли гимнастику локтевого сустава на сгибание и разгибание, активно (собственной мышечной силой) и пассивно (с отягощением). Длительность устранения деформации у больных составила 10–36 дн. Фиксация плечевой кости аппаратом Илизарова — 21–84 дн.

У больных основной группы в процессе выполнения операции перед кортикотомией на уровне предполагаемой остеотомии в надмыщелковой зоне выполняли сквозную туннелизацию плечевой кости спицей с заточкой (шесть туннелей) (рис. 2). Это явилось профилактикой образования зубчатых

или оскольчатых костных фрагментов, которые затрудняли выполнение смещения фрагмента кости по ширине. При этом «зуб» фрагмента кости после устранения деформации располагался в мягких тканях, что приводило к болевому синдрому.

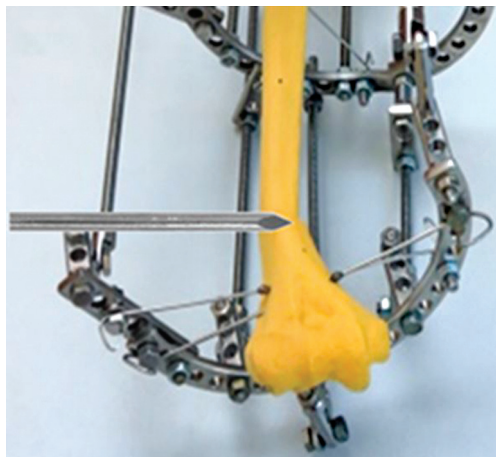


Рис. 2. Фото макета плечевой кости с аппаратом Илизарова для устранения фронтальной деформации локтевого сустава со спицей для туннелизации перед кортикотомией

На рис. 3 представлены последовательные рентгенограммы пациента основной группы 12 лет в процессе устранения посттравматической варусной деформации в послеоперационном периоде согласно алгоритму.

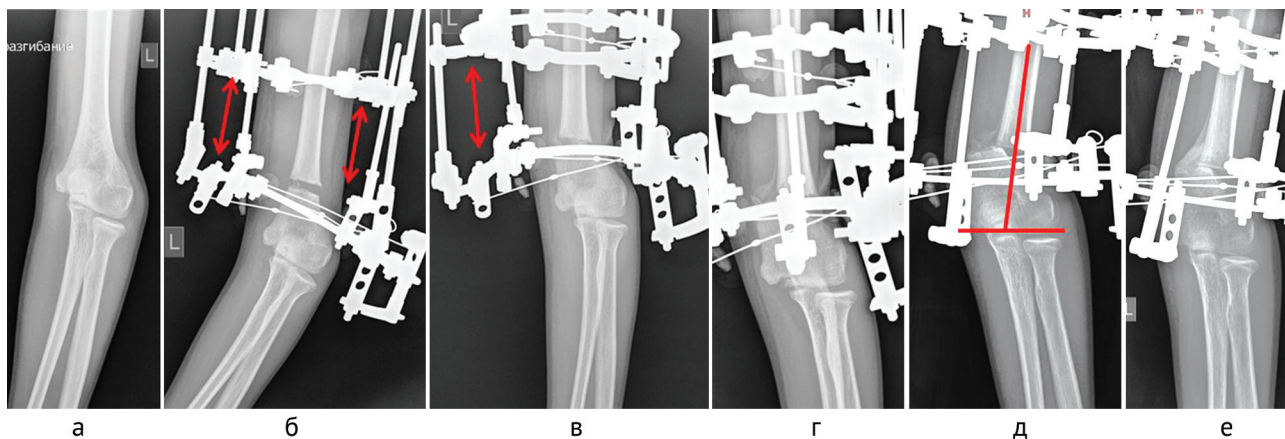


Рис. 3. Рентгенограммы локтевого сустава в прямой проекции пациента основной группы с посттравматической варусной деформацией локтевого сустава: а — до операции; б — на пятый день равномерной дистракции по 1 мм в день за четыре приема (высота диастаза — 5 мм, соответствует сроку дистракции); в — на 10-й день коррекции варусной деформации (дистракция по двум внутренним стержням 1,5 мм в день за шесть приемов); г — на 20-й день продолжения исправления деформации аппаратом Илизарова произведено одномоментное смещение дистального фрагмента кости кнаружи на 1,5 см для восстановления оси конечности, д — в день окончания коррекции деформации построены линии суставной поверхности мыщелка плечевой кости и оси плечевой кости для определения остаточной деформации (деформация устранена), е — 1 мес. фиксации плечевой кости аппаратом Илизарова

РЕЗУЛЬТАТЫ

У больных с посттравматическими деформациями локтевого сустава во фронтальной плоскости обеих групп выявлены четыре группы ошибок, которые привели к осложнениям различной категории сложности, на этапах: монтажа аппарата Илизарова в операционной; выполнения остеотомии; управления аппаратом Илизарова после остеотомии в операционной; управления аппаратом Илизарова в послеоперационном периоде (табл. 2).

Как видно из таблицы 3, данные ошибки приводили к осложнениям со стороны биомеханики конечности (остаточная деформация, нарушение оси конечности), сустава (контрактуры), кости (оскольчатый характер остеотомии, наличие зубцов), регенерата (ишемический регенерат), нервов (краткосрочные и длительные нейропатии лучевого, локтевого нервов).

Таблица 2

Группы ошибок, осложнения и их профилактика в процессе лечения больных с посттравматическими осевыми деформациями локтевого сустава

Группа ошибок	Характеристика	Возможные осложнения	Профилактические мероприятия
Монтаж аппарата Илизарова	Проведение спиц дистальнее ямки локтевого отростка плечевой кости	Контрактуры локтевого сустава	Спицы в дистальном отделе плеча следует проводить проксимальнее ямки локтевого отростка плечевой кости
	Установка кольца в дистальном отделе плеча		В дистальном отделе плеча необходимо установить полукольцо или незамкнутое кольцо для осуществления сгибания в локтевом суставе в процессе лечения
	Отсутствие шарнирных узлов, наклона коррекционных опор аппарата	Неполная коррекция деформации	Рекомендован монтаж шарнирных узлов с расположением плоскости их вращения в плоскости деформации, а их осей — на уровне предполагаемой кортикотомии. Следует соблюдать дистанцию между опорами с учетом предстоящего перемещения опор в процессе устранения деформации
Остеотомия	Применение остеотомии при измененной структуре кости	Оскольчатый характер остеотомии, наличие зубцов	Перед остеотомией необходимо выполнять туннелизацию, кортикотомию
Управление аппаратом Илизарова в операционной	Диастаз между остеотомированными фрагментами кости более 5 мм	Неудовлетворительная регенерация кости	Рекомендован контроль усилий на стержнях аппарата Илизарова
	Одномоментная коррекция при выраженных деформациях или множественных рубцах плеча	Нейропатии	Следует выполнять постепенную коррекцию деформации в послеоперационном периоде
Управление аппаратом Илизарова после операции	Нарушения темпа distraction	Неудовлетворительная регенерация кости	Требуется соблюдение рационального алгоритма устранения деформации
	Отсутствие контроля над состоянием регенерата, осью сегмента конечности	Остаточная деформация	
		Неправильная ось конечности	

Таблица 3

Распределение больных контрольной и основной групп по выявленным осложнениям

Осложнения	Контрольная группа (n = 41)		Основная группа (n = 27)		Всего (n = 68)	
	абс.	%	абс.	%	абс.	%
Оскольчатая, зубчатая форма костных фрагментов зоны остеотомии	3	7,3	—	—	3	4,4
Неполная коррекция деформации	6	14,6	2	7,4	8	11,8
«Штыкообразная» надмыщелковая деформация плечевой кости	4	9,8	—	—	4	5,9
Ишемический регенерат	6	14,6	—	—	6	8,8
Стойкие контрактуры локтевого сустава, длительностью более 6 мес.	6	14,6	—	—	6	8,8
Нейропатия лучевого, локтевого нервов	4	9,8	1	3,7	5	7,4
Итого	29	70,7	3	11,1	32	47,1

Оскольчатую, зубчатую форму костных фрагментов зоны остеотомии наблюдали у больных контрольной группы, когда кость была склерозирована, либо при погрешностях в процессе выполнения остеотомии (рис. 4).

Неполная коррекция деформации была обусловлена отсутствием сопоставления рентгенограммы в прямой проекции оперированной конечности с контралатеральной на последнем этапе управления деформации аппаратом Илизарова. В некоторых случаях отсутствовала линейная коррекция оси плечевой кости во фронтальной плоскости (смещение кости по ширине для соосности), что приводило к «штыкообразной» деформации дистального отдела плечевой кости.

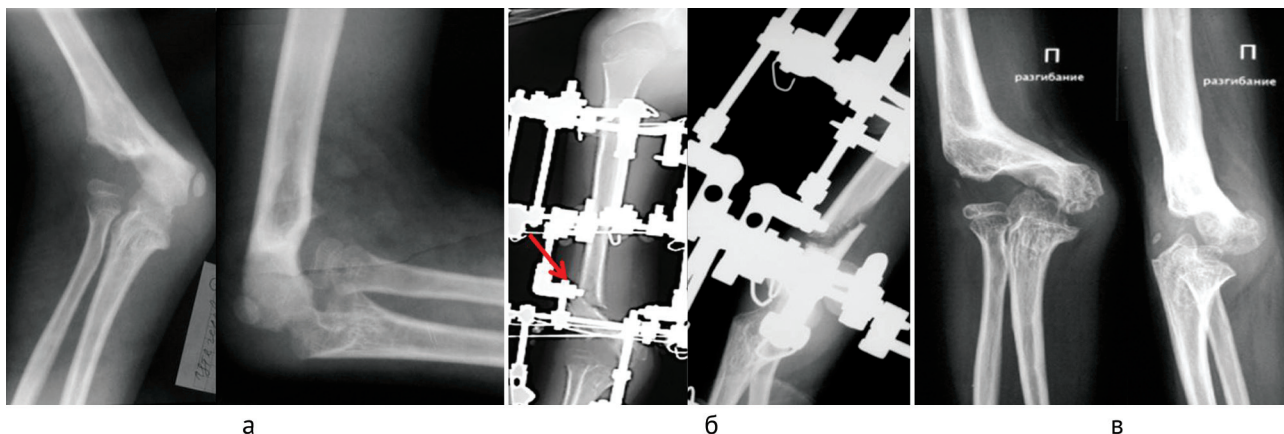


Рис. 4. Фото с рентгенограмм пациента контрольной группы 11 лет с посттравматической вальгусной деформацией правого локтевого сустава, дефектом латерального отдела мыщелка плечевой кости: а — до лечения; б — после надмыщелковой остеотомии плечевой кости и постепенного исправления вальгусной деформации локтевого сустава (фрагмент дистального отдела плечевой кости — зубчатый, располагается в мягких тканях (показан стрелкой)); в — через один год после демонтажа аппарата Илизарова (результат лечения — благоприятный, костный фрагмент деминерализован)

Слабую регенерацию кости наблюдали у шести пациентов контрольной группы после интраоперационной одномоментной коррекции деформации. У шести больных контрольной группы с вальгусной деформацией локтевого сустава и псевдоартрозом головчатого возвышения плечевой кости после остеосинтеза латерального надмыщелка плечевой кости и головчатого возвышения наблюдали резкое ограничение движений в суставе (рис. 5).

Нейропатии возникали у больных контрольной группы после одномоментной коррекции вальгусной деформации и были длительными (более 6 мес.). У одного больного с варусной деформацией локтевого сустава основной группы кратковременная (1 мес.) нейропатия вызвана компрессией локтевого нерва спицей, спица удалена в первые сутки после операции.

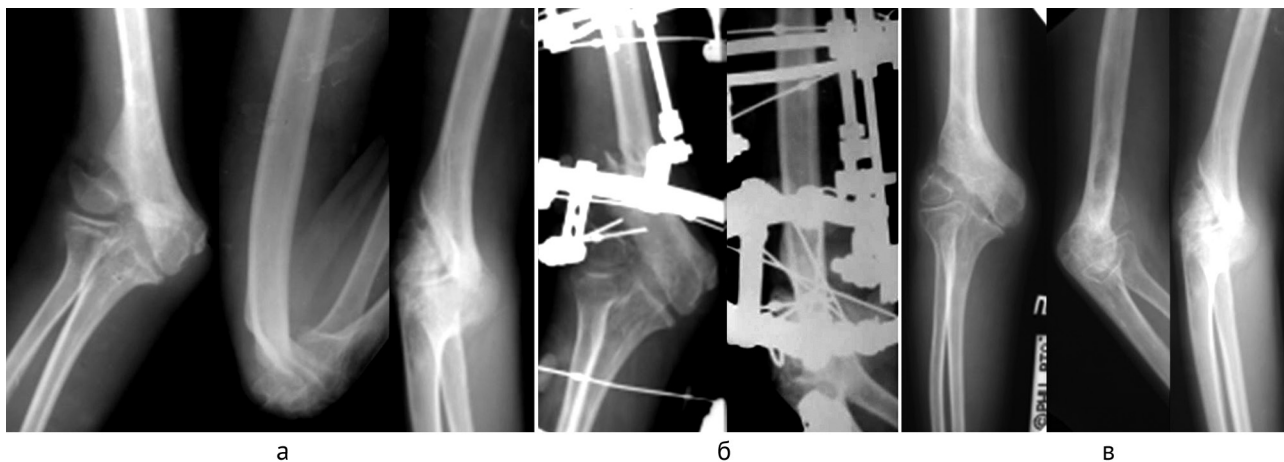


Рис. 5. Фото с рентгенограмм пациента контрольной группы 13 лет с посттравматической вальгусной деформацией правого локтевого сустава, псевдоартрозом головчатого возвышения: а — до лечения, в прямой и боковой (с максимальным сгибанием и разгибанием предплечья) проекциях; б — после надмыщелковой остеотомии плечевой кости, остеосинтеза аппаратом Илизарова с фиксацией головчатого возвышения консольными спицами, в прямой и боковой (с максимальным разгибанием) проекциях; в — после демонтажа аппарата Илизарова, в прямой и боковой (с максимальным сгибанием и разгибанием предплечья) проекциях

ОБСУЖДЕНИЕ

Травматологами и ортопедами признано, что оптимальным методом лечения больных с фронтальными деформациями локтевого сустава является оперативный с применением надмыщелковой остеотомии. Однако, по данным литературы [16], у больных с вальгусной деформацией локтевого сустава после поперечной остеотомии происходит исправление оси конечности, но образуется дефект костной ткани в области остеотомии, требующий его замещения. Это приводит к необходимости выполнения

дополнительной операции (подготовка аутокости, заполнение дефекта биоматериалом), что усложняет и повышает стоимость оперативного лечения. При варусных деформациях локтевого сустава проблема аналогичная, — производят расширение операционной раны, повышается травматичность. Клиновидная и дугообразная (шарнирная) остеотомии могут приводить к укорочению конечности и препятствовать смещению дистального фрагмента плечевой кости по ширине для восстановления соосности фрагментов кости. В результате остеоартрит локтевого сустава прогрессирует и в процессе роста ребенка возникает рецидив деформации сустава. Частота осложнений при куполообразной корригирующей надмыщелковой остеотомии плечевой кости составляет 14,5 % [17]. Общий риск развития различных осложнений после остеотомий, по литературным данным, составляет 14,5 % [17].

Данные проблемы решаются проведением поперечной кортикотомии с чрескостным компрессионно-дистракционным остеосинтезом и дальнейшей коррекцией деформации аппаратом Илизарова. Данная методика применена у всех анализируемых 68 больных.

В литературе описываются случаи недостаточной коррекции деформации, ее рецидива. В группе больных с фиксацией пластиной чаще наблюдают недостаточную коррекцию, требующую дополнительной операции [12]. Варусная деформация из-за латерального выступающего мыщелка плеча может сохраняться после остеотомии в случаях, когда дистальный фрагмент недостаточно смещается для соосности [18, 19, 20]. Данное осложнение практически отсутствует при применении алгоритма устранения деформации аппаратом Илизарова, согласно которому производят одномоментное смещение фрагмента кости по ширине.

Как отмечают авторы, после остеотомий возможно несращение кости [12]. Замедленную консолидацию зоны надмыщелковой остеотомии плечевой кости наблюдали у больных с варусной деформацией локтевого сустава, которым после остеотомии выполнен остеосинтез Y-образной пластиной [20]. По нашим данным, нарушение регенерации происходит после интраоперационной одномоментной коррекции деформации (8,8 % больных контрольной группы).

Частыми причинами контрактур локтевого сустава, встречающимися у 4,72 % пациентов [21], являются рассечение трицепса при осуществлении оперативных доступов и остеосинтез фрагментов мыщелка плечевой кости при псевдоартрозах. Поэтому необходим щадящий подход к паратрицепсу [13, 24, 25], а вопрос о целесообразности остеосинтеза латерального отдела мыщелка плечевой у больных с его несращением и вальгусной деформацией локтевого сустава после остеотомии кости остается спорным из-за аваскулярного некроза фрагмента после остеосинтеза [24, 25, 26]. На наш взгляд, целесообразным является временный остеосинтез несрастающегося фрагмента на период устранения деформации.

В литературе имеются сведения об интраоперационных повреждениях локтевого и лучевого нервов [24], которые наблюдали у 2,53 % больных, хотя в 78,4 % случаев повреждение было временным [17]. Часто нейропатия локтевого нерва возникает при вальгусной деформации локтевого сустава, когда внутренний надмыщелок плечевой кости смещается относительно локтевого отростка и происходит сужение борозды локтевого нерва [26]. При заднем операционном доступе к плечевой кости с разделением трицепса наблюдали высокую частоту параличей нервов по сравнению с латеральным доступом с сохранением трицепса [12].

Частота инфекционных осложнений после операций у больных с деформациями локтевого сустава составляет 9,45 % [21]. У анализируемых в статье больных инфекционных осложнений мягких тканей и костей не было.

Данные осложнений больных анализируемых групп и обобщенные литературные данные при коррекции деформаций и замещении дефектов методом несвободной костной пластики с применением аппарата Илизарова [27] представлены в таблице 4. Количество нежелательных событий по возникновению осложнений у анализируемых больных в основной группе было в семь раз меньше по сравнению с литературными данными. При этом общее количество осложнений после применения надмыщелковой остеотомии плечевой кости и остеосинтеза аппаратом Илизарова по сравнению с обобщенными данными было меньше в 1,6 раза.

Благодаря большому опыту лечения больных с применением аппарата Илизарова все осложнения являются прогнозируемыми и устранимыми при их своевременном выявлении и не влияют на конечный результат лечения [28, 29]. Имеется тенденция к снижению ошибок и осложнений по мере накопления индивидуального и коллективного опыта применения аппарата Илизарова [30], поэтому дальнейшее применение данного метода является целесообразным и перспективным.

Таблица 4

Нежелательные события и серьезные нежелательные события у больных с деформациями и дефектами длинных трубчатых костей, пролеченных с применением аппарата Илизарова (данные литературы [28] и собственные данные)

Осложнения	Данные литературного источника (n = 2242)		Собственные данные 68 (наблюдений)			
			контрольная группа (n = 41)		основная группа (n = 27)	
	абс.	%	абс.	%	абс.	%
Нежелательные события	588	26,23	10	24,4	1	3,7
Воспаление мягких тканей около спиц	258	11,51	–	–	–	–
Контрактуры	152	6,78	6	14,6	–	–
Неврологические расстройства	111	4,95	4	9,8	1	3,7
Прорезывание мягких тканей вокруг спиц	31	1,38	Не учитывали			
Переломы спиц/стержней	18	0,80	–	–	–	–
Дерматит	11	0,50	–	–	–	–
Повреждение сосудов	7	0,31	–	–	–	–
Серьезные нежелательные события	15	0,67	–	–	–	–
Остеомиелит	14	0,62	–	–	–	–
Летальный исход	1	0,05	–	–	–	–

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ ошибок и осложнений при лечении больных с посттравматическими фронтальными деформациями локтевого сустава с применением надмыщелковой остеотомии и аппарата Илизарова позволил определить рациональный алгоритм их устранения. Выполнение надмыщелковой остеотомии плечевой кости с остеосинтезом и управлением аппаратом Илизарова приводит к восстановлению анатомической и биомеханической осей конечности. Разработанный алгоритм лечения больных с деформациями локтевого сустава, содержащий строгую последовательность действий с временными факторами, снижает процент ошибок и осложнений в виде погрешностей в выполнении остеотомии, остаточной деформации, неудовлетворительной костной регенерации, контрактур и нейропатий в 6,3 раза.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Не заявлен.

Этические нормы. Исследование выполнено в соответствии с Хельсинкской декларацией.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Chen YC, Lin KC, Yeh SH, et al. Associations among quality of life, activities, and participation in elderly residents with joint contractures in long-term care facilities: a cross-sectional study. *BMC Geriatr.* 2022;22(1):197. doi: 10.1186/s12877-022-02870-6.
- Duffy S, Flannery O, Gelfer Y, Monsell F. Overview of the contemporary management of supracondylar humeral fractures in children. *Eur J Orthop Surg Traumatol.* 2021;31(5):871-881. doi: 10.1007/s00590-021-02932-2.
- Spiegel DA, Banskota B. Management of Upper Extremity Fractures. In: Gosselin RA, Spiegel DA, Foltz M. (eds.) *Global Orthopedics*. Springer International Publ.; 2020:271-292. doi:10.1007/978-3-030-13290-3_27.
- Мельцин И.И., Афуков И.В., Котлубаев Р.С. и др. Варусная деформация локтевого сустава у детей после неустраненных ротационных смещений при переломах дистального отдела плечевой кости. *Детская хирургия.* 2016;20(2):87-91. doi: 10.18821/1560-9510-20-2-87-91.
- Зоря В.И., Бабовников А.В. *Повреждения локтевого сустава*. М.: Геотар-Медиа; 2010:120-123.
- Нурмуханова И.К., Гильманов Р.И., Петрова К.А. и др. Клиническая и лучевая диагностика у ребенка прогрессирующей вальгусной деформации локтевого сустава после неосложненного перелома головочки мыщелка плечевой кости. *REJR.* 2020;10(1):284-288. doi:10.21569/2222-7415-2020-10-1284-288.
- Хужаназаров И.Э., Ходжанов И.Ю. Посттравматическая варусная деформация локтевого сустава у детей и подростков и ее лечение. *Травматология и ортопедия России.* 2008;(1):12-14.
- Субанбеков Э. Обоснование исследования проблемы посттравматических деформации чрезмыщелковых и надмыщелковых переломов плечевой кости у детей. *Синергия наук.* 2018;(21):325-334. URL: <https://synergy-journal.ru/archive/article1973>.
- Хужаназаров И., Ходжанов И. Основные тенденции при лечении посттравматических деформаций локтевого сустава у детей (обзор литературы). *Гений ортопедии.* 2015;(1):75-83. URL: <https://www.ilizarov-journal.com/jour/article/view/2123/2150>.
- Бондаренко С.С., Попсуйшапка А.К., Мезенцев А.А. Реконструктивно-восстановительные операции при сложных деформациях крупных суставов. *Ортопедия, травматология и протезирование.* 1998;(3):125-126.
- Тер-Егизаров, Г.М., Миронов С.П. Оперативное лечение посттравматических контрактур и анкилозов локтевого сустава у детей и подростков. *Ортопедия, травматология и протезирование.* 1980;(1):36-41.
- Raney EM, Thielen Z, Gregory S, Sobralske M. Complications of supracondylar osteotomies for cubitus varus. *J Pediatr Orthop.* 2012;32(3):232-240. doi: 10.1097/BPO.0b013e3182471d3f.
- Gurung YP, Pokharel S, Bhusal R, et al. Effectiveness of supracondylar dome osteotomy in reducing lateral condylar prominence and enhancing functional outcomes in pediatric cubitus varus: a retrospective study. *BMC Musculoskelet Disord.* 2025;26(1):128. doi: 10.1186/s12891-025-08387-4.

14. Slongo T. Treatment of posttraumatic cubitus varus in children and adolescents. Supracondylar humeral osteotomy using radial external fixation. *Oper Orthop Traumatol*. 2015;27(3):194-209. (In German) doi: 10.1007/s00064-015-0403-y.
15. Субанбеков Э.М. Результаты лечения посттравматических деформаций чрез -, надмыщелковых переломов плечевой кости у детей. *Синергия Наук*. 2018;(23). URL: <https://synergy-journal.ru/archive/article2407>.
16. Субанбеков Э.М. Выбор оптимальной методики корригирующей остеотомии при старых деформациях надмыщелковой области плечевой кости у пациентов детского возраста. *Синергия Наук*. 2018;(21):315-324. URL: <https://synergy-journal.ru/archive/article1972>.
17. Solfelt DA, Hill BW, Anderson CP, Cole PA. Supracondylar osteotomy for the treatment of cubitus varus in children: a systematic review. *Bone Joint J*. 2014;96-B(5):691-700. doi: 10.1302/0301-620X.96B5.32296.
18. Bauer AS, Pham B, Lattanza LL. Surgical Correction of Cubitus Varus. *J Hand Surg Am*. 2016;41(3):447-452. doi: 10.1016/j.jhsa.2015.12.019.
19. Greenhill DA, Kozin SH, Kwon M, Herman MJ. Oblique Lateral Closing-Wedge Osteotomy for Cubitus Varus in Skeletally Immature Patients. *JBJS Essent Surg Tech*. 2019;9(4):e40.1-e40.8. doi: 10.2106/JBJS.ST.18.00107.
20. Kim JR, Moon YJ, Wang SI. Translation step-cut osteotomy for posttraumatic Cubitus Varus in adults: a retrospective study. *BMC Musculoskelet Disord*. 2020;21(1):820. doi: 10.1186/s12891-020-03845-7.
21. Hoffman B, Lee A, DiGiacomo D, et al. A systematic review of the operative techniques for treating cubitus varus deformity in children. *J Pediatr Orthop B*. 2024;33(6):590-599. doi: 10.1097/BPB.0000000000001167.
22. Ali AM, Abouelnas BA, Elgohary HS. Dome osteotomy using the paratricipital (triceps-sparing) approach for cubitus varus deformity in children: a surgical technique to avoid lateral condylar prominence. *J Pediatr Orthop B*. 2016;25(1):62-68. doi: 10.1097/BPB.0000000000000205.
23. Banerjee S, Sabui KK, Mondal J, et al. Corrective dome osteotomy using the paratricipital (triceps-sparing) approach for cubitus varus deformity in children. *J Pediatr Orthop*. 2012;32(4):385-393. doi: 10.1097/BPO.0b013e318255e309.
24. Eamsobhana P, Kaewpornawan K. Should we repair nonunion of the lateral humeral condyle in children? *Int Orthop*. 2015;39(8):1579-1585. doi: 10.1007/s00264-015-2805-8.
25. Abed Y, Nour K, Kandil YR, El-Negery A. Triple management of cubitus valgus deformity complicating neglected nonunion of fractures of lateral humeral condyle in children: a case series. *Int Orthop*. 2018;42(2):375-384. doi: 10.1007/s00264-017-3709-6.
26. Уринбаев П.У., Давилов Ш.М., Уринбаев И.П. Эффективность оперативного лечения псевдоартрозов наружного мыщелка плечевой кости у детей комбинированными методиками костнопластических операций с применением аппарата Илизарова. *Гений ортопедии*. 2024;30(1):46-58. doi: 10.18019/1028-4427-2024-30-1-46-58.
27. Солдатов Ю.П., Стогов М.В., Овчинников Е.Н. и др. Аппарат внешней фиксации конструкции Г.А. Илизарова. Оценка клинической эффективности и безопасности (обзор литературы). *Гений ортопедии*. 2019;25(4):588-599. doi: 10.18019/1028-4427-2019-25-4-588-599.
28. Sella EJ. Prevention and management of complications of the Ilizarov treatment method. *Foot Ankle Spec*. 2008;1(2):105-107. doi: 10.1177/1938640008315349.
29. Dahl MT, Gulli B, Berg T. Complications of limb lengthening. A learning curve. *Clin Orthop Relat Res*. 1994;(301):10-18.
30. Slomka R. Complications of ring fixators in the foot and ankle. *Clin Orthop Relat Res*. 2001;(391):115-122. doi: 10.1097/00003086-200110000-00012.

Статья поступила 03.04.2025; одобрена после рецензирования 15.04.2025; принята к публикации 05.06.2025.

The article was submitted 03.04.2025; approved after reviewing 15.04.2025; accepted for publication 05.06.2025.

Информация об авторах:

Юрий Петрович Солдатов — доктор медицинских наук, профессор, ведущий научный сотрудник, врач — травматолог-ортопед, soldatov-up@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2499-3257>;

Александр Николаевич Дьячков — доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник, naucaalex@mail.ru.

Information about the authors:

Yuri P. Soldatov — Doctor of Medical Sciences, Professor, Leading Researcher, orthopaedic surgeon, soldatov-up@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2499-3257>;

Alexander N. Diachkov — Doctor of Medical Sciences, Professor, Chief Researcher, naucaalex@mail.ru.

Вклад авторов:

Солдатов Ю.П. — проведение процесса исследования, анализ, подготовка работы к публикации.

Дьячков А.Н. — подготовка работы к публикации, редактирование статьи.

Научная статья

УДК 616.727.4-007.248-076:612.086

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-4-444-451>



Гистологические проявления остеоартроза запястья в зависимости от давности и тяжести заболевания

Н.А. Щудло, Т.А. Ступина✉, Ш.К. Куттыгул

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. Возможности медицинской визуализации изменений суставного хряща и субхондральной кости при остеоартрозе запястья ограничены, гистологическим исследованиям посвящены единичные публикации.

Цель работы — определение взаимосвязей гистологических оценок остеоартроза запястья с давностью и стадией SLAC / SNAC синдрома.

Материал и методы. Исследован операционный материал 12 пациентов, которым выполнены резекция проксимального ряда костей запястья либо удаление ладьевидной кости с межзапястным артротомом. У девяти пациентов давность заболевания — менее четырех лет, у трёх — от 10 до 22 лет. Стадия I SLAC / SNAC синдрома выявлена у двух пациентов, стадия II — у шести, стадия III — у четырёх. Изменения хряща оценены по международной шкале OARSI, распространённость некроза субхондральной кости определена полуколичественно (от 0 до 3 баллов) в 3–10 полях зрения микроскопа от каждого пациента.

Результаты. При давности заболевания менее четырех лет ($n = 9$) оценка OARSI варьировала от 1–2 до 5, при давности от 10 до 22 лет — от 3–4 до 4–5. Оценка остеонекроза в сравниваемых подгруппах составила 3 (2÷3)(0–3) и 3 (2÷3)(2–3), $p = 0,11$. При SLAC / SNAC стадии I вариативность оценок OARSI — от 1–2 до 4, при стадии II — от 2 до 4–5, при стадии III — от 3–4 до 5. Оценка остеонекроза в сравниваемых подгруппах была 2 (1÷2)(1–3), 3 (2÷3)(1–3) и 3 (2÷3)(0–3) ($P^{1-2} = 0,03$; $P^{2-3} = 0,62$; $P^{1-5} = 0,02$).

Обсуждение. SLAC / SNAC синдром может иметь два типа течения, — прогрессирующий и стагнирующий. При втором типе заболевание долго протекает бессимптомно. Независимо от причины SLAC / SNAC синдрома у всех пациентов остеоартроз запястья сопровождается необратимым остеонекрозом субхондральной кости и костного мозга, что, вероятно, отражает степень острых либо хронических повреждений питающих кость сосудов.

Заключение. При общей тенденции больших дегенеративных изменений суставного хряща при большей стадии SLAC / SNAC синдрома их гистологическая оценка межиндивидуально варьирует на каждой стадии. Остеонекроз субхондральной кости более распространён при SLAC / SNAC стадий II–III, чем стадии I.

Ключевые слова: SLAC / SNAC синдром, остеоартроз запястья, хрящ, субхондральная кость, гистология

Для цитирования: Щудло Н.А., Ступина Т.А., Куттыгул Ш.К. Гистологические проявления остеоартроза запястья в зависимости от давности и тяжести заболевания. *Гений ортопедии*. 2025;31(4):444–451. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-444-451.

Original article

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-4-444-451>



Histological manifestations of wrist osteoarthritis and their dependence on the duration and severity of the disease

N.A. Shchudlo, T.A. Stupina✉, Sh.K. Kuttygul

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

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

Abstract

Introduction The possibilities of medical visualization of changes in the articular cartilage and subchondral bone in wrist osteoarthritis are limited. There are few studies devoted to its histological manifestations.

The **purpose** of the work was to determine the relationships between histological features of wrist osteoarthritis and the duration and stage of SLAC / SNAC syndrome.

Material and methods The surgical material of 12 patients who underwent resection of the proximal row of wrist bones or removal of the scaphoid bone and intercarpal arthrodesis was studied. In nine patients, the duration of the disease was shorter than four years and in three it was from 10 to 22 years. Stage I SLAC / SNAC syndrome was detected in two patients, stage II — in six, stage III — in four. Cartilage changes were assessed using the international OARSI scale, the prevalence of subchondral bone necrosis was determined semi-quantitatively (from 0 to 3 points) in 3–10 fields of microscopic views of the from each patient.

Results The OARSI score varied from 1–2 to 5 points if the duration of the disease was shorter than four years and from 3–4 to 4–5 points if it continued from 10 to 22 years. The osteonecrosis score in the compared subgroups was 3 (2÷3)(0–3) and 3 (2÷3)(2–3), $p = 0.11$. In SLAC / SNAC stage I, the OARSI score variability ranges from 1–2 to 4, in stage II — from 2 to 4–5, in stage III — from 3–4 to 5. The osteonecrosis score in the compared subgroups was 2 (1÷2)(1–3), 3 (2÷3)(1–3), and 3 (2÷3)(0–3) ($P^{1-2} = 0.03$; $P^{2-3} = 0.62$; $P^{1-3} = 0.02$).

Discussion The SLAC / SNAC syndrome can be of two types, progressive and stagnant. In the second type, the disease is asymptomatic for a long time. Regardless of the cause of SLAC / SNAC syndrome, all patients with wrist osteoarthritis experience irreversible osteonecrosis of the subchondral bone and bone marrow, which probably reflects the degree of acute or chronic damage to the vessels that feed the bone.

Conclusion With a general tendency for greater degenerative changes in the articular cartilage at a higher stage of SLAC / SNAC syndrome, their histological manifestations vary between individuals at each stage. Osteonecrosis of the subchondral bone is more common in SLAC / SNAC stages II–III than in stage I.

Ключевые слова: SLAC / SNAC syndrome, wrist osteoarthritis, articular cartilage, subchondral bone, histology

For citation: Shchudlo NA, Stupina TA, Kuttygul ShK. Histological manifestations of wrist osteoarthritis and their dependence on the duration and severity of the disease. *Genij Ortopedii*. 2025;31(4):444-451. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-444-451.

ВВЕДЕНИЕ

Запястье состоит из восьми небольших костей и множества сочленений между ними, которые легко травмируются, и является компонентом одного из самых сложных суставов человеческого тела, — лучезапястного, обеспечивающего разнонаправленные движения кисти относительно предплечья [1].

Наиболее частые повреждения, которые приводят к посттравматическому остеоартрозу запястья, — разрывы ладьевидно-полулунной связки либо несращения переломов ладьевидной кости с последующим развитием прогрессирующего коллапса запястья, соответственно SLAC и SNAC синдромов (англ.: scapholunate advanced collapse & scaphoid nonunion advanced collapse) [2]. Как свидетельствуют обзоры литературы, повреждения ладьевидно-полулунной связки нередко сочетаются с переломами лучевой или ладьевидной костей либо другими травмами запястья [3]. Повреждения ладьевидно-полулунной связки могут возникать вторично при кристаллических артропатиях [4]. Наряду с травмами нелеченные идиопатические аваскулярные остеонекрозы полулунной и ладьевидной костей (болезнь Кинбека и болезнь Прайзера) также могут привести к прогрессирующему коллапсу и остеоартрозу запястья [5].

Общий фактор развития SLAC и SNAC синдромов — нестабильность ладьевидной кости. Поэтому они проявляются схожей и предсказуемой последовательностью дегенеративных изменений суставов запястья [6–10], значимых клинически, так как вызывают боли при нагрузках и в покое, уменьшение объёма движений и силы кистевого схвата. Диагноз и прогрессирование заболевания уточняют рентгенологически, методами компьютерной и магнитно-резонансной томографии [6, 11], а также при артроскопии [12].

Гистологическим характеристикам остеоартроза запястья посвящены единичные исследования, в которых установлены значимые корреляционные связи деструктивно-дистрофических изменений псевдоартрозной поверхности ладьевидной кости с давностью травмы, гипертрофии ворсинок синовиального слоя капсулы кистевого сустава с выраженностью контрактуры, остеонекрозов в ладьевидной кости с интенсивностью боли [13]. В последние годы боль при остеоартрозе ассоциируется с повреждениями костного мозга субхондральной кости [14]. Это даёт основание для продолжения исследований гистологических характеристик остеоартроза запястья, что необходимо для понимания патогенеза заболевания и разработки тактики лечения.

Цель работы — определение взаимосвязей гистологических оценок остеоартроза запястья с давностью и стадией SLAC / SNAC синдрома.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследован операционный материал от 12 пациентов (10 мужчин и две женщины), прооперированных в 2023–2024 гг. по поводу остеоартроза запястья. Пациентам выполнены резекция проксимального ряда костей запястья либо четырёхсторонний артродез.

Возраст пациентов на момент операции варьировал от 20 до 65 лет ($41,50 \pm 15,88$), возраст в момент травмы или появления первых симптомов заболевания — от 17 до 64 лет ($35,86 \pm 17,04$).

Травмы в анамнезе были у 10 (83 %) пациентов: у восьми — низкоэнергетическая (падение с высоты роста с упором на кисть), у двух — высокоэнергетическая (ДТП у одного и удар мячом в спорте у другого), два пациента травму отрицали. Давность с момента травмы либо появления болевого синдрома в случае отрицания травмы варьировала от восьми месяцев до 22 лет ($5,64 \pm 7,6$).

У четырёх (33 %) пациентов диагностирован SLAC синдром, у остальных восьми — SNAC синдром. По данным лучевых медов исследования, остеоартроз первой стадии по классификациям Vender et al., Watson and Ballet [7, 15] выявлен у двух пациентов, второй — у шести и третьей — у четырёх. На основании рентгенометрических показателей у 10 (83 %) пациентов выявлена деформация DISI (нестабильность вставочного интеркалярного сегмента).

Исследование проведено в соответствии с этическими стандартами Хельсинской декларации 2013 г. и одобрено этическим Комитетом учреждения (протокол от 07.10.2022 № 2 (72)).

Операционный материал (удалённые полулунная и/или ладьевидная кость либо фрагменты последней) подвергали фиксации в растворе 10 % нейтрального формалина. После декальцинации в смеси растворов муравьиной и соляной кислот материал осуществляли гистологическую проводку в аппарате для вакуумной проводки тканей HISTOSAFETM INFILTRATM (ООО «ЭргоПродакшн», Россия).

Гистологические микропрепараты (парафиновые срезы изготовлены на микротоме HM 450 Thermo Scientific (США) и окрашены гематоксилином и эозином либо трёхцветным методом Массона). Для получения цифровых изображений микропрепаратов использовали микроскоп AxioScore.A1 в комплекте с камерой AxioCam ICc 5 и ПО Zenblue (CarlZeissMicroImagingGmbH, Германия). Изменения суставного хряща оценены по международной шкале OARSI [16] слепым методом.

Распространённость некроза субхондральной кости определена полуколичественно (от 0 до 3 баллов) в 3–10 полях зрения от каждого пациента (всего 78 полей) при инструментальном увеличении 400×: 0 баллов — нет признаков некроза; 1 — охвачены признаками гибели остеоцитов до трети площади поля зрения; 2 — до двух третей площади поля зрения; 3 — до трёх третей (100 %) поля зрения (демонстрируют некротические изменения).

Для статистической обработки количественных данных использовали приложение к программе Excel Attestat, версия 9.3.1 (разработчик И.П. Гайдышев, сертификат о регистрации в Роспатенте № 2002611109). Учитывая малую численность сравниваемых подгрупп пациентов, гипотезы о различиях проверяли с помощью непараметрического критерия Манна – Уитни.

РЕЗУЛЬТАТЫ

У большинства пациентов ($n = 9$) давность заболевания не превышала четырех лет, а у трех составляла от 10 до 22 лет (табл. 1). При давности заболевания менее 4 лет ($n = 9$) оценка суставного хряща по шкале OARSI варьировала от 1–2 до 5, при давности от 10 до 22 лет — от 3–4 до 4–5. При SLAC / SNAC стадии I вариативность оценок OARSI от 1–2 до 4, при SLAC / SNAC стадии II — от 2 до 4–5, при SLAC / SNAC стадии III — от 3–4 до 5. У всех пациентов выявлен распространённый некроз субхондральной кости, который занимал от 56,67 % до 100 % тестовой площади.

Таблица 1

Основные характеристики пациентов и операционного материала

№	Возраст, лет	Давность травмы, лет	Рентгенологическая стадия SLAC / SNAC	Оценка суставного хряща по OARSI	Остеонекроз субхондральной кости (% тестовой площади)
1.	48	2,33	SNAC II	4	100,00
2.	23	2	SLAC II Некроз полулунной кости	4–5	75,00
3.	41	20	SNAC II	4	93,33
4.	61	1,5	SLAC III	4–5	93,33
5.	41	10	SNAC III	3–4	86,67
6.	51	22	SNAC III	4–5	100,00
7.	20	2,25	SNAC I	1–2	56,67
8.	31	0,75	SLAC II	2–3	76,67
9.	36	1,17	SNAC II	2	89,00
10.	21	3,6	SNAC I Асептический некроз дистального полюса ладьевидной кости	4	77,67
11.	60	1,42	SLAC II	2	100,00
12.	65	0,67	SLAC III	5	70,83

Наименьшая степень повреждений суставного хряща (степень 1–2) была у одного пациента (рис. 1). Суставная поверхность не разволокнена, в поверхностной зоне определяли деструктивно измененные хондроциты, пустые клеточные лакуны. Базофильная линия не определялась, местами отсутствовала субхондральная костная пластинка, отмечены участки проникновения костно-мозгового паннуса (рис. 1, а). В субхондральной зоне нарушена целостность трабекулярной сети, выражен остеолитизм, встречались костные трабекулы с мелкими интерстициальными остеонекрозами (рис. 1, б), отмечены признаки репаративного остеогенеза, — остеобласты на поверхности костных трабекул (рис. 1, в). В межтрабекулярных промежутках преобладали жировой костный мозг, большие скопления сладжированных эритроцитов и эритроциты вне сосудов (рис. 1, в).

Повреждения хряща степени 3 по OARSI определены также у одного пациента (рис. 2). Суставной хрящ присутствовал на всем протяжении, поверхностная зона разволокнена, выражено отслоение мелких фрагментов хряща, встречались участки с синовиальным паннусом (рис. 2, а). Толщина кальцифицированного хряща увеличена и составляла 1/2–2/3 от некальцифицированного хряща. В субхондральной зоне нарушена целостность трабекулярной сети, трабекулы — с мелкими интерстициальными остеонекрозами (рис. 2, б), отмечены признаки репаративного остеогенеза (рис. 2, в). Фиброз костного мозга, в сосудах — сладжированные эритроциты.

Повреждения хряща 3–4 степени по OARSI выявлены у четырех пациентов (двое с давностью заболевания менее четырёх лет и двое — из группы с давностью от 10 до 22 лет). На всем протяжении выражено отслоение поверхностной и промежуточной зон хряща, так что на большом протяжении суставная поверхность представлена глубокой зоной (рис. 3, а). Выявлены участки замещения глубокой

зоны хряща костной тканью и новообразование базофильного раздела (рис. 3, б). Выраженный некроз субхондральной кости сопровождался гладкой резорбцией, расслоением основного вещества трабекул по линиям склеивания. Признаки репаративного остеогенеза не выражены. Встречались однокамерные и двухкамерные кисты (рис. 3, в).

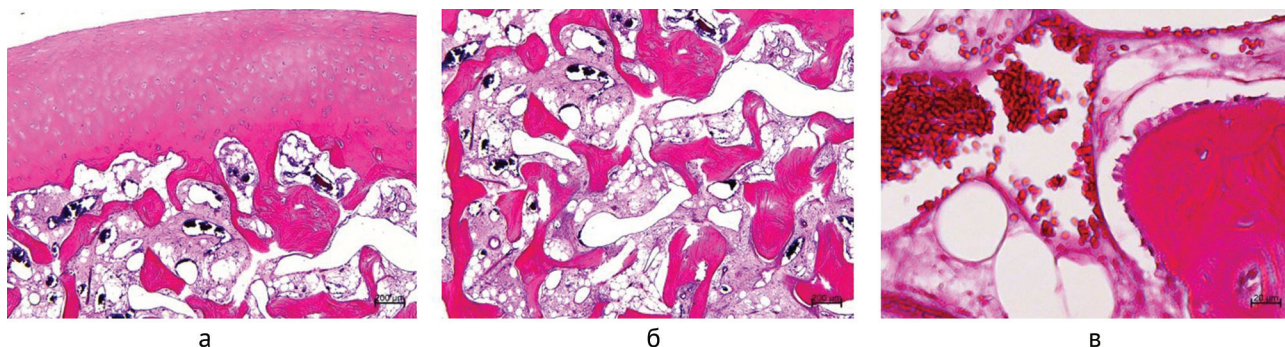


Рис. 1. Фото микропрепаратов пациента Л. 20 лет (SNAC I, давность 2,3 года, OARSI 1–2): а — общий вид суставного хряща; б — субхондральная зона; в — сладжированные эритроциты, остеобласты на поверхности костной трабекулы. Окраска гематоксилином и эозином. Увеличение $\times 40$ (а, б), $\times 400$ (в)

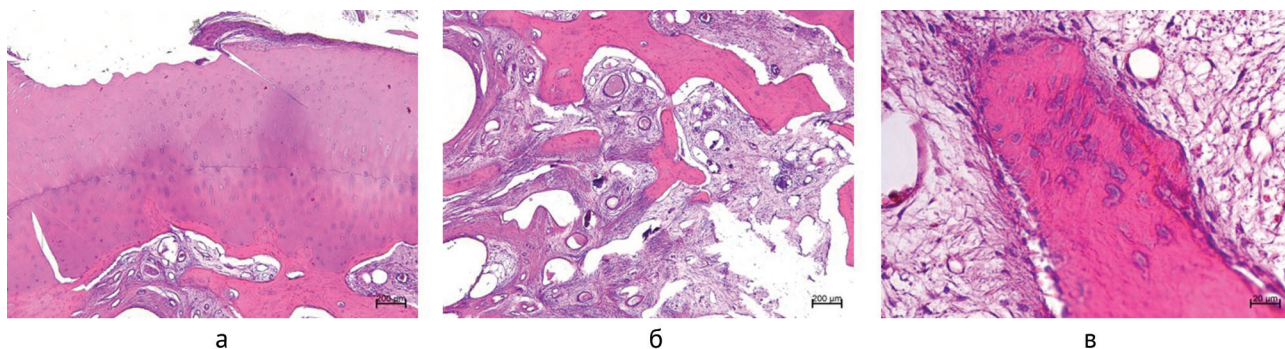


Рис. 2. Микрофото препаратов пациента П. 31 года (SLAC II, давность 0,75 года, OARSI 3): а — очаг разволокнения поверхностной зоны, синовиальный паннус; б — трабекулы с интерстициальными остеонекрозами, фиброз костного мозга; в — новообразованная трабекула поверхности, которой выстлана активными остеобластами. Окраска гематоксилином и эозином. Увеличение $\times 40$ (а, б), $\times 400$ (в)

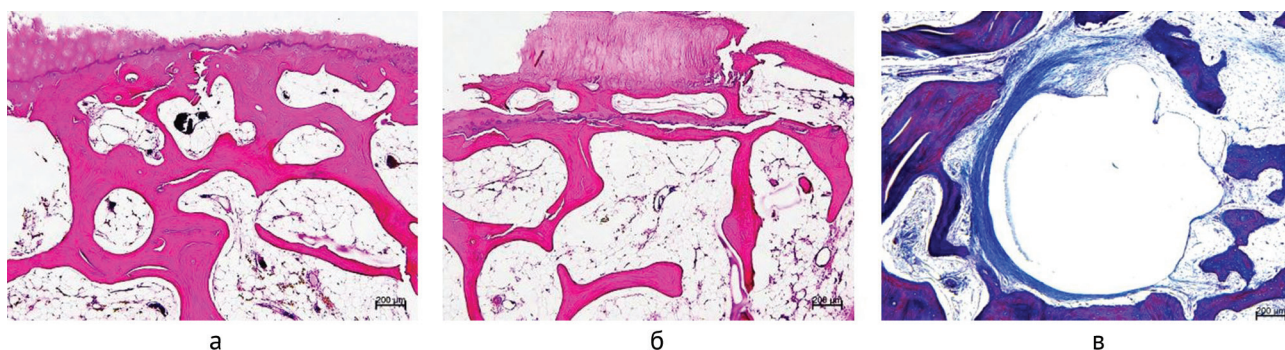


Рис. 3. Микрофото препаратов пациентки И., 48 лет, (SNAC II, давность 2,33 года, OARSI 3–4): а — суставная поверхность представлена разволокненной глубокой зоной хряща; б — продвижение процесса костеобразования по направлению к суставной поверхности, новообразование базофильного раздела; в — субхондральная зона, киста с толстой фиброзной капсулой. Окраска гематоксилином и эозином (а, б) и трихромным методом по Массону (в). Увеличение $\times 40$

Степень повреждения хряща 4–5 выявлена также у четырёх пациентов (трое с давностью заболевания до четырёх лет, один — с давностью от 10 до 22 лет). Суставной хрящ местами разволокнен, местами покрыт синовиальным паннусом, в очагах разволокнения гигантские изогенные группы хондроцитов (рис. 4, а). Выявлены участки замещения глубокой и промежуточной зон со стороны субхондральной зоны костномозговым паннусом, новообразование субхондральной костной пластинки сверху покрытой соединительной тканью (рис. 4, б). На большом протяжении — тонкий слой фиброзной ткани. Выраженный остеонекроз субхондральной кости, разрежение костных трабекул, признаки остеокластической резорбции, кисты. Признаки репаративного остеогенеза слабо выражены.

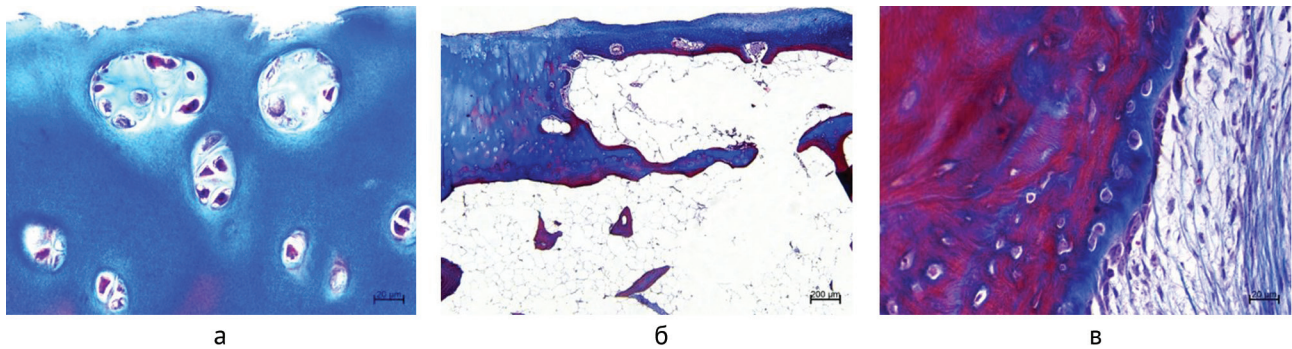


Рис. 4. Микрофото препаратов пациентки Д., 61 года, (SLAC III, давность 1,5 года, OARSI 4–5: а — многочисленные изогенные группы клеток, б — замещение суставного хряща костно-мозговым паннусом, новообразование базофильного раздела, в — активные остеобласты на поверхности субхондральной костной пластинки, фиброз костного мозга. Окраска трихромным методом по Массону. Увеличение $\times 400$ (а, в), $\times 40$ (б)

Степень повреждения суставного хряща 5 выявлена у одного пациента с давностью заболевания менее года (рис. 5), который отрицал травму. Суставная поверхность представлена оголенной костной тканью, так как суставной хрящ отсутствовал (рис. 5, а). Выраженный остеонекроз, остеолитиз, расслоение основного вещества костных трабекул (рис. 5, б). В межтрабекулярных промежутках некротический детрит. Отмечены очаги репаративного остеогенеза, новообразованные трабекулы и протяжённые участки фиброзного замещения костного мозга (рис. 5, в).

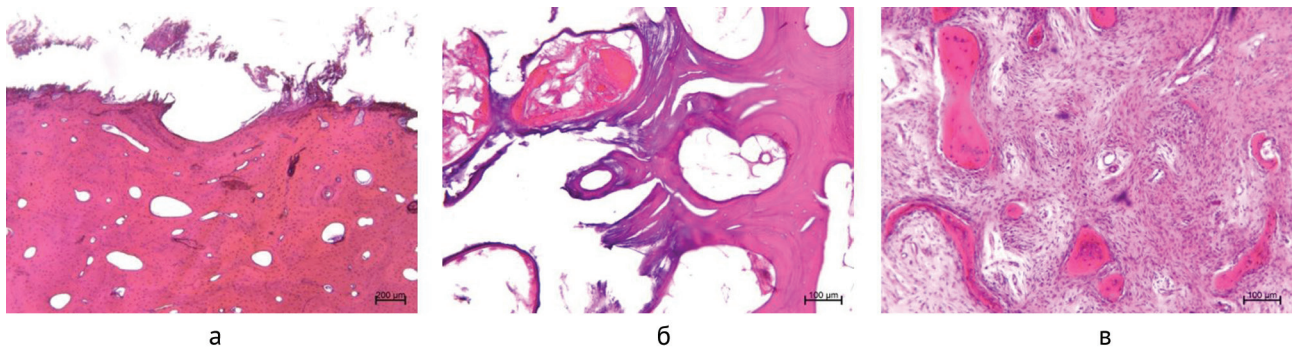


Рис. 5. Микрофото препаратов пациента К., 65 лет, (SLAC III, давность 0,67 года, OARSI 5): а — суставная поверхность представлена субхондральной костью, б — остеолитиз, расслоение основного вещества костных трабекул, в — очаги репаративного остеогенеза. Окраска гематоксилином и эозином. Увеличение $\times 40$ (а), $\times 100$ (б, в)

Оценка остеонекроза в баллах варьировала от 0 до 3 у пациентов с давностью до четырёх лет и от 2 до 3 — при давности от 10 до 22 лет, отличия статистически незначимы (табл. 2). Медиана оценки остеонекроза меньше при SLAC / SNAC стадии I по сравнению со стадиями II и III на уровне значимости 0,05 (табл. 3).

Таблица 2

Оценка остеонекроза в баллах зависимости от давности заболевания

Давность SLAC / SNAC синдрома	Оценка остеонекроза в баллах Me (Q1÷Q3) (min–max)	<i>p</i>
Менее 4 лет (<i>n</i> = 9)	3 (2÷3) (0–3)	0,11
От 10 до 22 лет (<i>n</i> = 3)	3 (2÷3) (2–3)	

Таблица 3

Оценка остеонекроза в зависимости от стадии остеоартроза

Стадия остеоартроза	Оценка остеонекроза в баллах Me (Q1÷Q3) (min–max)	<i>p</i>
SLAC / SNAC I (<i>n</i> = 2)	2 (1÷2) (1–3)	$P^{1-2} = 0,03^*$
SLAC / SNAC II (<i>n</i> = 6)	3 (2÷3) (1–3)	$P^{2-3} = 0,62$
SLAC / SNAC III (<i>n</i> = 4)	3 (2÷3) (0–3)	$P^{1-3} = 0,02^*$

Примечание: * — $p < 0,05$ по критерию Манна – Уитни.

ОБСУЖДЕНИЕ

В выполненном исследовании впервые проведена оценка повреждений суставного хряща по международной шкале OARSI и полуколичественная оценка распространённости некроза субхондральной кости при остеоартрозе запястья, вызванном развитием SLAC / SNAC синдромов.

Гиалиновый хрящ костей запястья в несколько раз тоньше, чем хрящ крупных суставов, однако он не является нагружаемым [17]. Поэтому развитию остеоартроза запястья в большинстве случаев предшествует острая травма, в том числе в исследованной нами группе пациентов. Хроническая травматизация запястья при ручном труде не рассматривается как доказанный фактор остеоартроза запястья [18], однако повторяющиеся микротравмы запястья у элитных спортсменов считается значимым этиологическим фактором [19]. Другие авторы описали расширение ладьевидно-полулунного промежутка нетравматической этиологии, которое с возрастом вызывает прогрессирующую нестабильность и остеоартроз запястья [20]. Однако некоторые пациенты могут не помнить эпизода полученной травмы.

Как показало выполненное исследование, независимо от анамнеза в большинстве случаев дегенерация хряща суставных поверхностей костей запястья происходила в сроки менее четырёх лет, а у некоторых — меньше года. При этом некроз субхондральной кости выявляется у всех пациентов и является необратимым, поскольку ни в одном случае он не был отнесён к классу 1, при котором ишемические события не нарушают непрерывности костных трабекул, несмотря на гибель остецитов [21]. Нарушение непрерывности, лизис и разрежение костных трабекул были выражены во всех исследованных случаях, что отражает сущность и последствия коллапса запястья. В межтрабекулярных пространствах располагался преимущественно жировой костный мозг, у большинства пациентов выявлены участки его фиброзного замещения и кистозного перерождения.

Полученные данные дают возможность предположить ограниченные возможности органосохраняющих и хондропластических операций при остеоартрозе запястья. Как свидетельствуют данные мировой литературы, радиочастотная хондропластика при артроскопии запястья создаёт высокий риск для выживания хондроцитов [22]. Для купирования хронической посттравматической боли в запястье давно рекомендован способ стимуляции костного мозга, — артроскопический дриллинг, но распространения в клинической практике методика не получила [23]. У одного пациента после безуспешного консервативного лечения остеоартроза запястья применяли ювенильные хрящевые аллографты [24], остеохондральные ауто- и аллотрансплантаты для лечения хрящевых дефектов запястья использовали в небольших группах из двух и трёх пациентов [25, 26], трансплантаты рёберного хряща в качестве спейсера — при лечении пациентов с болезнью Кинбека [27, 28]. Информация об эффективности перечисленных методов на сегодняшний день явно недостаточна.

Золотым стандартом хирургического лечения SLAC / SNAC синдрома на сегодняшний день остаются «спасительные» операции (резекция проксимального ряда костей запястья и четырёхсторонний артротомия), которые позволяют купировать болевой синдром и сохранить приемлемые функциональные возможности кисти [29, 30], однако остаётся нерешённой проблема оптимального лечения молодых пациентов с начальными проявлениями остеоартроза запястья.

Для разработки технологий лечения представляется перспективным дальнейшее изучение клинко-патоморфологических вариантов течения остеоартроза запястья в зависимости от механизма травмы, видов активности, пола и возраста пациентов. Полученные данные указывают на то, что SLAC / SNAC синдром может иметь два типа течения, — прогрессирующий и стагнирующий, при втором типе заболевание долго протекает бессимптомно. Независимо от причины SLAC / SNAC синдрома (разрыв ладьевидно-полулунной связки, перелом ладьевидной кости или идиопатический некроз ладьевидной или полулунной костей) у всех пациентов остеоартроз запястья сопровождается необратимым остео-некрозом субхондральной кости и костного мозга, что, вероятно, отражает степень острых либо хронических повреждений питающих кость сосудов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При общей тенденции бóльших дегенеративных изменений суставного хряща при бóльшей стадии SLAC / SNAC синдрома их гистологическая оценка межиндивидуально варьирует на каждой стадии. Остеонекроз субхондральной кости более распространён при SLAC / SNAC синдроме стадий II–III, чем стадии I.

Конфликт интересов не заявлен.

Этическая экспертиза. Исследование одобрено учрежденческим этическим Комитетом (протокол № 2 (72) от 07.10.2022).

Информированное согласие. Все пациенты дали информированное согласие на участие в исследовании.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Eschweiler J, Li J, Quack V. et al. Anatomy, Biomechanics, and Loads of the Wrist Joint. *Life (Basel)*. 2022;12(2):188. doi: 10.3390/life12020188.
- Holzbauer M, Mihalic JA, Pollak M, Froschauer SM. Total Wrist Arthroplasty for Posttraumatic Wrist Osteoarthritis: A Cohort Study Comparing Three Indications. *Life (Basel)*. 2022;12(5):617. doi: 10.3390/life12050617.
- Шершнева О.Г., Кирпичев И.В. Современные подходы к лечению повреждений ладьевидно-полулунной связки кистевого сустава (обзор литературы). *Гений ортопедии*. 2020;26(4):593-599. doi: 10.18019/1028-4427-2020-26-4-593-599.
- Chen C, Chandnani VP, Kang HS, et al. Scapholunate advanced collapse: a common wrist abnormality in calcium pyrophosphate dihydrate crystal deposition disease. *Radiology*. 1990;177(2):459-461. doi: 10.1148/radiology.177.2.2217785.
- Weiss KE, Rodner CM. Osteoarthritis of the wrist. *J Hand Surg Am*. 2007;32(5):725-746. doi: 10.1016/j.jhsa.2007.02.003.
- Tischler BT, Diaz LE, Murakami AM, et al. Scapholunate advanced collapse: a pictorial review. *Insights Imaging*. 2014;5(4):407-317. doi: 10.1007/s13244-014-0337-1.
- Vender MI, Watson HK, Wiener BD, Black DM. Degenerative change in symptomatic scaphoid nonunion. *J. Hand Surg*. 1987;12:514-519. doi: 10.1016/S0363-5023(87)80198-3.
- Trehan SK, Lee SK, Wolfe SW. Scapholunate advanced collapse: Nomenclature and differential diagnosis. *J. Hand Surg*. 2015;40:2085-2089. doi: 10.1016/j.jhsa.2015.06.110.
- Brenner LH. Degenerative disorders of the wrist. *J. Hand Surg*. 1985;10:1002-1006. doi: 10.1016/s0363-5023(85)80025-3.
- Laulan J, Marteau E, Bacle G. Wrist osteoarthritis. *Orthop. Traumatol. Surg. Res*. 2015;101:S1-S9. doi: 10.1016/j.otsr.2014.06.025.
- Patel N, Russo G, Rodner C. Osteoarthritis of the wrist. In: Chen Q (ed.). *Osteoarthritis - Diagnosis, Treatment and Surgery*. IntechOpen, London, UK; 2012:171-202. doi: 10.5772/28113.
- Deglmann CJ. Osteoarthritis of the wrist. *Orthopadie (Heidelb)*. 2024;53(6):463-476. (In German) doi: 10.1007/s00132-024-04502-w.
- Григорьевский В.В., Страфун С.С., Тимошенко С.В. Гистопатология тканей кистевого сустава и некоторые клиничко-морфологические корреляции у больных с последствиями переломов ладьевидной кости. *Гений Ортопедии*. 2017;23(1):30-36. doi: 10.18019/1028-4427-2017-23-1-30-37.
- Koushesh S, Shahtaheri SM, McWilliams DF. et al. The osteoarthritis bone score (OABS): a new histological scoring system for the characterisation of bone marrow lesions in osteoarthritis. *Osteoarthritis Cartilage*. 2022;30(5):746-755. doi: 10.1016/j.joca.2022.01.008.
- Kompoliti E, Prodromou M, Karantanas AH. SLAC and SNAC Wrist: The Top Five Things That General Radiologists Need to Know. *Tomography*. 2021;7(4):488-503. doi: 10.3390/tomography7040042.
- Pritzker KP, Gay S, Jimenez SA, et al. Osteoarthritis cartilage histopathology: grading and staging. *Osteoarthritis Cartilage*. 2006;14(1):13-29. doi: 10.1016/j.joca.2005.07.014.
- Draper CE, Besier TF, Gold GE, et al. Is cartilage thickness different in young subjects with and without patellofemoral pain? *Osteoarthritis Cartilage*. 2006;14(9):931-937. doi: 10.1016/j.joca.2006.03.006.
- Gignac MAM, Irvin E, Cullen K, et al. Men and Women's Occupational Activities and the Risk of Developing Osteoarthritis of the Knee, Hip, or Hands: A Systematic Review and Recommendations for Future Research. *Arthritis Care Res (Hoboken)*. 2020;72(3):378-396. doi: 10.1002/acr.23855.
- Jones ME, Davies MAM, Shah K, et al. The prevalence of hand and wrist osteoarthritis in elite former cricket and rugby union players. *J Sci Med Sport*. 2019;22(8):871-875. doi: 10.1016/j.jsams.2019.03.004.
- Hollevoet N. Bilateral scapholunate widening may have a nontraumatic aetiology and progress to carpal instability and osteoarthritis with advancing age. *J Hand Surg Eur Vol*. 2019;44(6):566-571. doi: 10.1177/1753193418819653.
- Büchler U, Nagy L. The issue of vascularity in fractures and non-union of the scaphoid. *J Hand Surg Br*. 1995;20(6):726-735. doi: 10.1016/s0266-7681(95)80036-0.
- Huber M, Eder C, Loibl M, et al. RFE based chondroplasty in wrist arthroscopy indicates high risk for chondrocytes especially for the bipolar application. *BMC Musculoskelet Disord*. 2015;16(1):6. doi: 10.1186/s12891-015-0460-2.
- Whipple TL. Chronic wrist pain. Instr Course Lect. 1995;44:129-137.
- Hess DE, Werner BC, Deal DN. Use of Particulated Juvenile Articular Cartilage Allograft for Osteochondral Lesions of the Wrist. *Hand (N Y)*. 2017;12(5):NP62-NP67. doi: 10.1177/1558944716673047.
- Ho PC, Tse WL, Wong CW. Arthroscopic Transplantation of Osteochondral Autograft for Treatment of Cartilage Defects in the Wrist. *Hand Clin*. 2017;33(4):755-767. doi: 10.1016/j.hcl.2017.07.016.
- Gaspar MP, Jacoby SM, Marchetto PA, et al. Osteochondral Autograft Transplantation for Proximal Lunate Articular Defects. *J Wrist Surg*. 2017;6(4):329-333. doi: 10.1055/s-0037-1599215.
- Obert L, Lepage D, Ferrier M, Tropet Y. Rib cartilage graft for posttraumatic or degenerative arthritis at wrist level: 10-year results. *J Wrist Surg*. 2013;2(3):234-8. doi: 10.1055/s-0033-1351787.
- Obert L, Lepage D, Sergeant P, et al. Post-traumatic malunion of the distal radius treated with autologous costal cartilage graft: a technical note on seven cases. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2011;97(4):430-437. doi: 10.1016/j.otsr.2011.02.010.
- Chan R, Goursat J, Payen M, et al. Proximal row carpectomy versus four-corner arthrodesis: a retrospective comparative study. *J Plast Surg Hand Surg*. 2024;59:77-82. doi: 10.2340/jphs.v59.18338.
- Heifner JJ, Karadimas T, DeVito PM, et al. Age Considerations in Four-Corner Arthrodesis and Proximal Row Carpectomy: A Review. *J Wrist Surg*. 2023;14(1):93-100. doi: 10.1055/s-0043-1777672.

Статья поступила 25.04.2025; одобрена после рецензирования 12.05.2025; принята к публикации 05.06.2025.

The article was submitted 25.04.2025; approved after reviewing 12.05.2025; accepted for publication 05.06.2025.

Информация об авторах:

Наталья Анатольевна Шудло — доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник, nshchudlo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9914-8563>;

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

Шынгыс Кайырбекулы Куттыгул — аспирант, artana.kaz@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-1072-468X>.

Information about the authors:

Nathalia A. Shchudlo — Doctor of Medical Sciences, Leading Researcher, nshchudlo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9914-8563>;

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

Shyngys K. Kuttygul — post-graduate fellow, artana.kaz@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-1072-468X>.

Научная статья

УДК 616.728.2-089.227.843-77-089.168.1-022]-093/-098

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-4-452-462>

Роль микробиологических методов исследования при диагностике перипротезной инфекции у больных с асептической нестабильностью эндопротезов тазобедренного сустава

С.А. Линник^{1✉}, Е.А. Оришак¹, А.М. Ермаков², И.О. Кучеев³, Л.Ю. Нилова¹, Е.М. Фадеев¹, Г. Карагезов¹, Д.Ю. Коршунов⁴, Я.Б. Цололо¹, В.В. Усиков¹, А.В. Поликарпов³

¹ Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова, Санкт-Петербург, Россия

² Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова, Курган, Россия

³ Госпиталь для ветеранов войн, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Федеральный центр травматологии, ортопедии и эндопротезирования, Смоленск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Станислав Антонович Линник, stanislavlinnik@mail.ru

Аннотация

Введение. Нестабильность эндопротеза после артропластики тазобедренного сустава является достаточно частым осложнением и служит показанием к ревизионному эндопротезированию. В случаях, когда при проведении предоперационных пункций не выявляют рост микрофлоры, нестабильность диагностируют как асептическую. Этиологическая расшифровка интраоперационных результатов лечения так называемой «асептической нестабильности» принципиально важна для выбора дальнейшей тактики лечения.

Цель работы — определить роль микробиологических методов исследования в диагностике перипротезной инфекции (ППИ) тазобедренного сустава.

Материалы и методы. Проведен анализ бактериологического материала 173 больных в возрасте от 27 до 82 лет с асептической нестабильностью компонентов эндопротеза тазобедренного сустава. В зависимости от результатов лабораторных, клинических и микробиологических исследований (МБИ) больные разделены на две группы. Первую группу составили 118 (68,2 %) пациентов с прогностически благоприятным течением в послеоперационном периоде, им выполняли одноэтапное ревизионное протезирование. Вторую группу, прогностически неблагоприятную, составили 55 (31,8 %) пациентов с наличием повышенных гематологических показателей, явлениями местных признаков воспаления и положительными результатами пункций при МБИ, им при поступлении в клинику выполняли двухэтапное ревизионное протезирование. Исследование биоптатов в полимеразно-цепной реакции (ПЦР) проводили при максимально малой микробной нагрузке.

Результаты. Положительные результаты МБИ пункций зарегистрированы у 5,1 % пациентов первой группы и у 25,5 % пациентов второй группы, а биоптатов — в 20,3 % случаев в первой группе и в 30,9 % во второй. Исследования ПЦР позволили дополнительно диагностировать ППИ в 7,5 % случаев в результате МБИ биоптатов и в 19,6 % — пункций.

Обсуждение. Результаты указывают на низкую информативность культуральных микробиологических исследований, ПЦР улучшила диагностику на 7,5 %. Выявление маловирулентных микроорганизмов, включая коагулазонегативные стафилококки, требует особых оценочных критериев.

Заключение. Микробиологическое (культуральное) исследование демонстрирует умеренную чувствительность, особенно при низковирулентной инфекции, в то время как ПЦР при низковирулентной инфекции играет лидирующую роль в установлении микробной этиологии ППИ.

Ключевые слова: эндопротезирование, перипротезная инфекция, коагулазонегативные стафилококки, тазобедренный сустав, нестабильность сустава, микробиологические исследования, полимеразная цепная реакция

Для цитирования: Линник С.А., Оришак Е.А., Ермаков А.М., Кучеев И.О., Нилова Л.Ю., Фадеев Е.М., Карагезов Г., Коршунов Д.Ю., Цололо Я.Б., Усиков В.В., Поликарпов А.В. Роль микробиологических методов исследования при диагностике перипротезной инфекции у больных с асептической нестабильностью эндопротезов тазобедренного сустава. *Гений ортопедии*. 2025;31(4):452-462. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-452-462.

© Линник С.А., Оришак Е.А., Ермаков А.М., Кучеев И.О., Нилова Л.Ю., Фадеев Е.М., Карагезов Г., Коршунов Д.Ю., Цололо Я.Б., Усиков В.В., Поликарпов А.В., 2025

Original article

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-4-452-462>



The role of microbiological methods in diagnosis of periprosthetic joint infection in patients with aseptic loosening of total hip arthroplasty

S.A. Linnik¹✉, E.A. Orishak¹, A.M. Ermakov², I.O. Kucheev³, L.Yu. Nilova¹, E.M. Fadeev¹, G. Karagezov¹, D.Yu. Korshunov⁴, Ya.B. Tsololo¹, V.V. Usikov¹, A.V. Polikarpov³

¹ North-Western State Medical University n.a. I.I. Mechnikov, Saint Petersburg, Russian Federation

² Ilizarov National Medical Research Centre for Traumatology and Orthopedics, Kurgan, Russian Federation

³ Hospital for war veterans, Saint Petersburg, Russian Federation

⁴ Federal Center for Traumatology, Orthopedics and Endoprosthetics, Smolensk, Russian Federation

Corresponding author: Stanislav A. Linnik, stanislavlinnik@mail.ru

Abstract

Introduction Instability of the total hip arthroplasty is a common complication and an indication for revision arthroplasty. The implant instability is diagnosed as aseptic with no microbiological culture growth to be obtained through preoperative synovial aspiration. Etiological interpretation of intraoperative findings in cases of so-called "aseptic instability" is critical for determining subsequent treatment strategies.

The **objective** was to determine the role of microbiological methods in diagnosing periprosthetic joint infection (PJI) of the hip.

Material and methods A bacteriological analysis was produced for 173 patients with aseptic instability of total hip replacement. The patients aged 27 to 82 years. Based on laboratory, clinical and microbiological (MB) findings, the patients were divided into two groups. The first group consisted of 118 (68.2 %) patients who underwent one-stage revision and had a favorable postoperative prognosis. The second group consisted of 55 (31.8 %) patients with elevated hematological parameters, local signs of inflammation, positive MB findings and had unfavorable prognosis. These patients underwent two-stage revision arthroplasty. Biopsy samples were tested using polymerase chain reaction (PCR) in cases of minimal microbial load.

Results Positive MB results were registered in 5.1 % of patients in the first group and in 25.5 % of patients in the second group. Intraoperative biopsies revealed positive results in 20.3 % of the first group and 30.9 % of the second group. PCR identified PJI in 7.5 % of MB biopsies and in 19.6 % of aspirates.

Discussion The findings indicated low diagnostic value of microbiological cultures with PCR improving diagnostic accuracy by 7.5 %. Detection of low-virulence microorganisms including coagulase-negative staphylococci required specific evaluation criteria.

Conclusion Microbiological culturing demonstrated moderate sensitivity, in low-virulence infections, in particular, while PCR in low-virulence infections was essential in establishing the microbial etiology of PJI.

Keywords: joint replacement, periprosthetic joint infection, coagulase-negative staphylococci, hip joint, joint instability, microbiological studies, polymerase chain reaction

For citation: Linnik SA, Orishak EA, Ermakov AM, Kucheev IO, Nilova LYu, Fadeev EM, Karagezov G, Korshunov DYu, Tsololo YaB, Usikov VV, Polikarpov AV. The role of microbiological methods in diagnosis of periprosthetic joint infection in patients with aseptic loosening of total hip arthroplasty. *Genij Ortopedii*. 2025;31(4):452-462. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-452-462.

ВВЕДЕНИЕ

Артропластика тазобедренного сустава (ТБС) при лечении ортопедических больных является эффективной и востребованной операцией, как в зарубежной, так и в отечественной хирургической практике [1, 2]. Вместе с тем, с увеличением числа операций эндопротезирования возрастает и число осложнений, наиболее тяжелым из которых является перипротезная инфекция (ППИ), достигающая 5–10 % всех операций [2–7]. Одним из самых частых осложнений в отдаленном послеоперационном периоде является асептическое расшатывание эндопротеза (20,0–50,3 % случаев), которое приводит к операциям тотального ревизионного эндопротезирования [8, 9]. Нестабильность одного или обоих компонентов эндопротеза, по сведениям регистра ЭП РНИИТО им. Р.Р. Вредена, является преобладающей причиной асептических ревизионных артропластик тазобедренного сустава в 38,1 % случаев. При этом удельный вес асептического расшатывания эндопротеза тазобедренного сустава в структуре первичных ревизий достигает 50,3 %, а в структуре ре-ревизий занимает второе место по частоте после инфекционных осложнений и составляет 20,8 % [8, 10–12].

Предоперационная дифференциальная диагностика между ППИ и асептической нестабильностью нередко является сложной задачей, особенно при наличии низковирулентных возбудителей и при инфекциях, связанных с биопленками [13–15]. Нередко случаи предполагаемой асептической нестабильности эндопротеза могут быть вызваны нераспознанной инфекцией, которую удается верифицировать при углубленном микробиологическом исследовании (МБИ). Одной из причин асептического расшатывания эндопротеза является индивидуальная реакция организма на имплантат.

Зачастую ППИ проявляется нестабильностью оперированного сустава и болевым синдромом без изменений биохимических показателей, клеточных реакций крови, признаков воспаления. Таким образом, так называемая «асептическая нестабильность» эндопротеза может быть обусловлена субклинической инфекцией, вызванной низковирулентными возбудителями, представителями микробиоты пациента или персонала [16–19]. Вследствие стертой клинической картины и отсутствия ранних лабораторных гематологических показателей, МБИ назначают только на стадии проявления признаков обострения инфекционного процесса, когда микробная составляющая уже не вызывает сомнения. Одной из причин развития ППИ может служить интраоперационное инфицирование, которое манифестируют в период от нескольких недель до нескольких месяцев после операции.

По мнению большинства авторов, «золотым стандартом» МБИ является исследование образцов перипротезных тканей и синовиальной жидкости. Однако ключевым ограничением бактериологического метода является его чувствительность, обычно предполагающая содержание не менее 10^3 КОЕ микробных клеток в исследуемом материале. Нередко при использовании стандартных бактериологических методик приходится констатировать отсутствие роста микроорганизмов, что может быть связано как с ничтожным их количеством, так и с проведением антибактериальной терапии до взятия проб [20–23].

Чаще всего этиологическими агентами ППИ являются грамположительные бактерии *S. aureus* и *S. epidermidis*, с частотой встречаемости до 60 %. Значительно реже (до 17 % случаев) в качестве возбудителей ППИ описывают грамотрицательные бактерии и их ассоциации [24–26]. Факторы вирулентности стафилококков, к которым относят поверхностные белки, способствующие колонизации тканей, полисахаридную капсулу, белок А, каротиноиды, экзотоксины и др., наиболее характерны для *S. aureus*.

Наличие клинического эквивалента позволяет авторам утверждать, что значительная часть инфекции вызвана слабовирулентными возбудителями с характерным субклиническим течением инфекционного процесса. В таких случаях представляется оправданным обсуждать этиологическую роль коагулазонегативных стафилококков, среди которых описаны случаи выделения не только *S. epidermidis*, но и штаммов *S. simulans*, *S. hominis*, *S. capitis*, *S. caprae* и *S. lugdunensis* [27–30].

Нестабильность эндопротеза после артропластики тазобедренного сустава не является редким осложнением и служит показанием для операций ревизионного эндопротезирования. Вместе с тем, в публикациях последних лет все чаще стали появляться сообщения о выявлении роста слабовирулентной микрофлоры при углубленных МБИ удаленных имплантатов, что не позволяет рассматривать нестабильность эндопротеза как асептическую.

В связи с отсутствием диагностического теста, позволяющего в 100 % случаев диагностировать ППИ, продолжают разрабатывать и совершенствовать диагностические алгоритмы для выявления данной патологии.

Цель работы — определить роль микробиологических методов исследования в диагностике перипротезной инфекции тазобедренного сустава.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проведен анализ результатов разных методов диагностики ППИ у 173 больных с асептической нестабильностью компонентов эндопротеза, среди них 61 (35,3 %) мужчина и 112 (64,7 %) женщин в возрасте от 27 до 82 лет ($53,7 \pm 7,4$). Пациенты находились на лечении в клинике травматологии и ортопедии СЗГМУ им. И.И. Мечникова с 2020 по 2023 гг. Первичное эндопротезирование ТБС выполняли по поводу остеоартритов, переломов шейки и асептического некроза головки бедренной кости. Нестабильность компонентов эндопротеза наступила через 1–12 лет (в среднем — 5,8) после операций первичного эндопротезирования.

У всех обследованных больных изучен характер заживления послеоперационных ран после первичной артропластики суставов, процесс течения послеоперационного периода, характер и периодичность болей в прооперированной области до появления нестабильности протеза. При локальном осмотре в области оперированного сустава учитывали наличие признаков воспаления (отек, гиперемия, гипертермия), а также функцию сустава. В анамнезе у 55 больных с нестабильностью эндопротеза до поступления в клинику наблюдалось повышение температуры тела (до 38°), лейкоцитоз, СОЭ, СРБ. На основании данных лабораторных и клинических исследований проведена оценка диагностической значимости результатов скрининга, включая МБИ в дооперационном периоде реэндопротезирования.

В зависимости от результатов лабораторных, клинических и МБИ согласно критериям EBJIS 2021 больные разделены на две группы для прогноза, выбора тактики лечения и диагностических исследований. Первую группу составили 118 (68,2 %) пациентов, у которых после первичной артропластики отсутствовали повышенные гематологические показатели (лейкоцитоз, СРБ, СОЭ, нейтрофилез и др.), признаки воспаления в области оперированного сустава и были отрицательные результаты пунктов при МБИ, т.е. пациенты с благоприятным течением в послеоперационном периоде. Этим пациентам выполняли одноэтапное реэндопротезирование. Вторую группу, прогностически неблагоприятную, составили 55 (31,8 %) пациентов с повышенными гематологическими показателями и местными признаками воспаления, с неблагоприятным течением послеоперационного периода после первичного эндопротезирования и положительными результатами пунктов при МБИ. Пациентам этой группы при поступлении в клинику выполняли двухэтапное реэндопротезирование.

Всем больным перед выполнением ревизионного эндопротезирования проводили комплексное клиническое, гематологическое и микробиологическое исследование согласно алгоритмам международных профессиональных сообществ (общества «Мышечно-скелетной инфекции» MSIS 2018, Европейского общества инфекции костей и суставов EBJIS 2021). Для прогнозирования ППИ использовали результаты клинко-лабораторных исследований: СОЭ, СРБ, лейкоцитоз, содержание эритроцитов и полиморфоядерных нейтрофилов в синовиальной жидкости. МБИ пунктов выполняли под контролем УЗИ путем трехкратной пункции из полости сустава до проведения ревизионного эндопротезирования.

Ревизионное эндопротезирование выполнено всем 173 больным с нестабильностью эндопротезов ТБС: 118 больным первой группы с благоприятным прогнозом произведено одноэтапное реэндопротезирование, а 55 пациентам второй группы — двухэтапное. Больным первой группы осуществляли удаление нестабильных компонентов эндопротеза, забор биоптатов для МБИ, тщательное промывание операционной раны с использованием пульс-лаважа, ультразвуковую обработку операционной раны и установку ревизионного эндопротеза. Вид ревизионной системы эндопротеза подбирали индивидуально в зависимости от местных изменений в области оперированного сустава (наличие костных дефектов, степени остеопороза, состояния мягких тканей).

Пациентам с неблагоприятным прогнозом проводили двухэтапное реэндопротезирование. Вначале выполняли saniрующий этап операции. После удаления нестабильных компонентов эндопротеза, костного цемента и других инородных тел (винты, проволока и др.) проводили забор биоптатов (не менее пяти образцов) для МБИ. После тщательного промывания операционной раны и обработки ее ультразвуком устанавливали, как правило, артикулирующий спейсер. Для приготовления двухкомпонентного спейсера, размер которого подбирали индивидуально в зависимости от диаметра вертлужной впадины и костного канала бедренной кости, использовали специальные формы. Для изготовления спейсера применяли антимикробную композицию пролонгированного действия (патент № 2019109897). Окончательное реэндопротезирование осуществляли через 3–4 месяца с использованием ревизионных систем.

В послеоперационном периоде больным первой группы в течение 3–5 суток проводили антибиотикопрофилактику (цефазолин). Пациенты второй группы получали курс парентеральной антибактериальной терапии (по согласованию с клиническим фармакологом, в зависимости от выявленной микрофлоры во время МБИ) в течение 7–10 суток с последующим проведением пероральной антибиотикотерапии в течение 6–8 недель.

МБИ биоматериала, полученного интраоперационно, является диагностически значимым методом при ППИ, в особенности при выявлении штаммов микроорганизмов одного фенотипа из двух и более образцов интраоперационного биоматериала [29–32]. В связи с этим интраоперационное извлечение нескольких образцов для МБИ проводили всем пациентам. В качестве исследуемого материала использовали удаленные нестабильные компоненты эндопротеза (чашка, вкладыш, ножка, головка), подлежащие измененные ткани, материал из бедренного канала и вертлужной впадины, синовиальную жидкость, перипротезную мембрану (при ее наличии), мазки из раны, кусочки костной ткани.

Посев полученных образцов осуществляли на расширенный набор питательных сред для выделения аэробных, факультативно-анаэробных и облигатно-анаэробных микроорганизмов, а также микромицетов. При посеве использовали общепринятую полуколичественную методику с рассевом, не позволяющую доподлинно взвесить исследуемый материал и достоверно рассчитать концентрацию возбудителя. Степень роста оценивали по категориям «со среды обогащения», «скудный», «умеренный», «обильный», «сливной», что предполагало следующие критерии: при выделении на плотной питательной среде рост до 10 колоний микроорганизмов определенного вида оценивали как скудный; от 10 до 100 колоний — умеренный, более 100 колоний — обильный. При сплошном росте микроорганизмов, не поддающемся подсчету, рост обозначали как «сливной».

Запасной обогатительный посев производили на тиогликолевый и сахарный бульоны с последующим высевом на плотные среды. После смывов фрагменты протезов (чашка, вкладыш, ножка, головка) асептично помещали либо в широкогорлые флаконы с жидкой питательной средой, либо (в зависимости от размера) в специально подготовленные стерильные контейнеры с жидкими средами, обеспечивающими полное погружение элементов протезов. Стандартная методика инкубации обогатительных посевов подразумевала высев на плотные среды через 16–18 часов. В случаях инкубации компонентов протезов пролонгировали культивирование в жидкой питательной среде до 72 часов.

Идентификацию осуществляли с использованием стандартизированных систем биохимической идентификации для различных групп микроорганизмов, а также методом MALDI TOF масс-спектрометрии.

Культуральное исследование материала, полученного до и во время ревизионного эндопротезирования, не в полной мере решает проблему трактовки результатов и оценки этиологической значимости находок при экстремально малой микробной нагрузке, а также не всегда позволяет установить диагноз ППИ. В связи с этим требуется включение дополнительных микробиологических методов, что в случае схожести результатов, полученных разными методами, позволит трактовать находки, как значимые. Поэтому было проведено исследование образцов, полученных во время ревизионного эндопротезирования, в полимеразной цепной реакции (ПЦР). Теоретическая чувствительность ПЦР составляет 1 микробную клетку в исследуемом материале, на практике чувствительность ПЦР составляет 10^2 – 10^3 микробных клеток.

До проведения посева на питательные среды проводили аликвотирование исследуемого материала путем отбора кусочков тканей и взятия смывов с нативного материала и компонентов протезов с последующим замораживанием при температуре $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ для дальнейшего исследования в ПЦР.

Нативный материал исследовали на наличие генов микроорганизмов, включая гены резистентности, с использованием программируемого амплификатора с системой детекции флуоресцентного сигнала в режиме реального времени CFX96 Touch (Bio-Rad). Анализ результатов проводили с помощью программного обеспечения прибора, используемого для проведения ПЦР, с детекцией в режиме реального времени. Анализировали графики накопления флуоресцентного сигнала по соответствующим каналам, свидетельствующим о накоплении продукта амплификации фрагментов генов соответствующих микроорганизмов и/или ферментов резистентности. Клиническую интерпретацию положительных результатов ПЦР расценивали как значимую составляющую течения воспалительного процесса.

Выявление генов метициллинрезистентных стафилококков в нативном материале осуществляли с использованием набора реагентов для выявления и количественного определения ДНК метициллин-чувствительного и метициллин-резистентного *S. aureus*, метициллин-резистентных коагулазонегативных *Staphylococcus spp.* в биологическом материале методом ПЦР с гибридизационно-флуоресцентной детекцией АмплиСенс® MRSA-скрин-титр-FL.

Анализировали как наличие ДНК *S. aureus*, так и ДНК гена *mecA*. При тестировании образцов, в отношении которых установлено наличие ДНК *Staphylococcus spp.*, дополнительно проводили исследование на наличие генов *vanA* и *vanB* с использованием набора реагентов АмплиСенс® MDR VRE-FL. Данный набор предназначен для качественного определения ДНК *Enterococcus spp.* и генов *vanA* и/или *vanB*, детекцию которых проводят для выявления штаммов энтерококков, резистентных к ванкомицину (VRE). Однако в отдельных редких случаях гены *vanA* и *vanB* могут выявляться у *Staphylococcus spp.*, что значительно отягощает течение заболевания и ограничивает ресурсы для терапии [16, 22, 28].

Исследование одобрено этическим комитетом СЗГМУ им. И.И. Мечникова и проведено в соответствии с этическими стандартами, изложенными в Хельсинской декларации. У всех больных получено информированное согласие на публикацию результатов исследования.

Для статистической обработки полученных результатов использовали программное обеспечение STATISTICA 10. Количественные параметры определяли с помощью непараметрических методов χ^2 , критериев Фишера, Манна – Уитни. Различия между группами считали статические значимыми при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Больные обеих групп были репрезентативны по гендерному составу. Средний возраст пациентов первой группы — 57 лет (МКИ 49–70), второй группы — 61 год (МКИ 48–67) ($p > 0,05$). Медианы уровней лейкоцитоза, СОЭ, СРБ до операции реэндопротезирования между группами значимо не различались и составили в первой и второй группах соответственно: $7,8 \times 10^9/\text{л}$ и $8,1 \times 10^9/\text{л}$; 15,8 мм/ч (МКИ 13–28) и 19 мм/ч (МКИ 13–32); 5,0 мг/мл (МКИ 1,52–6,7) и 3,5 мг/мл (МКИ 1,9–6,1) ($p > 0,05$).

Из 173 больных положительные результаты МБИ пунктатов до операции реэндопротезирования выявлены у 20 (11,6 %) больных, из них в первой группе — у шести (5,1 %) больных, во второй — у 14 (25,5 %). Положительные результаты представлены в основном коагулоногательными стафилококками, — у 14 (70,0 %) пациентов, грамотрицательными, — у трех (15,0 %), микробными ассоциациями, — у пяти (25,0 %).

Решающее значение для диагностики ППИ имеет МБИ тканевых биоптатов, взятых во время операции. При этом положительные результаты отмечены у 41 (23,7 %) пациента, что в два раза значимо чаще ($p < 0,05$), чем из пунктатов, взятых до операции (OR = 2,0, 95 % ДИ 13,4–22,3). В первой группе положительные результаты получены у 24 (20,3 %) пациентов, во второй группе — у 17 (30,9 %), что значимо ($p < 0,05$) в два раза выше, чем из пунктатов, взятых до операции (табл. 1).

Таблица 1

Высеваемость при МБИ, проведенном до, в процессе и после эндопротезирования

Группы больных	Количество положительных результатов МБИ (культуральное исследование)					
	Пунктаты до операции		Биоптаты во время операции		Послеоперационный период	
	абс.	%	абс.	%	абс.	%
Первая	6	5,1	24	20,3	7	5,9
Вторая	14	25,5	17	30,9	6	10,9

У всех пациентов с положительными результатами МБИ пунктатов положительными оказались и результаты МБИ биоптатов, взятых во время операции. При этом следует отметить, что микробный пейзаж у 31 (75,6 %) пациента с положительными пунктатами совпадал с микробиотой, полученной при пункции сустава у больных с нестабильными эндопротезами.

Согласно критериям EBJIS 2021 ППИ диагностирована в 20,3 % случаев в первой группе больных, и почти в 1,5 раза чаще ее определяли во второй группе больных (30,9 %) ($p < 0,05$).

При ПЦР исследовании у 54 (31,2 %) пациентов выявлены ДНК значимых микроорганизмов, свидетельствующих о наличии ППИ, в т.ч. у 24 (43,6 %) пациентов второй группы и 30 (25,4 %) пациентов первой группы. Таким образом, применение ПЦР исследование позволяет улучшить диагностику ППИ на 5,1 % после МБИ биоптатов в первой группе и на 12,7 % во второй группе.

Усреднённо в обеих группах использование метода ПЦР позволило выявить на 7,5 % больше случаев ППИ, чем при МБИ биоптатов, и значимо ($p < 0,05$) на 19,6 % больше, чем при МБИ пунктатов. В первой группе применение метода ПЦР значимо улучшило ($p < 0,05$) выявление ППИ на 20,3 % после МБИ пунктатов и на 5,1 % после МБИ биоптатов, а во второй ППИ определяли также значимо ($p < 0,05$) чаще, соответственно на 18,1 % и 12,7 % (табл. 2, 3).

Таблица 2

Результаты культуральных и молекулярно-биологических методов исследования

Группы больных	Количество пациентов с положительными результатами					
	Пунктаты до операции		Биоптаты во время операции		ПЦР	
	абс.	%	абс.	%	абс.	%
Первая (n = 118)	6	5,1	24	20,3	30	25,4
Вторая (n = 55)	14	25,5	17	30,9	24	43,6
Все больные (n = 173)	20	11,6	41	23,7	54	31,2

Таблица 3

Количественное определение ДНК *S. aureus* и гена *mecA*, *vanA*, *vanB* при диагностике ППИ

Группы больных	Показатели	Количество					
		ДНК MSSA	ДНК MRCoNS	ДНК MRSA	ДНК MRS spp.	vanA	vanB
Первая	случаи обнаружения ДНК стафилококков	6	21	2	1	–	–
	копий/мл образца	1,1–2,7×10 ⁴	2,4–9,0×10 ⁵	5,8–8,8×10 ⁵	1,2×10 ⁵		
Вторая	случаи обнаружения ДНК стафилококков	–	18	3	3	–	–
	копий/мл образца	–	1,0–9,4×10 ⁴	1,4–3,1×10 ⁴	1,2–7,7×10 ⁵		
Итого случаев	6	39	5	4			

Ближайшие результаты (до 6 мес.) изучены у всех пациентов обеих групп (табл. 4).

Таблица 4

Характер заживления операционных ран после реэндопротезирования

Группы больных	Количество пациентов					
	Заживление первичным натяжением		Заживление вторичным натяжением		Нагноение, свищи	
	абс	%	абс	%	абс	%
Первая (n = 118)	94	79,7	8	6,8	16	13,5
Вторая (n = 55)	36	65,4	9	16,4	10	18,2

Первичное заживление послеоперационных ран наблюдали у 94 (79,7 %) больных первой группы, что значительно ($p < 0,05$) чаще, чем во второй группе, — 36 (65,4 %) больных. Нагноение операционной раны с образованием свищей зарегистрировано у 26 (15,0 %) пациентов, из них 13,5 % — у больных первой группы, что значительно реже ($p < 0,05$), чем во второй группе (18,2 %).

У трех больных в каждой группе (12,5 % и 16,7 % соответственно) зарегистрировано нагноение, в послеоперационном периоде при положительных результатах ПЦР и отрицательных при МБИ пунктатов и биоптатов у них высевались маловирулентные стафилококки. В двух случаях в каждой группе дополнительно к выявленным грамположительным микроорганизмам во время МБИ обнаружены новые грамотрицательные неферментирующие бактерии *Pseudomonas aeruginosa*.

Следует отметить, что существенным ограничением МБИ (культурального исследования) является его ограниченная чувствительность с позиции необходимости достаточной микробной нагрузки на единицу объема исследуемого материала для возможности трактовки полученных результатов. При получении отрицательного результата при культуральном исследовании следует помнить, что нижняя граница чувствительности метода определяется посевной дозой. Следовательно, при посеве на плотные питательные среды обнаружить микробный рост возможно лишь при условии микробной нагрузки не менее 100–1000 микробных клеток в мл исследуемого материала. Таким образом, требуется введение новых, более чувствительных, молекулярно-биологических методов. Только комплексная микробиологическая диагностика поможет расширить диагностические возможности и определить значимость микроорганизмов даже при их низкой вирулентности и малом количестве. Вновь утвержденные клинические рекомендации «Инфекция, ассоциированная с ортопедическими имплантатами» подтверждают значимость культурального исследования, а также указывают на преимущество молекулярно-биологических методов над традиционным культуральным исследованием в случае обследования пациентов с инфекцией, обусловленной низковирулентными возбудителями.

Отдаленные исходы (через год после реэндопротезирования) изучены у 103 больных первой и 47 больных второй групп. В первой группе положительные результаты получены у 96 (95,0 %) больных, что значительно ($p < 0,05$) на 10,8 % выше, чем во второй группе, — 38 (80,5 %). Местные инфекционные осложнения в виде ППИ выявлены у 17 (11,3 %) пациентов, что на девять меньше, чем в сроки до 6 месяцев после операции. Это связано с достижением стойкой ремиссии после санирующего этапа операции у данных больных. Патогены, выявленные после эндопротезирования, у 10 (62,5 %) больных обеих групп с явлениями ППИ совпали с патогенами, полученными при МБИ пунктатов до операции и МБИ биоптатов во время операции. У шести пациентов (37,5 %) микроорганизмы дополнительно выявлены после исследования методом ПЦР.

Полученные результаты свидетельствуют о низкой значимости МБИ пунктатов, взятых до операции. В то же время биоптаты, взятые во время операции реэндопротезирования, у больных с асептической нестабильностью эндопротезов позволяют выявить микробиоту в два раза чаще. Применение ПЦР исследования позволило в 7,5 % случаев выявить микрофлору у больных с отрицательными результатами

МБИ в дооперационном периоде и во время операции реэндопротезирования, что свидетельствует о необходимости выполнения ПЦР исследования у больных с неблагоприятным прогнозом развития ППИ при малом количестве бактерий (10^2 КОЕ) или их отсутствии.

Клинический пример

Больная 54 лет находилась на лечении в клинике травматологии и ортопедии по поводу нестабильности эндопротеза правого тазобедренного сустава. В анамнезе, до развития нестабильности компонентов эндопротеза, неоднократно наблюдали признаки воспаления в области оперированного сустава, которые купировали антибиотикотерапией. При МБИ аспирата из области тазобедренного сустава микроорганизмы не выявлены. Выполнено ревизионное эндопротезирование правого тазобедренного сустава. При микробиологическом исследовании биоптатов (перипротезных тканей, синовиальной жидкости, компонентов эндопротеза) роста микроорганизма не обнаружено. При выполнении исследования биоптатов методом ПЦР выявлен метициллин-резистентный коагулазонегативный *Staphylococcus spp.* Через две недели после операции у больной наблюдали повышение температуры тела до $37,7^\circ$, лихорадку, признаки синдрома системной воспалительной реакции, явления воспаления послеоперационной раны. При пункции послеоперационной раны получен гной и посеян *S. epidermidis* с развитием ППИ.

Таким образом, комплексное микробиологическое и ПЦР (при наличии менее 10^3 КОЕ в 1 см^3) исследования позволяют диагностировать развитие ППИ и, соответственно, выбирать оптимальную тактику лечения больных с нестабильностью компонентов эндопротеза.

ОБСУЖДЕНИЕ

По мнению большинства авторов, МБИ является диагностически значимым тестом [16, 32, 33]. Однако ключевым ограничением МБИ является его чувствительность, обычно предполагающая содержание не менее 10^2 – 10^3 КОЕ в 1 см^3 исследуемого материала. В большинстве случаев при стандартных бактериологических методах наблюдают отсутствие роста микроорганизмов, что может быть связано с малым их количеством или проведением антибактериальной терапии до взятия проб. Мы провели исследование ПЦР всем 55 больным второй группы с неблагоприятным прогнозом ППИ, а также 118 пациентам первой группы. Исследуемый материал характеризовался слабой бактериальной обсеменённостью преимущественно со среды обогащения. Однако при этом мы отметили скудный рост или его отсутствие с условно-абиотических объектов (компонентов протезов) и присутствие значительной обсеменённости (от умеренного до сливного роста) в ряде проб биоматериала (суставной жидкости, мазков, фрагментов тканей).

Количественный эквивалент в перерасчете на количество копий/мл образца представляется важной составляющей при разработке и определении критериев этиологической значимости маловирулентных микроорганизмов, таких как коагулазонегативные стафилококки, в развитии ППИ. Обращает на себя внимание минимальное количество копий (на уровне чувствительности бактериологического метода) при исследовании компонентов эндопротезов, в то время как при исследовании методом ПЦР мышц, тканей, синовиальной жидкости число копий соответствует этиологически значимому количеству микроорганизмов. Данный факт может свидетельствовать о «потере» находок при использовании бактериологического исследования в качестве единственного метода и о выявлении дополнительных положительных находок при параллельном исследовании материала, включая материал с компонентов эндопротезов, методом ПЦР. Нам удалось обнаружить 15 дополнительных случаев присутствия стафилококков, что составляет 14,8 % дополнительных находок от числа найденных ранее при бактериологическом исследовании изолятов стафилококков (101 штамм).

Согласно современным алгоритмам, выделение условно патогенных возбудителей из одного образца биоматериала при отсутствии других признаков инфекции не является подтверждением ППИ, в то время как выделение высоковирулентных микроорганизмов даже из одного образца является диагностически значимым. Выделение условно патогенных организмов только из одного образца и даже отсутствие роста возбудителей интраоперационного биоматериала не исключают диагноз ППИ [20]. Так, в исследовании Y. Inagaki et al. в 80 % случаев подтвержденной ППИ возбудитель выявлен из двух образцов биологического материала, в 8,3 % случаев — из одного образца, а в 11,7 % случаев возбудитель вообще не выявлен. При этом рецидивы ППИ отмечены в 21 % случаев [34].

Несмотря на вековую историю использования бактериологического метода, он остается актуальным и достаточно надежным в подавляющем большинстве клинических ситуаций. Бактериологический (культуральный) метод позволяет убедиться в присутствии возбудителя, оценить его количество, определить чувствительность к антимикробным препаратам несколькими разработанными и стандартизированными способами. Но, даже оставаясь «золотым стандартом» при валидации многих других современных методов микробиологической диагностики, бактериологический метод имеет ряд ограничений, включая относительно низкую чувствительность, требовательность отдельных групп

бактерий и, как следствие, нерепрезентативность получаемого результата, отсутствие уверенности в полноте расшифровки при положительном результате или получение ложноотрицательного результата исследования [20, 31]. В настоящей работе в 76,3 % случаев при бактериологическом исследовании биоматериала и смывов с компонентов эндопротеза был получен ответ, — отсутствие бактериального роста. В таких случаях клинические наблюдения нестабильности прооперированного сустава считаются асептическими. На фоне слабовыраженных показателей воспаления, в силу низкой вирулентности преобладающих возбудителей ППИ послеоперационные осложнения расценивают как асептическое расшатывание конструкции, что не приводит к адекватной тактике лечения с обязательной антибиотикотерапией. В то же время одной из причин низкой результативности бактериологического исследования может служить проводимая эмпирическая антибиотикотерапия. Применение метода ПЦР позволило выявить наличие микроорганизмов у 54 (31,2 %) из 173 больных, что значимо ($p < 0,05$) на 7,5 % выше, чем из биоптатов, взятых во время операции, и на 19,6 % выше, — чем из пунктатов, взятых в дооперационном периоде. Более значимые результаты получены у больных сравниваемых групп. В первой группе применение метода ПЦР позволило улучшить диагностику при выполнении пункции с 5,1 % до 25,4 %, во второй группе, — с 11,6 % до 43,6 %; после МБИ биоптатов, — с 20,3 % до 25,4 % в первой группе и с 30,9 % до 43,6 % во второй группе.

В случае исследования материала выявление ДНК микроорганизмов при отрицательном результате посева можно трактовать как этиологически значимое, так как решающим фактором при этом является клинический эквивалент, по поводу которого и проводят ревизионные операции.

Преимуществом предлагаемой комбинации методов является возможность, с одной стороны, оценить значимость находок до операции, с другой стороны, — обеспечить более раннюю расшифровку, нежели повторное бактериологическое исследование, и определить тактику оперативного лечения у пациентов с нестабильностью компонентов эндопротеза. При последующем исследовании интраоперационного материала введение метода ПЦР в схему исследования также позволит ускорить этиологическую расшифровку, своевременно применить целенаправленную антибиотикотерапию и выбрать операционную тактику.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Микробиологическое исследование при диагностике ППИ демонстрирует умеренную или высокую чувствительность (43,5–100,0 %) и высокую специфичность (81,2–100,0 %). Применение микробиологического (культурального) исследования в дооперационном материале (пунктаты) позволяет выявить ППИ в 5,1–11,6 %, а во время операции (биоптаты), — в 23,7–31,2 % случаев.

При содержании микробных клеток менее 10^3 КОЕ в 1 см^3 или полном их отсутствии во время МБИ «доревизионного» пунктата или интраоперационного «ревизионного» биоматериала исследование всех видов нативного материала методом ПЦР позволяет выявить ППИ даже при наличии низковирулентной инфекции. Микробиологическое (культуральное) исследование демонстрирует умеренную чувствительность, особенно при низковирулентной инфекции, в то время как молекулярно-биологический метод (ПЦР) играет лидирующую роль в установлении микробной этиологии ППИ.

Комплексная микробиологическая диагностика поможет расширить диагностические возможности и определить значимость микроорганизмов, даже при низкой вирулентности и их малом количестве.

Конфликт интересов. Не заявлен.

Источник финансирования. Не заявлен.

Этические нормы. Исследование одобрено этическим комитетом СЗГМУ им. И.И. Мечникова и проведено в соответствии с этическими стандартами, изложенными в Хельсинской декларации.

Информированное согласие. Все пациенты дали информированное согласие на публикацию результатов исследования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Николаев Н.С., Карпунин А.С., Максимов А.Л. и др. Опыт лечения больных с неспецифическим кокситом методом двухэтапного эндопротезирования. *Кафедра травматологии и ортопедии*. 2020;(4):5-13. doi: 10.17238/issn2226-2016.2020.4.5-13.
2. Соломяник И.А., Загородний Н.В., Родионова С.С. и др. Травматизм, ортопедическая заболеваемость, состояние травматолого-ортопедической помощи населению Российской Федерации в 2020 году. М.: 2022:114-117.
3. Середа А.П., Кочиш А.А., Черный А.А. и др. Эпидемиология эндопротезирования тазобедренного и коленного суставов и перипротезной инфекции в Российской Федерации. *Травматология и ортопедия России*. 2021;27(3):84-93. doi: 10.21823/2311-2905-2021-27-3-84-93.
4. Шубняков И.И., Риахи А., Денисов А.О. и др. Основные тренды в эндопротезировании тазобедренного сустава на основании данных регистра артропластики НМИЦ ТО им. Р.Р. Вредена с 2007 по 2020 г. *Травматология и ортопедия России*. 2021;27(3):119-142. doi: 10.21823/2311-2905-2021-27-3-119-142.
5. Harwin SF, Sodhi N, Ehirorbo J, et al. Outcomes of Dual Mobility Acetabular Cups in Total Hip Arthroplasty Patients. *Surg Technol Int*. 2019;34:367-370.

6. Kelmer G, Stone AH, Turcotte J, King PJ. Reasons for revision: primary total hip arthroplasty mechanisms of failure. *J Am Acad Orthop Surg.* 2021;29(2):78-87. doi: 10.5435/JAAOS-D-19-00860.
7. The Swedish Arthroplasty Register. Annual Report. 2022:125-169. Available from: <https://registercentrum.blob.core.windows.net/refdocs/10.18158/BklrLg8NOo.pdf>.
8. Шубняков И.И., Тихилов Р.М., Денисов А.О. и др. Что изменилось в структуре ревизионного эндопротезирования тазобедренного сустава в последние годы? *Травматология и ортопедия России.* 2019;25(4):9-27. doi: 10.21823/2311-2905-2019-25-4-9-27.
9. Wu H, Meng Z, Pan L, et al. Plasma Fibrinogen Performs Better Than Plasma d-Dimer and Fibrin Degradation Product in the Diagnosis of Periprosthetic Joint Infection and Determination of Reimplantation Timing. *J Arthroplasty.* 2020;35(8):2230-2236. doi: 10.1016/j.arth.2020.03.055.
10. Loppini M, Pisano A, Di Maio M, et al. Outcomes of patients with unexpected diagnosis of infection at total hip or total knee arthroplasty revisions. *Int Orthop.* 2021;45(11):2791-2796. doi: 10.1007/s00264-021-05137-8.
11. Вороков А.А., Бортулев П.И., Хайдаров В.М. и др. Эндопротезирование тазобедренного и коленного суставов: показания к операции. *Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста.* 2020;8(3):355-364. doi: 10.17816/PTORS34164.
12. Кочиш А.А., Божкова С.А., Артюх В.А. и др. Совершенствование периоперационного ведения пациентов при санирующих операциях по поводу перипротезной инфекции в области тазобедренного сустава. *Травматология и ортопедия России.* 2021;27(1):143-152. doi: 10.21823/2311-2905-2021-27-1-143-152.
13. Казанцев Д.И., Божкова С.А., Золовкина А.Г. и др. Диагностика поздней перипротезной инфекции крупных суставов. Какой диагностический алгоритм выбрать? *Травматология и ортопедия России.* 2020;26(4):9-20. doi: 10.21823/2311-2905-2020-26-4-9-20.
14. Пантелеев А.Н., Божкова С.А., Преображенский П.М., Каземирский А.В. Возможности выявления латентной ППИ при ревизионном эндопротезировании коленного сустава. *Гений ортопедии.* 2021;27(5):562-569. doi: 10.18019/1028-4427-2021-27-5-562-569.
15. Рожков Н.И., Ермаков А.М., Тряпичников А.С., Сазонова Н.В. Лечение пациентов с перипротезной инфекцией и замещением кавитарных дефектов типа 2С по Pargosky на этапе установки артикулирующего спейсера. *Гений ортопедии.* 2024;30(5):706-716. doi: 10.18019/1028-4427-2024-30-5-706-716.
16. Линник С.А., Оришак Е.А., Нилова Л.Ю. и др. Оптимизация диагностики перипротезной инфекции при нестабильности эндопротеза тазобедренного и коленного суставов. *Физическая и реабилитационная медицина.* 2024;6(2):51-59. doi: 10.26211/2658-4522-2024-6-2-51-59.
17. Пантелеев А.Н., Божкова С.А., Тихилов Р.М. и др. Экстренное гистологическое исследование в диагностике перипротезной инфекции при ревизионном эндопротезировании коленного сустава. *Гений ортопедии.* 2023;29(2):180-189. doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-2-180-189.
18. Гайковская Л.Б., Афанасьева Н.Л., Ткаченко А.Н. и др. Прогностические гематологические маркеры инфекции области хирургического вмешательства при эндопротезировании тазобедренных суставов. *Профилактическая и клиническая медицина.* 2021;1:82-99. doi: 10.47843/2074-9120_2021_1_82.
19. Преображенский П.М., Божкова С.А., Каземирский А.В. Расчет индекса коморбидности как фактора риска рецидива перипротезной инфекции после установки спейсера коленного сустава. *Травматология и ортопедия России.* 2022;28(1):7-18. doi: 10.17816/2311-2905-1718.
20. Линник С.А., Оришак Е.А., Нилова Л.Ю. и др. Роль низковирулентной инфекции в развитии нестабильности эндопротеза тазобедренного сустава. *Физическая и реабилитационная медицина.* 2024;6(3):20-34. doi: 10.26211/2658-4522-2024-6-3-20-34.
21. Николаев Н.С., Пчелова Н.Н., Преображенская Е.В. и др. «Неожиданные» инфекции при асептических ревизиях. *Травматология и ортопедия России.* 2021;27(3):56-70. doi: 10.21823/2311-2905-2021-27-3-56-70.
22. Касимова А.Р., Кочиш А.А., Гордина Е.М. и др. Mycobacterium abscessus как возбудитель перипротезной инфекции. *Гений ортопедии.* 2023;29(5):557-564. doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-5-557-564.
23. Любимова Л.В., Божкова С.А., Пчелова Н.Н. и др. Роль культуroneгативной инфекции в структуре инфекционных осложнений после эндопротезирования коленных суставов. *Гений ортопедии.* 2023;29(4):402-409. doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-4-402-409.
24. Любимова Л.В., Пчелова Н.Н., Николаев Н.С. и др. Перимплантная инфекция у пациентов с ревматоидным артритом на примере серии случаев. *Гений ортопедии.* 2024;30(4):552-560. doi: 10.18019/1028-4427-2024-30-4-552-560.
25. Николаев Н.С., Пчелова Н.Н., Преображенская Е.В. и др. «Неожиданные» инфекции при асептических ревизиях. *Травматология и ортопедия России.* 2021;27(3):56-70. doi: 10.21823/2311-2905-2021-27-3-56-70.
26. Божкова С.А., Ливенцов В.Н., Тихилов Р.М. и др. Белково-энергетическая недостаточность как предиктор ранних повторных ревизий после санирующих операций у пациентов с трудноизлечимой перипротезной инфекцией. *Травматология и ортопедия России.* 2022;28(1):39-45. doi: 10.17816/2311-2905-1717.
27. 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.
28. Силантьева Т.А., Ермаков А.М., Ключин Н.М., Тряпичников А.С. Гистологическая оценка перипротезной инфекции с использованием шкалы HOES и анализа экспрессии CD15 при ревизионном эндопротезировании тазобедренного сустава. *Травматология и ортопедия России.* 2021;27(2):84-98. doi: 10.21823/2311-2905-2021-27-2-84-98.
29. Артюх В.А., Божкова С.А., Бояров А.А. и др. Эффективность одноэтапного ревизионного эндопротезирования при свищевой форме хронической перипротезной инфекции тазобедренного сустава. *Травматология и ортопедия России.* 2021;27(2):9-22. doi: 10.21823/2311-2905-2021-27-2-9-22.
30. Тряпичников А.С., Ермаков А.М., Силантьева Т.А., Бурцев А.В. Эффективность хирургической обработки с сохранением имплантата при лечении ранней послеоперационной и острой гематогенной перипротезной инфекции тазобедренного сустава. *Травматология и ортопедия России.* 2021;27(2):23-33. doi: 10.21823/2311-2905-2021-27-2-23-33.
31. Шипицына И.В., Спиркина Е.С. Антибактериальное действие полупроводникового лазера в отношении бактерий *S. aureus* и *P. aeruginosa*, ведущих возбудителей остеомиелита. *Гений ортопедии.* 2024;30(5):670-676. doi: 10.18019/1028-4427-2024-30-5-670-676.
32. Пантелеев А.Н., Божкова С.А., Тихилов Р.М. и др. Экстренное гистологическое исследование в диагностике перипротезной инфекции при ревизионном эндопротезировании коленного сустава. *Гений ортопедии.* 2023;29(2):180-189. doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-2-180-189.
33. Дмитриев И.А., Загородний Н.В., Оболенский В.Н. и др. Диагностика и лечение перипротезной инфекции после эндопротезирования тазобедренного сустава (обзор литературы). *Вестник медицинского института "РЕАВИЗ": реабилитация, врач и доктор.* 2022;12(6):86-102. doi: 10.20340/vmi-rvz.2022.6.CLIN.7.

34. Inagaki Y, Uchihara Y, Munemoto M, et al. Correlation of histological and microbiological findings in septic and aseptic knee implant failure. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2019;139(5):717-722. doi: 10.1007/s00402-019-03159-x.
35. Линник С.А., Афиногенова А.Г., Афиногенов Г.Е. и др. Обоснование выбора спейсера на первом этапе лечения поздней глуктозой перипротезной инфекции коленного сустава. *Гений ортопедии.* 2023;29(2):173-179. doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-2-173-179.

Статья поступила 11.11.2024; одобрена после рецензирования 06.05.2025; принята к публикации 05.06.2025.

The article was submitted 11.11.2024; approved after reviewing 06.05.2025; accepted for publication 05.06.2025.

Информация об авторах:

Станислав Антонович Линник — доктор медицинских наук, профессор кафедры, stanislavlinnik@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4840-6662>;

Елена Александровна Оришак — кандидат медицинских наук, доцент кафедры, elena.orishak@szgmu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4562-4402>;

Артем Михайлович Ермаков — доктор медицинских наук, руководитель клиники, ema_cab@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5420-4637>;

Иван Олегович Кучеев — кандидат медицинских наук, заведующий отделением, 9513533@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8557-8431>;

Людмила Юрьевна Нилова — кандидат медицинских наук, доцент кафедры, lyudmila.nilova@szgmu.ru, <https://orcid.org/0009-0005-8898-9152>;

Евгений Михайлович Фадеев — кандидат медицинских наук, доцент кафедры, evgenii.fadeev@szgmu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8428-0876>;

Георги Карагезов — врач — травматолог-ортопед, karagezov_87@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5234-1697>;

Дмитрий Юрьевич Коршунов — заведующий отделением, dmi02041976@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0005-9819-0598>;

Ярослав Борисович Цоллоло — ассистент кафедры, yaroslav.tsololo@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7744-0002>;

Вадим Владимирович Усиков — кандидат медицинских наук, доцент кафедры, vadim.usikov@szgmu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7642-4665>;

Андрей Васильевич Поликарпов — заведующий отделением, multifisher@mail.ru.

Information about the authors:

Stanislav A. Linnik — Doctor of Medical Sciences, Professor of the Department, stanislavlinnik@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4840-6662>;

Elena A. Orishak — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, elena.orishak@szgmu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4562-4402>;

Artem M. Ermakov — Doctor of Medical Sciences, Head of the Clinic, ema_cab@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5420-4637>;

Ivan O. Kucheev — Candidate of Medical Sciences, Head of the Department, 9513533@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8557-8431>;

Lyudmila Yu. Nilova — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, lyudmila.nilova@szgmu.ru, <https://orcid.org/0009-0005-8898-9152>;

Evgenii M. Fadeev — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, evgenii.fadeev@szgmu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8428-0876>;

Giorgi Karagezov — orthopaedic surgeon, karagezov_87@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5234-1697>;

Dmitrii Yu. Korshunov — Head of the Department, dmi02041976@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0005-9819-0598>;

Yaroslav B. Tsololo — Assistant Department, yaroslav.tsololo@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7744-0002>;

Vadim V. Usikov — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, vadim.usikov@szgmu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7642-4665>;

Andrey V. Polikarpov — Head of the Department, multifisher@mail.ru.

Original article

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-4-463-470>

Clinical and functional outcomes of acute distal tibia fractures treated with Ilizarov external fixation: a retrospective study

M. Dhawan¹, B. Nandan¹, M. Sch. Iqbal^{2✉}, S.K. Singh³, M. Prasad⁴

¹ Sir Ganga Ram Hospital, New Delhi, India

² INHS Asvini, Mumbai, India

³ Apex Hospital, Varanasi, India

⁴ Base Hospital Delhi Cantt, New Delhi, India

Corresponding author: Mohammed Schezan Iqbal, dr.schezaniqbal@gmail.com

Abstract

Introduction Distal tibia pilon fractures are complex injuries involving the tibial articular surface. Managing these fractures requires balancing stable fixation with soft tissue preservation. The Ilizarov technique offers a minimally invasive alternative to traditional open reduction and internal fixation (ORIF), allowing for gradual correction and early weight bearing.

This study **aimed** to evaluate functional and radiological outcomes in patients with distal tibia fractures managed by limited open reduction and Ilizarov fixation.

Materials and Methods The study was conducted in a tertiary care hospital's Department of Orthopaedics over two years. The inclusion criteria were patients aged >18 years with distal tibia fractures. Exclusion criteria included refracture, previous surgeries, and associated vascular injury. The study included 20 patients (18 males, 2 females) with a mean age of 39.2 ± 10.5 years. Most injuries (80 %) were due to road traffic accidents. Fracture patterns were classified according to the AO-OTA classification. The surgical procedure involved placing the patient supine under spinal anesthesia. Traction was applied, and fluoroscopy was used to assess reduction. A three-ring tibial Ilizarov frame was assembled and applied, with additional fixation for the calcaneum. The median time to full weight bearing was 26 days.

Results At frame removal, all cases had ankle stiffness, but two months post-removal, 85 % of cases had full ankle range of motion. The median time to frame removal was 17.5 weeks, and the median time to consolidation was 22 weeks. Patellar tendon bearing cast was applied for 3 weeks followed by a PTB brace with foot extension for the next 4 weeks.

Discussion The Ilizarov technique should be considered as a viable option, especially for complex fracture patterns or cases with compromised soft tissue envelopes not amenable to ORIF.

Conclusion The Ilizarov technique represents a valuable approach for managing distal tibia pilon fractures, demonstrating improved clinical outcomes and minimal complications.

Keywords: Ilizarov method, ankle fractures, pilon fractures, distal tibia fractures, clinical outcomes, functional outcomes

For citation: Dhawan M, Nandan B, Iqbal MSch, Singh SK, Prasad M. Clinical and functional outcomes of acute distal tibia fractures treated with Ilizarov external fixation: a retrospective study. *Genij Ortopedii*. 2025;31(4):463-470. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-463-470.

Научная статья

УДК 616.718.56-001.5-089.227.84-089.168

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-4-463-470>

Клинико-функциональные результаты лечения пациентов со свежими переломами дистального отдела большеберцовой кости с использованием аппарата Илизарова: ретроспективное исследование

M. Dhawan¹, B. Nandan¹, M. Sch. Iqbal^{2✉}, S.K. Singh³, M. Prasad⁴

¹ Sir Ganga Ram Hospital, New Delhi, India

² INHS Asvini, Mumbai, India

³ Apex Hospital, Varanasi, India

⁴ Base Hospital Delhi Cantt, New Delhi, India

Автор, ответственный за переписку: Mohammed Schezan Iqbal, dr.schezaniqbal@gmail.com

Аннотация

Введение. Переломы дистального отдела большеберцовой кости — это сложные травмы с вовлечением суставной поверхности большеберцовой кости. Лечение пациентов с такими переломами требует баланса между стабильной фиксацией и сохранением мягких тканей. Метод Илизарова предлагает минимально инвазивную альтернативу традиционной открытой репозиции и внутренней фиксации, позволяя проводить постепенную коррекцию и раннюю нагрузку.

Цель работы — оценка функциональных и рентгенологических результатов у пациентов с переломами дистального отдела большеберцовой кости, пролеченных методом ограниченной открытой репозиции и фиксации по Илизарову.

Материалы и методы. Исследование проводили в ортопедическом отделении больницы третьего уровня в течение двух лет. Критерии включения: пациенты в возрасте старше 18 лет с переломами дистального отдела большеберцовой кости. Критерии исключения: повторный перелом, предшествующие операции и сопутствующее сосудистое повреждение. В исследование включены 20 пациентов (18 мужчин, 2 женщины), возраст — $(39,2 \pm 10,5)$ лет. Большинство травм (80 %) были получены в результате дорожно-транспортных происшествий. Типы переломов классифицированы в соответствии с АО-ОТА. Операцию проводили под спинальной анестезией в положении пациента на спине. Применяли вытяжение, репозицию оценивали рентгенологически. Аппарат Илизарова состоял из трех кольцевых опор на голени с дополнительной фиксацией пяточной кости. Среднее время до полной нагрузки составило 26 дней.

Результаты. При снятии аппарата во всех случаях наблюдали ригидность голеностопного сустава, через два месяца после снятия в 85 % случаев восстановлен полный диапазон движений голеностопного сустава. Среднее время до снятия аппарата составило 17,5 недель, а среднее время до консолидации — 22 недели (гипсовая повязка с поддержкой надколенного сухожилия — 3 недели, фиксирующая повязка надколенного сухожилия с разгибанием стопы — 4 недели).

Обсуждение. Метод Илизарова следует рассматривать как приемлемый вариант, особенно при сложных типах переломов или случаях с поврежденными мягкими тканями, при которых не могут быть применены открытая репозиция и внутренняя фиксация.

Заключение. Метод Илизарова является эффективным при лечении пациентов с переломами дистального метаэпифиза большеберцовой кости, демонстрируя хорошие клинические результаты и минимальные осложнения.

Ключевые слова: метод Илизарова, переломы голеностопного сустава, переломы дистального суставного конца большеберцовой кости, переломы дистального отдела большеберцовой кости, клинические результаты, функциональные результаты

Для цитирования: Dhawan M., Nandan B., Iqbal M.Sch., Singh S.K., Prasad M. Клинико-функциональные результаты лечения пациентов со свежими переломами дистального отдела большеберцовой кости с использованием аппарата Илизарова: ретроспективное исследование. *Гений ортопедии*. 2025;31(4):463-470. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-463-470.

INTRODUCTION

Distal tibia pilon fractures are notoriously complex injuries, involving the articular surface of the tibia. Managing these fractures requires a delicate balance between achieving stable fixation and preserving soft tissue integrity. The Ilizarov technique allows for gradual correction, axial alignment, and controlled distraction osteogenesis. Unlike traditional open reduction and internal fixation (ORIF), which can be challenging in the presence of compromised soft tissues, the Ilizarov method offers a minimally invasive alternative [1]. Advantages of minimized soft tissue disruption, customizable alignment control, ligamentotaxis with biological stimulation and early weight-bearing, all combined to make it an attractive option in the management of these injuries [2].

Our aim was to observe functional and radiological outcomes in patients with distal tibia fractures managed by limited open reduction and Ilizarov fixation with follow-up at the time of frame removal and three months after frame removal. Our primary objectives were to assess the functional outcomes using the Olerud and Molander ankle score (OMAS) [3], and ASAMI Functional criteria [4]; and radiological outcomes using Teeny – Wiss radiological scoring system [5], time to consolidation with ASAMI Bone criteria [4]. Pain was assessed by visual analog score (VAS). Secondary objectives included assessment of complications including pin-tract infection, pin loosening, vascular/nerve injury, axial deviation, knee and ankle joint stiffness, skin necrosis, foot drop and post-operative stiffness.

MATERIALS AND METHODS

The present study was conducted in a tertiary care hospital at the Department of Orthopaedics over a two-year period from January 2022 to December 2023. All patients were operated on by a single senior surgeon at the Sir Ganga Ram Hospital. Ethical clearance was obtained from the Institutional Ethics Committee prior to the start of the study and written informed consent was obtained from the study participants. The inclusion criteria for our study were age >18 years, a history of distal tibia fracture (open or closed). Exclusion criteria were refracture of the distal tibia, previous surgeries in the affected ankle and any associated vascular injury. The study population was selected among the patients who were admitted with distal tibia fractures, intra-articular or extra-articular and provided a written informed consent to the operative procedure.

We had a total of 20 patients in our study. There were 18 (90 %) males and 2 (10 %) females. Their ages ranged between 24–57 years with a mean of 39.2 ± 10.5 years and median of 39 (30.5–45) years. Most injuries were secondary to road traffic accidents ($n = 16$; 80 %), followed by a fall from a height ($n = 4$; 20 %). Most of the injuries presented closed at the outset ($n = 12$; 60 %), followed by grade I open ($n = 6$; 30 %) and grade II open ($n = 2$; 10 %) as per the Gustilo – Anderson classification for open fractures. We did not encounter any grade III open injuries. Occupations of the study subjects included students ($n = 8$, 40 %), farmers ($n = 8$, 40 %) and business owners ($n = 4$, 20 %). None of the subject cohort had any pre-existing risk factor for delayed union or nonunion in the form of diabetes mellitus, smoking, malnutrition, or usage of anti-inflammatory medications at time of enrollment in the study. Distribution of the fracture pattern as per AO-OTA classification is detailed in Figure 1.

Pre-operative management

All patients presenting with an ankle injury were evaluated and resuscitated as per ATLS protocol, above knee splinting was performed, appropriate wound dressing was done for open injuries and radiographic imaging was carried out. Following imaging, fractures around the ankle joint were classified as per the OTA classification as 43-A, 43-B, and 43-C, based on the fracture configuration (Fig. 2). All subjects having an ankle fracture without significant comminution were subjected to an NCCT with 3D Reconstruction of the ankle for better understanding of the fracture pattern and planning of fixation. Ilizarov fixation was performed in all cases irrespective of blister formation or severe swelling, as wires and half-pins help in decompressing the compartment.

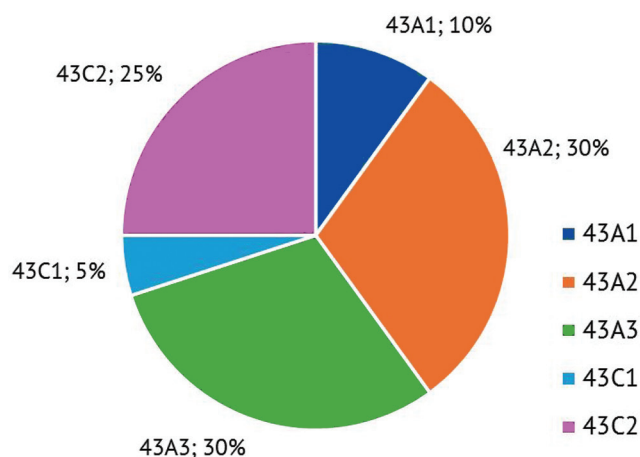


Fig. 1 Distribution of fracture patterns as per AO-OTA classification



Fig. 2. Fracture images: a — AP and lateral X-rays featuring a 43-C ankle fracture dislocation as per OTA classification; b — 3D CT scan of the fracture

Surgical Management

The patient was placed supine on a radiolucent table and procedure was performed under spinal anesthesia. The limb was prepared from the iliac crest till the foot and placed over bolsters. Traction was achieved by an assistant holding the heel and forefoot. Fluoroscopy was used for assessment of reduction achieved after traction and ligamentotaxis. With traction on, fibula was first fixed with an intramedullary 1.8-mm Ilizarov wire inserted from the tip of the lateral malleolus under an image intensifier to achieve length. Fixation of the fibula indirectly reduced tibial fragments in most cases. Distal tibial fracture reduction was carried out either closed using axial traction and push-pull technique using 3-mm K-wire as joystick or limited open reduction either anteriorly or posteriorly, depending on reduction of the articular block. Wherever needed, 4-mm partially threaded cannulated screws were used for articular block reconstruction (Fig. 3). The metaphyseal zone of the injury was not opened to preserve biology. A three-ring tibial Ilizarov frame was assembled on the table using two full rings for diaphyseal fixation and one full ring for epiphyseal fixation. One 5/8th ring was applied in the calcaneum in lieu of a foot frame, for an ankle spanning construct to achieve ankle diastasis and stability. The upper two diaphyseal rings were fixed using two to three 1.8-mm smooth wires and sometimes reinforced with one 5-mm Schanz pin. The third epiphyseal full ring was fixed with three 1.8-mm olive wires passed distal to the fracture site parallel to the ankle joint line with an intervening angle of at least 30 degrees and with one wire to fix the ankle syndesmosis. The wires were duly tensioned after insertion (Fig. 4, 5). All cases which were open fractures, underwent a thorough wound debridement with saline, povidone iodine and hydrogen peroxide, followed by either primary closure or repeat debridement and delayed primary closure. None of our patients underwent any reconstructive procedure in the form of skin grafting or flaps.

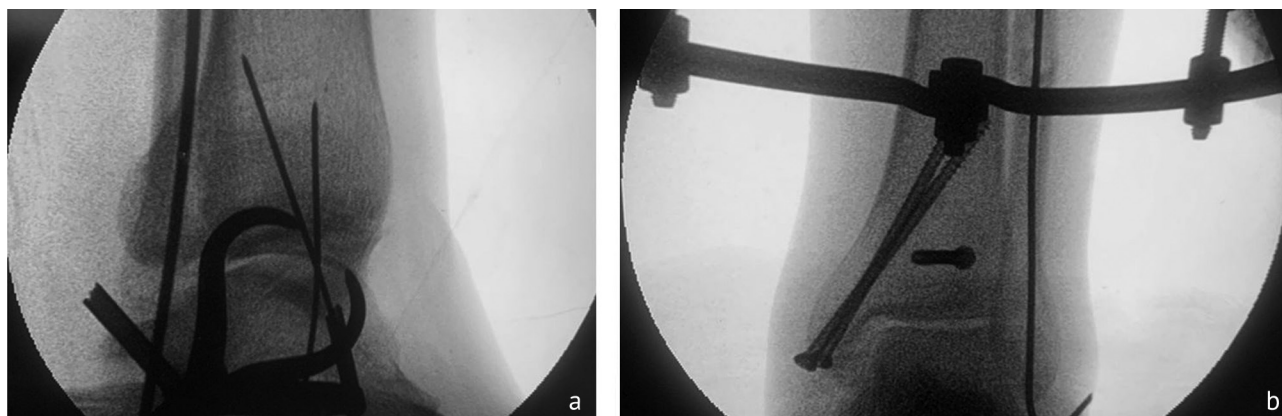


Fig. 3. Intraoperative images: a — lateral projection of the C-shaped arch of the fracture reduced by closed means and provisional fixation using K-wires; b — C-arm AP images of the fracture fixation using percutaneous means



Fig. 4. Clinical picture of the Ilizarov frame applied:
a — medial view;
b — anterior view



Fig. 5. Post-operative AP and lateral X-rays of the fracture fixation with the Ilizarov frame in situ

Post-operative management

Postoperatively, all patients were encouraged to perform active and passive toe and knee range of motion exercises. All wounds and pin-tracts were dressed using aseptic precautions. All patients started on Tab Aspirin 150 mg once a day for DVT prophylaxis. All patients were mobilized from post-operative day one, with those having OTA 43-A/B fractures allowed to bear weight as tolerated, and those with OTA 43-C fractures kept non-weight bearing for at least 8 weeks. Functional and radiological evaluation was done at 4 weeks, 8 weeks, at the time of frame removal and three months after frame removal. The end point for frame removal was determined by presence of bridging callus in at least three cortices in AP and lateral radiographs and by clinical impression of pain-free weight bearing following dynamization of the frame. Frame removal usually after 3–4 months was done in the operation theatre under sedation and a PTB (patellar tendon bearing) cast was applied for 3 weeks followed by a PTB brace with foot extension for the next 4 weeks.

Outcomes

The outcomes of the surgery were divided into functional and radiological outcomes. Functional outcome measures included assessment of active ankle range of motion, pain perception using Visual Analogue Scale (VAS) scores, ASAMI criteria for functional result and Olerud and Molander functional scoring system for ankle fractures. Radiological outcome measures were evaluated using Teeny – Wiss scoring criteria for radiological quality of reduction, time to bony consolidation and ASAMI criteria for bone result.

Statistical Analysis

Presentation of the categorical variables was done in the form of number and percentage. Quantitative data was presented as mean $\pm$ SD and as median with 25th and 75th percentiles (interquartile range). Data entry was done on a Microsoft Excel spreadsheet, and the final analysis was done using SPSS version 25 (SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA).

RESULTS

All patients were mobilized from the first post-operative day using a walker support. The median time to full weight-bearing was 26 (21.75–30) days (range, 21–36 days). At the time of frame removal, all cases had stiffness in the operated ankle. At three months post-frame removal, 17 (85.00 %) cases had full ankle ROM while 3 (15.00 %) cases had a terminal restriction of dorsiflexion. The median value of frame removal of our study subjects 17.5 (16–20) weeks (range: 14–22). Functional outcomes were evaluated in the form

Table 1
VAS Scores at time of last follow up
(three months post frame removal)

Variable	Median (25 th –75 th percentile)	Range
VAS score	2.5 (2–3)	2–5

Table 2
ASAMI Functional Outcome Scoring system
(three months post frame removal)

ASAMI functional outcome	Number of patients	Percentage
Fair	4	20.00 %
Good	10	50.00 %
Excellent	6	30.00 %
Total	20	100.00 %

The median time to consolidation (weeks) of study subjects was 22 (20–24.5) weeks (range, 16–28 weeks). Radiological outcomes were evaluated with ASAMI Bone Outcome Scoring system (Table 3) and Teeny – Wiss Scoring System (Fig. 7).

Table 3
ASAMI Bone Outcome Scoring system
(three months post frame removal)

ASAMI bone outcome	Number of patients	Percentage
Fair	2	10.00 %
Good	10	50.00 %
Excellent	8	40.00 %
Total	20	100.00 %

of VAS scores (Table 1), ASAMI Functional Outcome Scoring system (Table 2) and Olerud and Molander Ankle Scoring system (Fig. 6).

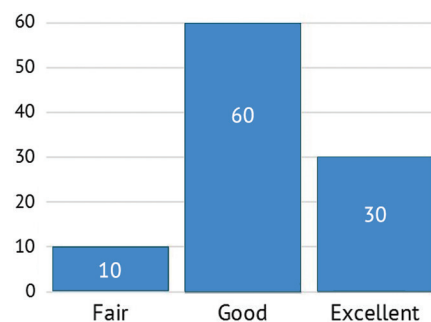


Fig. 6. Olerud and Molander Ankle Scoring system
(three months post frame removal)

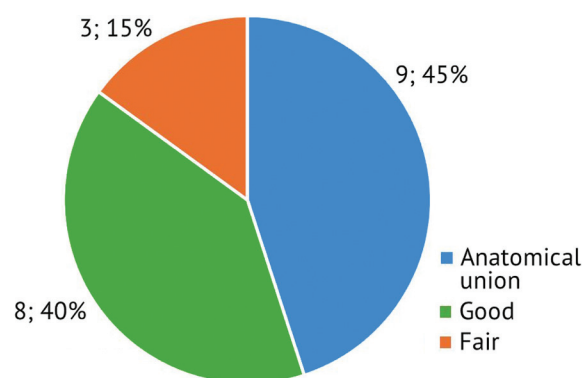


Fig. 7. Teeny – Wiss Scoring System (three months post frame removal)

Additional procedures at the time of primary application of the Ilizarov fixator were done as follows: three cases required primary bone grafting at the tibial pilon fracture site for maintaining subchondral support for impaction fracture patterns. We encountered post-operative complications in 12 cases. Two cases developed features of Complex Regional Pain Syndrome Type-1 at frame removal, which were subsequently managed with medications. Eight cases developed pin-tract infection, despite adequate knowledge and application of pin-tract care; seven of whom were managed with local pin-site debridement and short course of oral antibiotics and one required frame re-application due to pin-tract infection and pin loosening in most of the pins. One patient developed a delayed union which was managed using compression and distraction at the fracture site (accordion maneuver) and local infiltration of autologous bone marrow concentrate injection and went on to complete union. None of our cases developed DVT, nonunion, malunion, limb length discrepancy or rotational malalignment and none of our cases required primary ankle arthrodesis or amputations.

DISCUSSION

Distal tibia fractures are a complex entity to treat [6]. Patients with these fractures are likely to develop complications post-intervention in this area with a relatively poor soft tissue envelope. A rise in rate of complications has been reported following internal fixation in this region compared with other anatomical sites. The application of Ilizarov fixator as a definite treatment for distal tibia fractures has profoundly changed their prognosis. Application of circular frame can be performed in all cases, irrespective of blister formation or severe swelling, as wires and half pins help in decompressing the compartment. By preventing soft tissue stripping needed for open reduction, the procedure minimizes soft tissue injury, decreases rate of infection, and allows early recovery. Our findings are consistent with existing literature in reporting an acceptable functional and radiological outcome following Ilizarov fixation for management of this entity.

Our study included 20 patients with a mean age of 39.2 ± 10.5 years, predominantly male (90 %). This demographic profile is consistent with other studies, such as W. Osman et al. [7] which reported a mean age of 47 years with 87 % male patients. However, our cohort was slightly younger than the study by V.P. Giannoudis et al. [8], which had a median age of 44 years (IQR 34–55). The predominance of high-energy trauma, particularly road traffic accidents (80 % in our study), aligns with global trends reported in the literature. This is similar to the findings of W. Osman et al., where 15 out of 30 fractures were due to road traffic accidents [7].

Our study utilized the AO/OTA classification, with a distribution of 43A, 43B, and 43C fractures. This is comparable to other studies, though some, like W. Osman et al. [7], used the Rüedi and Allgöwer classification. V.P. Giannoudis et al. [8] reported 63 % intra-articular fractures in their series, which is similar to our findings of 65 % intra-articular fractures.

Bony union in our series was achieved in all except one patient in their initial frame and the patient with delayed union went on to achieve bony union following the accordion maneuver and local infiltration of bone marrow concentrate. The median time to consolidation in our study was 22 weeks, with frame removal at a median of 17.5 weeks. This is comparable to the range reported by other studies using the Ilizarov method for distal tibia fractures. For instance, J.J. Guo et al. [9] reported an average union time of 23.4 weeks in their series while W. Osman et al. [7] reported frame removal at a mean of 22 weeks. However, our time to union was shorter than that reported by V.P. Giannoudis et al. [8], who found a median time to union of 166.5 days (approximately 24 weeks). This difference could be due to variations in the definition of union, differences in patient populations, differences in weight-bearing protocols, rehabilitation, and follow-up. Previous meta-analyses also suggest union rates in our series compare favorably with patients treated for distal tibial fracture by internal fixation, with union occurring in 91–98 %. Such results are difficult to interpret due to the varied patient profiles and treatment methods undertaken, making pooled analysis difficult and its results potentially inaccurate [8].

The median time to full weight-bearing in our study was 26 days, which is notably earlier than some other studies. For instance, V.P. Giannoudis et al. [8] reported that weight-bearing was often restricted for the first 6–8 weeks in complex intra-articular fractures and T. Ramos et al. [10] reported weight-bearing at an average of 6 weeks postoperatively. This early mobilization is a significant advantage of the Ilizarov method, potentially contributing to faster rehabilitation [2].

Our study used the Olerud & Molander Ankle Scoring system for functional assessment, with 70 % of patients achieving excellent or good outcomes; these are comparable to other studies using external fixation methods. This is comparable to W. Osman et al. [7], who reported 73 % excellent or good results using the AOFAS score and slightly better than V.P. Giannoudis et al. [8], who reported 62 % good or excellent ankle scores at more than 6 months post frame removal [3]. However, they slightly outperform some internal fixation studies, such as the one by A. Korkmaz et al. [11], which reported 63 % excellent or good results. The ASAMI functional outcome scores, with 90 % excellent or good results, are particularly impressive and align with the upper range of outcomes reported in the literature for complex distal tibia fractures. The difference obtained in our study could be attributed to variations in scoring systems, patient populations, variations in surgical technique, such as the use of additional internal fixation or the specific configuration of the Ilizarov frame.

The Teeny – Wiss Scoring System results in our study, with 80 % of cases achieving good or excellent reduction, are comparable to or better than many studies using other fixation methods for complex distal tibia fractures. W. Osman et al. [7] reported excellent and good restoration of articular structure in 24 out of 30 cases.

Our overall complication rate (60 %) is higher than some reports in the literature, primarily due to pin tract infections (40 %). This is higher than the 33 % pin site infection rate reported by V.P. Giannoudis et al. [8]. However, our study had no cases of deep infection, osteomyelitis, or non-union, which is better than some reported series. For instance, W. Osman et al. [7] reported two cases of delayed union, which we did not encounter in our series. Our study may have included a higher proportion of complex fractures, leading to a higher complication rate but potentially better functional outcomes due to more meticulous management. Our study may also have used a broader definition of pin tract infections, leading to a higher reported rate.

Although we were able to assess the functional and radiological outcomes of distal tibia fractures based on available scientific literature, our study did have some limitations, notably:

1. Small sample size: The study included only 20 patients, which limits the statistical power and generalizability of the results.
2. Lack of a control group: The study did not include a control group or compare the Ilizarov method to other treatment options, making it difficult to determine the relative efficacy of this approach.
3. Heterogeneity of fracture types: The study included both intra-articular and extra-articular fractures, which may respond differently to treatment and complicate the interpretation of results.
4. Potential for recall bias: Some outcome measures were collected retrospectively, which could introduce recall bias in patient-reported outcomes.

Future research with larger sample sizes, control groups, and more comprehensive outcome measures would be beneficial to further evaluate the efficacy of the Ilizarov method for distal tibia fractures.

CONCLUSION

The Ilizarov technique represents a valuable approach for managing distal tibia pilon fractures. Our study findings align with existing evidence, demonstrating improved clinical outcomes and minimal complications. The higher complication rate but better functional outcomes in our study highlight the importance of meticulous technique and patient selection in achieving optimal results with this challenging injury. Surgeons should consider this technique as a viable option, especially when dealing with the cases of a complex fracture pattern or those with compromised soft-tissue envelope which are not amenable to ORIF.

Conflicts of Interest None to declare.

Sources of Funding None to declare.

REFERENCES

1. Kapoor SK, Kataria H, Patra SR, Boruah T. Capsuloligamentotaxis and definitive fixation by an ankle-spanning Ilizarov fixator in high-energy pilon fractures. *J Bone Joint Surg Br.* 2010;92(8):1100-1106. doi: 10.1302/0301-620X.92B8.23602.
2. Vasiliadis ES, Grivas TB, Psarakis SA, et al. Advantages of the Ilizarov external fixation in the management of intra-articular fractures of the distal tibia. *J Orthop Surg Res.* 2009;4:35. doi: 10.1186/1749-799X-4-35.
3. Olerud C, Molander H. A scoring scale for symptom evaluation after ankle fracture. *Arch Orthop Trauma Surg (1978).* 1984;103(3):190-194. doi: 10.1007/BF00435553.
4. Paley D, Catagni MA, Argnani F, Villa A, Benedetti GB, Cattaneo R. Ilizarov treatment of tibial nonunions with bone loss. *Clin Orthop Relat Res.* 1989;(241):146-165.
5. Teeny SM, Wiss DA. Open reduction and internal fixation of tibial plafond fractures. Variables contributing to poor results and complications. *Clin Orthop Relat Res.* 1993;(292):108-117.
6. Galante VN, Vicenti G, Corina G, et al. Hybrid external fixation in the treatment of tibial pilon fractures: A retrospective analysis of 162 fractures. *Injury.* 2016;47 Suppl 4:S131-S137. doi: 10.1016/j.injury.2016.07.045.
7. Osman W, Alaya Z, Kaziz H, et al. Treatment of high-energy pilon fractures using the ILIZAROV treatment. *Pan Afr Med J.* 2017;27:199. doi: 10.11604/pamj.2017.27.199.11066.
8. Giannoudis VP, Ewins E, Taylor DM, et al. Clinical and Functional Outcomes in Patients with Distal Tibial Fracture Treated by Circular External Fixation: A Retrospective Cohort Study. *Strategies Trauma Limb Reconstr.* 2021;16(2):86-95. doi: 10.5005/jp-journals-10080-1516.
9. Guo JJ, Tang N, Yang HL, Tang TS. A prospective, randomised trial comparing closed intramedullary nailing with percutaneous plating in the treatment of distal metaphyseal fractures of the tibia. *J Bone Joint Surg Br.* 2010;92(7):984-988. doi: 10.1302/0301-620X.92B7.22959.
10. Ramos T, Karlsson J, Eriksson BI, Nistor L. Treatment of distal tibial fractures with the Ilizarov external fixator--a prospective observational study in 39 consecutive patients. *BMC Musculoskelet Disord.* 2013;14:30. doi: 10.1186/1471-2474-14-30.
11. Korkmaz A, Ciftedemir M, Ozcan M, et al. The analysis of the variables, affecting outcome in surgically treated tibia pilon fractured patients. *Injury.* 2013;44(10):1270-1274. doi: 10.1016/j.injury.2013.06.016.

The article was submitted 03.02.2025; approved after reviewing 02.04.2025; accepted for publication 05.06.2025.

Статья поступила 03.02.2025; одобрена после рецензирования 02.04.2025; принята к публикации 05.06.2025.

Information about the authors:

Manish Dhawan — Professor (Dr), MBBS, DNB (Orthopaedics), MNAMS, MCh (Orthopaedics). Head of Orthopaedics, drmanishdawan@gmail.com;

Brajesh Nandan — Dr, MBBS, MS (Orthopaedics), Senior consultant, brajesh.nandan@yahoo.com;

Mohammed Schezan Iqbal — Surgeon Commander (Dr), MBBS, MS (Orthopaedics), Associate Professor, dr.schezaniqbal@gmail.com;

Sanjeev Kumar Singh — Dr, MBBS, DNB (Orthopaedics), Consultant, sanjeev10079@gmail.com;

Manish Prasad — Col (Dr), VSM, MBBS, DNB (Orthopaedics), Professor, monu60@gmail.com.

Contribution of the authors:

Manish Dhawan — Development of the concept and design of study.

Brajesh Nandan — Research coordination, interpretation and analysis of data obtained.

Mohammed Schezan Iqbal — Collecting and processing material, conducting research, preparing text.

Sanjeev Kumar Singh — Collection of material and data pertaining to research.

Manish Prasa — Analysis, interpretation and editing.

Original article

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-4-471-477>

The incidence and risk factors related to post-operative dysphagia after anterior cervical spine surgery: a prospective study

J. Singh, N. Singh, P. Gupta✉, B. Kapil

GGS Medical College and Hospital, Faridkot, Punjab, India

Corresponding author: Pranav Gupta, pranavchd88@gmail.com

Abstract

Introduction Post-surgical dysphagia is one complication particularly common in early postoperative period after Anterior cervical spine surgery (ACSS). However, the pathophysiology of dysphagia after surgery has not been well understood.

This study **aimed** to analyse the frequency and risk factors for developing dysphagia following ACSS and find an effective program to prevent and treat.

Materials and methods A prospective observational study was conducted on 50 patients undergoing ACSS from April 2021 to Oct 2022 at the Department of Orthopedics, Guru Gobind Singh Medical College and Hospital, Punjab (India). Patients were in the age group of 27 to 60 years. The indications for cervical surgeries were traumatic, degenerative, infective and neoplastic involving C2 to C7 vertebra with signs of neural compression unresponsive to conservative treatment. Data on patient age, gender, duration of surgery, intraoperative blood loss, segment operated and the number of segments operated were collected. Follow up time was 24 weeks.

Results Incidence of dysphagia was 20 % (10/50) within first week which reduced to zero at completion of six months of follow-up. Dysphagia was present in 2 % (1/50) patients in age group 21–40 years and 18 % (9/50) patients in age group of 41–60 years. 14.6 % (6/41) males and 44 % (4/9) of females had dysphagia. Prevalence of dysphagia in patients with one affected segment was 9.5 % (4/42), two segments was 80 % (4/5) and three segments was 50 % (1/2). Mean duration of surgery in patients with post-operative dysphagia was 115 mins. Mean blood loss in patients with post-operative dysphagia was 171.40 mL. Mean Et (endotracheal) tube cuff pressure in patients with post-operative dysphagia was 24.70 cm H₂O. Within the first week of surgery, there were 10 cases out of which one was mild, six were moderate and three were severe.

Conclusion Despite the fact that some inconsistency is there in the literature regarding risk factors it can be safely concluded from our study that incidence of post-operative dysphagia can be reduced by decreasing blood loss during surgery, reducing surgery time and optimizing Endotracheal tube cuff pressure during surgery.

Keywords: Anterior cervical spine surgery, Blood loss, Cuff pressure, Dysphagia

For citation: Singh J, Singh N, Gupta P, Kapil B. The incidence and risk factors related to post-operative dysphagia after anterior cervical spine surgery: a prospective study. *Genij Ortopedii*. 2025;31(4):471-477. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-471-477.

Научная статья

УДК 616.711.1-089.168.1-06:616.321-008.17]-07

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-4-471-477>



Частота и факторы риска развития дисфагии после операции на переднем шейном отделе позвоночника: проспективное исследование

J. Singh, N. Singh, P. Gupta✉, B. Kapil

GGS Medical College and Hospital, Faridkot, Punjab, India

Автор, ответственный за переписку: Pranav Gupta, pranavchd88@gmail.com

Аннотация

Введение. Дисфагия — осложнение после операции на переднем шейном отделе позвоночника (англ.: anterior cervical spine surgery, ACSS, наиболее распространенное в раннем периоде, патофизиология которого недостаточно изучена.

Цель работы — анализ частоты и факторов риска развития дисфагии после ACSS и поиск эффективной программы ее профилактики.

Материалы и методы. В проспективное наблюдательное исследование включены 50 пациентов (41 мужчина и девять женщин), которым проведены ACSS с апреля 2021 года по октябрь 2022 года в отделении ортопедии Guru Gobind Singh Medical College and Hospital (Пенджаб, Индия). Возраст пациентов — от 27 до 60 лет. Показания к операции: не поддающиеся консервативному лечению травматические, дегенеративные, инфекционные и опухолевые заболевания, затрагивающие позвонки C2–C7, с признаками компрессии нервов. Проанализированы данные: возраст пациента, пол, продолжительность операции, интраоперационная кровопотеря, оперированные сегменты, в том числе их количество. Время наблюдения — 24 недели.

Результаты и обсуждение. Частота возникновения дисфагии составила 20 % (10 пациентов) в течение первой недели и снизилась до нуля по завершении шести месяцев наблюдения. Дисфагия присутствовала у одного (2 %) пациента возрастной группы 21–40 лет и девяти (18 %) пациентов возрастной группы 41–60 лет, у шести (14,6 %) мужчин и четырех (44 %) женщин. Дисфагия у пациентов с одним пораженным сегментом зарегистрирована в 9,5 % случаев (4/42), с двумя сегментами — в 80 % случаев (4/5), с тремя сегментами — в 50 % случаев (1/2). У пациентов с послеоперационной дисфагией средняя продолжительность операции составила 115 минут, средняя кровопотеря — 171,40 мл, среднее давление в манжете эндотрахеальной трубки — 24,70 см H₂O. Среди 10 случаев послеоперационной дисфагии, встретившихся в течение первой недели, один был легким, шесть умеренными и три тяжелыми. В литературе есть некоторая непоследовательность относительно факторов риска послеоперационной дисфагии.

Заключение. Частоту послеоперационной дисфагии можно снизить за счет уменьшения операционной кровопотери, сокращения продолжительности оперативного вмешательства и оптимизации давления в манжете эндотрахеальной трубки во время операции.

Ключевые слова: операция на переднем шейном отделе позвоночника, кровопотеря, давление манжеты, дисфагия

Для цитирования: Singh J., Singh N., Gupta P., Kapil B. Частота и факторы риска развития дисфагии после операции на переднем шейном отделе позвоночника: проспективное исследование. *Гений ортопедии*. 2025;31(4):471-477. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-471-477.

INTRODUCTION

Various cervical spine pathologies including trauma and degenerative spinal diseases require Anterior cervical spine surgery (ACSS) [1]. The anterior approach is secure, fruitful, and rate of morbidity and mortality are low. However, a number of complications associated with the anterior approach have been described [2]. Dysphagia is one such complication particularly common in early postoperative period [3]. It is mild to moderate in majority of patients and is transient in nature and resolves gradually within three months of surgery [4, 5]. Its incidence varies in the literature from 1 % to 79 % [6]. Dysphagia can prolong the period of hospital stay and also influence the quality of life of patients in terms of food which patient can eat and difficulty in talking to another person [7]. However, its pathophysiology has not been well understood. There are various factors which lead to dysphagia after ACSS which include operative time, use of instrumentation, design and thickness of plate, extent and duration of intraoperative retraction, endotracheal tube cuff pressure, use of steroids, number of levels operated, revision versus primary surgery leading to wide variation in incidence rates of dysphagia [8]. Other risk factors, such as gender, tobacco consumption, smoking and intraoperative blood loss have also been associated with postoperative dysphagia [9].

This study aimed to analyze the frequency and risk factors for developing swallowing difficulty following anterior cervical spine procedures and find an effective program to prevent and treat. This article was previously posted to the Research Square preprint server on June 13, 2023.

MATERIALS AND METHODS

A prospective observational study was conducted on 50 patients undergoing ACSS from April 2021 to Oct 2022 at the Department of Orthopedics, Guru Gobind Singh Medical College and Hospital, a tertiary care center in Punjab (India). Patients were in the age group of 27 to 60 years and were admitted on first come basis. All patients were assessed clinically based on MRC power grading. Radiologic diagnoses were established in each patient through routine preoperative cervical radiographs and cervical magnetic resonance imaging and computed tomography scans and these were correlated with clinical findings to single out the level of surgery. The indications for cervical surgeries were traumatic, degenerative, infective and neoplastic involving C2 to C7 vertebra with signs of neural compression unresponsive to conservative treatment.

Exclusion criteria were: (i) Patients having preoperative dysphagia; (ii) those with history of previous ACSS; (iii) associated cervical deformity, severe osteoporosis, ankylosing spondylitis and rheumatoid arthritis; (iv) those with history of smoking and tobacco usage.

There were 41 male and 9 female patients in our study with an average age of 49 years. Approval for this study was obtained from the institutional review board. Written informed consent was taken from every patient included in our study. All surgeries were performed at a single institution. All patients were operated under GA which included use of an inflated endotracheal cuff, pressure of which was noted in every surgery. Every individual in this study underwent anterior cervical decompression using Smith-Robinson approach followed by removal of cartilaginous end plates and use of structural autograft bone to achieve fusion followed by anterior plate and screw fixation (Fig. 1, 2). The type of plate was standardized for this study and did not vary from patient to patient except for the length of the plate. Wound was closed over drain which was removed on second postoperative day or when the drain output was less than 30 mL. Postoperatively cervical spine was immobilized in a rigid cervical collar. We recorded the length of each surgical procedure from incision to closure time. Intra operative steroid used was confirmed from anesthetist. On post-operative day one, patient was started on liquid diet and progressed to semi solid and solid food according to patient comfort on consecutive days.

Patients were split into two group, one had patients with postoperative dysphagia and the other did not. Data on patient gender, age, duration of surgery, surgery blood loss, segment operated and the number of segments operated were collected (Table 1). Follow up time was 24 weeks. Post-operative assessment of dysphagia was done within the first week post surgery followed by 12 weeks and 24 weeks by asking the patient at each visit "Do you have any pain, sticky throat feeling or choking when swallowing solid or liquid food?". If the patient responded that they were symptomatic, then further information was obtained to determine the level of severity. The Bazaz grading system is commonly employed to evaluate the severity of dysphagia and so was used in our study [8]. The system defines four grades: none, mild, moderate, and severe dysphagia based on the subjective symptoms. Patients with no episodes of swallowing difficulty were graded as having "none". Patients who experienced rare episodes of dysphagia and did not feel that their dysphagia was a significant problem were graded as "mild". "Moderate" dysphagia was defined as occasional swallowing difficulty with specific foods (ie, bread or meats). "Severe" dysphagia was defined as frequent difficult swallowing with a majority of foods which included liquids (Table 2).



Fig. 1. Illustrating cervical plate positioned at desired level fixed with screws of appropriate length



Fig. 2. X-rays of the cervical spine: a — in the direct (anteroposterior); b — lateral projections respectively after ACDF

Table 1

Table showing incidence of post-operative dysphagia with respect to various different parameters

Parameters		Postop Dysphagia Present	Postop Dysphagia Absent	P value
Age Group (Years)	21–40	1	14	0.12
	41–60	9	26	
Gender	Male	6	35	0.04
	Female	4	5	
No of levels	1	4	38	0.0001
	2	4	1	
	3	2	1	
Operated Levels	At or above C4–C5	3	13	0.11
	Below C4–C5	1	25	
Mean Duration of Surgery (mins)		91.25	115	0.006
Mean Blood Loss (ml)		130.8	171.4	0.0006
Mean ET tube cuff pressure (cm H ₂ O)		22.7	24.7	0.000023

Table 2

Table showing grades of post-operative dysphagia with number of dysphagia cases at each follow up

Grades of Dysphagia	No of Cases		
	Within first week	12 weeks	24 weeks
None	40	46	50
Mild	1	1	0
Moderate	6	3	0
Severe	3	0	0

RESULTS

The study included 50 patients. Within first week of surgery, the incidence of dysphagia was 20 % (10/50) which reduced to zero at completion of six months of follow-up. The average age in our study was 49 years. According to age group, dysphagia was present in 2 % (1/50) patients in age group 21–40 years and 18 % (9/50) patients in age group of 41–60 years, but difference was not found to be statistically significant (P value = 0.12). Ratio of male to female was 4:1 (40 males, 10 females). 14.6 % (6/41) males and 44 % (4/9) of females had dysphagia and the difference between the two groups was found to be statistically significant (P value = 0.04).

According to the number of levels that were operated, prevalence of dysphagia in patients involving one level was 9.5 % (4/42), two levels was 80 % (4/5) and three levels was 50 % (1/2) and the difference between the three groups was found to be statistically significant. (P value = 0.0001). To assess if surgical level played a role, we evaluated the prevalence of dysphagia after single-level procedures at C4–5 and above (upper cervical segment) and prevalence of dysphagia after single-level procedures below C4–C5 (lower cervical segment). Patients in which upper cervical segment was operated accounted for 18.8 % (3/16) of dysphagia

cases while patients in which lower cervical segment was operated constituted only 3.8 % (1/26) of cases. Thus, cases were more in patients in which upper cervical segment was involved, however, the difference between the two groups was not found to be statistically significant (P value = 0.11).

Similarly, we performed additional statistical analysis to determine association of duration of surgery, blood loss, endotracheal cuff pressure on incidence of dysphagia in immediate postoperative period. Mean duration of surgery in patients with post-operative dysphagia was 115 mins and mean duration of surgery in patients without post-operative dysphagia was 91.25 mins and this difference was significantly higher (P value = 0.006). Mean blood loss in patients with post-operative dysphagia was 171.40 mL which was significantly higher than mean blood loss in patients without post-operative dysphagia was 130.8 mL (P value = 0.0006).

Mean Et (endotracheal) tube cuff pressure in patients with post-operative dysphagia was 24.70 cm H₂O which was also significantly higher than mean Et tube cuff pressure in patients without post-operative dysphagia which was 22.70 cm H₂O (P value = 0.00023).

Severity of dysphagia was also assessed based on the time that has passed after surgery. Within the first week of surgery, there were 10 cases of dysphagia out of which one was mild, six were moderate and three were severe. After 12 weeks, there were one mild, three moderate and zero severe cases of dysphagia. 24 weeks after surgery, prevalence of dysphagia cases was zero. Thus, there was a declining trend in the number of cases of dysphagia as well as severity of cases as the duration of follow up increased (Table 2).

DISCUSSION

Anterior approach to the cervical spine has served well in treating many spinal pathologies from diverse etiologies like degenerative, traumatic, oncologic, inflammatory, and congenital [9]. Although morbidity and mortality rate associated with ACSS is less, dysphagia is very likely to occur [9]. It has been postulated that oesophageal oedema and traction injury of the nerves involved in the swallowing mechanism are to blame [10].

Several studies have reported the risk factors associated with dysphagia after ACSS, but the results showed wide-range of variations and hardly could draw any firm conclusions [10]. Most common factors associated are advanced age (aged > 60 years), female gender, increase number of operated levels and increased operative time [11]. M.J. Lee et al. carried out a study with two years follow up, and found that apart from the above mentioned factors, revision surgeries were also risk factors for dysphagia after ACSS [12].

Older patients (aged > 60 years) are at increased risk for postoperative dysphagia [7]. Although authors of several studies found no correlation between age and dysphagia, study by S. Kalb et al. found that the mean age of dysphagic and nondysphagic patients was significantly different (55 and 50 years, respectively, P = 0.05) [9]. This could be explained by anatomic and physiological changes seen in elderly patients like weakening of swallowing muscles, decrease in salivary secretions and decrease in elasticity of oesophagus [14]. In our study also, 34.6 % (9/26) of patients in age group 41–60 years had post-operative dysphagia while only 7.1 % (1/14) of patients in age group 21 to 40 years had postoperative dysphagia, however the difference was not statistically significant (P value = 0.12).

Gender is another factor found to predispose the patient to dysphagia post cervical spine surgery. In a few studies the prevalence of dysphagia has been greater in women than men as the former have small anatomical structures, weak muscle strength and higher pain sensitivity [4, 9, 15]. In a study by M.J. Lee et al. the frequency of dysphagia was more in females (18.3 %) than males (9.9 %) two years after the surgery [12]. R. Bazaz et al. in his study reported that though the frequency of dysphagia was not significantly different between men and women in the 1–2 months postoperatively, but in the sixth month of follow-up, the incidence was 24.7 % in women, while 11.7 % in men and this difference was significant (P = 0.023) [16]. In our study, incidence of dysphagia among females (44.4 % i.e. 4/9) was more compared to males (14.6 % i.e. 6/41) at the first follow-up and the difference was also statistically significant (P value = 0.04) thus showing that female gender is a risk factor.

The cervical levels involved have also been evaluated to determine whether they have a part in the occurrence of postoperative dysphagia. In upper cervical spine, retropharyngeal space is more than inferior cervical spine due to which soft tissue swelling is more severe, which makes the postoperative dysphagia aggravate [12]. Another reason for increased dysphagia rates in upper cervical spine is that the superior laryngeal nerve sometimes becomes visible when surgical site is at the level of C3/4 or C2/3, due to which chances of causing superior laryngeal nerve damage increases [17]. Chin et al. also found that highest level of plate position at C3 had proportionately increased prevalence of dysphagia than surgery at C4 and below [18]. Many other studies have shown that surgery at a higher level (C3–C4) where there is a smaller soft-tissue envelope would result in increased dysphagia rates [12]. However, study conducted by M.J. Lee et al. did not support these findings [12]. We also studied the difference in frequency of dysphagia cases post single-level procedures

at upper and lower cervical segment. Patients in which upper cervical segment was operated, prevalence of dysphagia was 18.8 % (3/16) while patients in which lower cervical segment was operated, prevalence was 3.8 % (1/26), however the difference was not statistically significant (P value = 0.11).

In comparative studies conducted after ACSS, post-operative dysphagia was commonly seen with multiple level surgeries as it increases retraction time, prolongs surgery time and leads to more soft tissue swelling [5]. Similarly in a study by S. Kalb et al. on an average, dysphagic patients had 2.2 levels operated as opposed to 1.84 in non dysphagic patients [9]. L.H. Riley et al. found that incidence of postoperative dysphagia in the patients with two or three surgical segments were higher than one segment [1]. In study by M.J. Lee et al., prevalence ratio suggested that patients with surgery at three or more levels are almost twice as likely to experience long-term dysphagia than patients with surgery at less than three levels [12]. M.J. Lee et al. and R. Bazaz et al. found that patients who underwent ACSS at multiple level had a significant risk of swallowing difficulty in contrast to those who underwent surgery at single-level at four and eight weeks follow-up [12, 16]. A. Frempong-Boadu et al. too showed that ACSS done at multiple level showed an increased frequency of postoperative swallowing difficulty as compared to those who underwent single level surgery [19]. In the present study, swallowing abnormality was present in 9.5 % (4/42) of patients operated at single level, 80 % (4/5) of patients operated through two levels and 50 % (1/2) of patients operated through 3 levels and the difference between the three groups was found to be statistically significant (P value = 0.0001).

Time span of procedure was another factor which was examined in this study. Increased duration of surgery leads to traction on trachea and esophagus for extended duration which makes soft tissue swelling escalate. Therefore, the incidence of post-operative dysphagia rises [20]. In a study by A. Yoshizawa et al. duration of surgery more than 200 min was associated with post-operative dysphagia [21]. In a similar study by R. Xue et al. more operation time (P value = 0.012) was associated with increased prevalence of post-operative dysphagia [21]. In our study, mean duration of surgery in patients with post-operative dysphagia was 115 mins which was significantly higher than mean duration of surgery in patients without post-operative dysphagia was 91.25 mins (P value = 0.006).

Blood loss during surgery is another risk factor whose association with dysphagia was looked for. In a study conducted by A. Yoshizawa et al. blood loss more than 100 ml was associated with post-operative dysphagia [21]. In a similar study by L.H. Riley et al. blood loss superior to 300 ml was associated with an enhanced risk of dysphagia following ACSS [1]. In our study, mean blood loss in patients with post-operative dysphagia was 171.40 ml which was significantly higher compared to patients without post-operative dysphagia in which postoperative blood loss was 130.84 ml (P value = 0.0006).

Observing the endotracheal tube cuff pressure is recommended during ACSS [22]. Keeping the pressure between 15 and 25 cm H₂O is considered important for preventing post-surgical dysphagia [23]. Pressures below 15 cm H₂O can lead to gas leakage and aspiration, while pressures more than 25–30 cm H₂O may cause decrease in tracheal wall capillary blood flow leading to mucosal ischemia, tracheomalacia, tracheal stenosis, tracheal rupture, and tracheoesophageal fistula due to a [23]. In the study by Ural et, risk of developing post-surgical dysphagia significantly decreased with an endotracheal cuff pressure of 20 cm H₂O compared to 25 cm H₂O [3]. G. Grasso et al. reported a significant reduction in the rate of early dysphagia when the cuff pressure was reduced [24]. In our study, mean Et tube Cuff pressure in patients with post-operative dysphagia was 24.70 cm H₂O which was significantly more than mean Et tube cuff pressure in patients without post-operative dysphagia which was 22.70 cm H₂O (P value = 0.00023). Thus, mean Et tube cuff pressure is an essential risk factor to be taken care of during ACSS.

Swallowing difficulties after ACSS are usually transient in nature. J.A. Rihn et al found that the prevalence of dysphagia had declined to 8 % at 12 weeks [5]. Similarly, R. Bazaz et al. reported that the frequency decreased to 50.2 % at one month post-operatively, and decreased further to 32.2 %, 17.8 % and 12.5 % by two, six and twelve months postoperatively, respectively [16]. A prospective study by M.J. Lee et al. found a similar decreasing incidence of 54.2 %, 33.6 %, 18.6 %, and 13.6 % at one, two, six and 12 months postoperatively, respectively [12]. Our own study observed an initial incidence of dysphagia of 20 % within the first week after surgery, which subsequently decreased to 8 % at the 12 week mark and zero at 24 weeks which is comparable to the above-mentioned studies. Thus prevalence of dysphagia following ACSS was high initially, but gradually decreased in both incidence and severity over time, indicating it as a common early complication.

However, there are several limitations in this study. Firstly, the study had a limited sample size due to which accuracy and efficacy of our results on dysphagia assessment were not high enough. A randomized control studies with a larger sample size and a long-term follow-up is necessary to further determine the outcomes. Secondly, the dysphagia was reported just basing on the subjective feeling of patients, which may not be completely reliable as it is not a universally accepted method for determining and measuring dysphagia. Moreover in our study we had majority of patients with single level operated. This selection bias could be eliminated by more randomized controlled studies in future.

CONCLUSION

Discomfort in swallowing after ACSS is a relatively usual phenomenon within the first week of surgery. It is, nevertheless temporary with maximum number of cases settling within 3 months. Despite the fact that some inconsistency is there in the literature regarding risk factors it can be safely concluded from our study that incidence of post-operative dysphagia can be reduced by decreasing blood loss, reducing surgery time and optimizing Endotracheal tube cuff pressure during surgery.

Conflict of interest Not declared.

Funding Not declared.

REFERENCES

- Riley LH 3rd, Vaccaro AR, Dettori JR, Hashimoto R. Postoperative dysphagia in anterior cervical spine surgery. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2010;35(9 Suppl):S76-85. doi: 10.1097/BRS.0b013e3181d81a96.
- Joaquim AF, Murar J, Savage JW, Patel AA. Dysphagia after anterior cervical spine surgery: a systematic review of potential preventative measures. *Spine J*. 2014;14(9):2246-2260. doi: 10.1016/j.spinee.2014.03.030.
- Ural SG, Tor IH. Effects of different endotracheal tube cuff pressures on dysphagia after anterior cervical spine surgery. *Cukurova Med J*. 2022;47(2):614-621. doi: 10.17826/cumj.1049742.
- Yue WM, Brodner W, Highland TR. Persistent swallowing and voice problems after anterior cervical discectomy and fusion with allograft and plating: a 5- to 11-year follow-up study. *Eur Spine J*. 2005;14(7):677-682. doi: 10.1007/s00586-004-0849-3.
- Rihn JA, Kane J, Albert TJ, et al. What is the incidence and severity of dysphagia after anterior cervical surgery? *Clin Orthop Relat Res*. 2011;469(3):658-665. doi: 10.1007/s11999-010-1731-8.
- Cho SK, Lu Y, Lee DH. Dysphagia following anterior cervical spinal surgery: a systematic review. *Bone Joint J*. 2013;95-B(7):868-873. doi: 10.1302/0301-620X.95B7.31029.
- Tsalimas G, Evangelopoulos DS, Benetos IS, Pneumaticos S. Dysphagia as a Postoperative Complication of Anterior Cervical Discectomy and Fusion. *Cureus*. 2022;14(7):e26888. doi: 10.7759/cureus.26888.
- Anderson KK, Arnold PM. Oropharyngeal Dysphagia after anterior cervical spine surgery: a review. *Global Spine J*. 2013;3(4):273-286. doi: 10.1055/s-0033-1354253.
- Kalb S, Reis MT, Cowperthwaite MC, et al. Dysphagia after anterior cervical spine surgery: incidence and risk factors. *World Neurosurg*. 2012;77(1):183-187. doi: 10.1016/j.wneu.2011.07.004.
- Rieger A, Brunne B, Hass I, et al. Laryngo-pharyngeal complaints following laryngeal mask airway and endotracheal intubation. *J Clin Anesth*. 1997;9(1):42-37. doi: 10.1016/S0952-8180(96)00209-7.
- Chaudhary SK, Bin Y, Fumin P, et al. Postoperative dysphagia as a complication of anterior cervical spine surgery. *Int J Curr Research*. 2017;9(5):51365-51372.
- Lee MJ, Bazaz R, Furey CG, Yoo J. Risk factors for dysphagia after anterior cervical spine surgery: a two-year prospective cohort study. *Spine J*. 2007;7(2):141-147. doi: 10.1016/j.spinee.2006.02.024.
- Liu JM, Tong WL, Chen XY, et al. The incidences and risk factors related to early dysphagia after anterior cervical spine surgery: A prospective study. *PLoS One*. 2017;12(3):e0173364. doi: 10.1371/journal.pone.0173364.
- Wirth R, Dziewas R, Beck AM, et al. Oropharyngeal dysphagia in older persons - from pathophysiology to adequate intervention: a review and summary of an international expert meeting. *Clin Interv Aging*. 2016;11:189-208. doi: 10.2147/CIA.S97481.
- Zeng JH, Zhong ZM, Chen JT. Early dysphagia complicating anterior cervical spine surgery: incidence and risk factors. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2013;133(8):1067-1071. doi: 10.1007/s00402-013-1773-y.
- Bazaz R, Lee MJ, Yoo JU. Incidence of dysphagia after anterior cervical spine surgery: a prospective study. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2002;27(22):2453-2458. doi: 10.1097/00007632-200211150-00007.
- Wu B, Song F, Zhu S. Reasons of Dysphagia After Operation of Anterior Cervical Decompression and Fusion. *Clin Spine Surg*. 2017;30(5):E554-E559. doi: 10.1097/BSD.0000000000000180.
- Chin KR, Eiszner JR, Adams SB Jr. Role of plate thickness as a cause of dysphagia after anterior cervical fusion. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2007;32(23):2585-2590. doi: 10.1097/BRS.0b013e318158dec8.
- Frempong-Boadu A, Houten JK, Osborn B, et al. Swallowing and speech dysfunction in patients undergoing anterior cervical discectomy and fusion: a prospective, objective preoperative and postoperative assessment. *J Spinal Disord Tech*. 2002;15(5):362-368. doi: 10.1097/00024720-200210000-00004.
- Xue R, Ji ZY, Cheng XD, et al. Risk Factors for Dysphagia after Anterior Cervical Discectomy and Fusion with the Zero-P implant system: A Study with Minimum of 2 Years Follow-up. *Orthop Surg*. 2022;14(1):149-156. doi: 10.1111/os.13170.
- Yoshizawa A, Nakagawa K, Yoshimi K, et al. Analysis of swallowing function after anterior/posterior surgery for cervical degenerative disorders and factors related to the occurrence of postoperative dysphagia. *Spine J*. 2023;23(4):513-522. doi: 10.1016/j.spinee.2022.12.010.
- Ratnaraj J, Todorov A, McHugh T, et al. Effects of decreasing endotracheal tube cuff pressures during neck retraction for anterior cervical spine surgery. *J Neurosurg*. 2002;97(2 Suppl):176-179. doi: 10.3171/spi.2002.97.2.0176.
- Hockey CA, van Zundert AA, Paratz JD. Does objective measurement of tracheal tube cuff pressures minimise adverse effects and maintain accurate cuff pressures? A systematic review and meta-analysis. *Anaesth Intensive Care*. 2016;44(5):560-570. doi: 10.1177/0310057X1604400503.
- Grasso G, Leone L, Torregrossa F. Dysphagia Prevention in Anterior Cervical Discectomy Surgery: Results from a Prospective Clinical Study. *World Neurosurg*. 2019;125:e1176-e1182. doi: 10.1016/j.wneu.2019.01.273.

The article was submitted 18.02.2025; approved after reviewing 31.03.2025; accepted for publication 05.06.2025.

Статья поступила 18.02.2025; одобрена после рецензирования 31.03.2025; принята к публикации 05.06.2025.

Information about the authors:

Jagdeep Singh — Associate Professor (Orthopaedics), jagatwal83@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1508-2745>;

Navpreet Singh — Junior Resident (Orthopaedics), Navpreetsingh66@gmail.com;

Pranav Gupta — Assistant Professor (Orthopaedics), pranavchd88@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4936-1950>;

Bansal Kapil — Professor (Orthopaedics), kapilortho@gmail.com.

Научная статья

УДК 616.718.41-007.24-089.85]-089.168

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-4-478-486>



Результаты применения внутрисуставных и комбинированных вмешательств у пациентов с ишемической деформацией головки бедра

М.П. Тепленький, В.С. Бунов, А.В. Акимова✉, Э.М. Парфёнов

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

Автор, ответственный за переписку: Алина Викторовна Акимова, fu-fu.psinka.16@mail.ru

Аннотация

Введение. Внесуставные операции для коррекции ишемических деформаций головки бедра недостаточно эффективны. В настоящее время применяют внутрисуставные способы коррекции, среди которых одним из наиболее эффективных методов признается уменьшающая остеотомия головки бедра.

Цель работы — оценить результаты применения внутрисуставных и комбинированных вмешательств у пациентов с ишемической деформацией головки бедра.

Материалы и методы. В исследование включены пациенты с ишемической деформацией головки и проксимального отдела бедренной кости ($n = 15$), распределенные на две группы. В первой группе ($n = 7$) больным выполняли уменьшающую остеотомию головки по методике Ganz в изолированном виде. Пациентам второй группы ($n = 8$) дополнительно проводили операцию на одном или обоих суставных компонентах: корригирующую межвертельную остеотомию бедра, остеотомию таза или комбинированное вмешательство. Сустав фиксировали аппаратом Илизарова.

Результаты. Средний показатель по критериям D'Aubigne – Postel в первой группе составил $(14,7 \pm 0,3)$ балла, во второй группе — $(15,0 \pm 0,2)$ балла. При анализе рентгенометрических данных после лечения у пациентов обеих групп установлено достоверное улучшение показателей, характеризующих сферичность и степень центрации головки. Рентгенологические результаты пациентов первой группы: хороший результат — 3 сустава (43 %), удовлетворительный — 3 сустава (43 %), неудовлетворительный — 1 сустав (14 %); второй группы: хороший результат — 3 сустава (38 %), удовлетворительный — 4 сустава (50 %), неудовлетворительный — 1 сустав (12 %).

Обсуждение. Одновременно с уменьшающей остеотомией головки допускается выполнение дополнительных оперативных вмешательств, направленных на устранение нестабильности тазобедренного сустава. Проведение уменьшающей остеотомии головки в условиях функционирующей ростковой зоны признается дискутабельным.

Заключение. Внутрисуставные вмешательства, позволяющие изменить форму и улучшить конгруэнтность суставных поверхностей, в определенных клинических ситуациях могут быть альтернативой раннему эндопротезированию у подростков и молодых взрослых.

Ключевые слова: ишемическая деформация головки бедренной кости, ацетабулярная дисплазия, уменьшающая остеотомия головки, femoral head reduction osteotomy

Для цитирования: Тепленький М.П., Бунов В.С., Акимова А.В., Парфёнов Э.М. Результаты применения внутрисуставных и комбинированных вмешательств у пациентов с ишемической деформацией головки бедра. *Гений ортопедии*. 2025;31(4):478-486. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-478-486.

Original article

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-4-478-486>



Results of intra-articular and combined interventions in patients with ischemic deformity of the femoral head

M.P. Teplenkiy, V.S. Bunov, A.V. Akimova✉, E.M. Parfenov

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

Corresponding author: Alina V. Akimova, fu-fu.psinka.16@mail.ru

Abstract

Introduction Extra-articular operations for correction of ischemic deformities of the femoral head are not effective enough. Currently, intra-articular correction methods are used, among which one of the most effective methods is considered to be reduction osteotomy of the femoral head.

Purpose The aim of the work is to evaluate the results of intra-articular and combined interventions in patients with ischemic deformity of the femoral head.

Materials and methods The study included patients with ischemic deformity of the head and proximal femur ($n = 15$), divided into two groups. In the first group ($n = 7$), the patients underwent reduction osteotomy of the head using only the Ganz technique. Patients of the second group ($n = 8$) additionally underwent surgery on one or both joint components: corrective intertrochanteric osteotomy of the femur, pelvic osteotomy, or combined intervention. The joint was fixed with the Ilizarov apparatus.

Results The average D'Aubigne-Postel score in the first group was (14.7 ± 0.3) points, in the second group — (15.0 ± 0.2) points. When analyzing the radiometric data after treatment, a reliable improvement in the parameters characterizing the sphericity and the degree of head centralization was recorded in patients of both groups. Radiographic results of patients in the first group: good result — 3 joints (43 %), fair — 3 joints (43 %), poor — 1 joint (14 %); the second group: good result — 3 joints (38 %), fair — 4 joints (50 %), poor result — 1 joint (12 %).

Discussion Simultaneously with the reduction osteotomy of the head, it is allowed to perform additional surgical interventions aimed at eliminating instability of the hip joint. Conducting a reducing osteotomy of the head in the conditions of a functioning growth plate is considered debatable.

Conclusion Intra-articular interventions that change the shape and improve the congruence of articular surfaces may be an alternative to early arthroplasty in adolescents and young adults in certain clinical situations.

Keywords: ischemic deformity of the femoral head, acetabular dysplasia, femoral head, reduction osteotomy

For citation: Teplenkiy MP, Bunov VS, Akimova AV, Parfenov EM. Results of intra-articular and combined interventions in patients with ischemic deformity of the femoral head. *Genij Ortopedii*. 2025;31(4):478-486. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-478-486.

ВВЕДЕНИЕ

Деформация головки бедренной кости является одним из неблагоприятных исходов ишемического поражения проксимального отдела бедра различного генеза [1, 2]. Наиболее частыми причинами данного состояния при лечении врожденной дисплазии тазобедренного сустава признают болезнь Легга – Кальве – Пертеса и асептический некроз головки бедренной кости [1, 2, 3]. Основными морфологическими признаками патологии считают асферичность и увеличение размера головки бедра [3]. Указанные изменения способствуют децентрации головки, формированию фемороацетабулярного импиджмента, который сопровождается нарушением функции сустава и болью [4]. Такое нарушение биомеханики сочленения вызывает повышение внутрисуставного давления и считается одной из ведущих причин раннего развития и быстрого прогрессирования коксартроза [5]. Внесуставные корригирующие операции на проксимальном отделе бедра могут улучшить центрацию головки и частично компенсировать внутрикапсулярные деформации. Однако их эффективность для коррекции деформации головки недостаточна [1, 6]. Для коррекции деформации головки преимущественно в сагиттальной плоскости может применяться хирургический вывих с остеохондропластикой [7]. Однако асферичность во фронтальной плоскости не может быть устранена резекцией из-за риска повреждения питающих ретинакулярных сосудов головки бедренной кости. Оптимальным вариантом в этом случае является уменьшающая остеотомия головки бедра [8, 9].

Цель работы — оценить результаты применения внутрисуставных и комбинированных вмешательств у пациентов с ишемической деформацией головки бедра.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование основано на ретроспективном изучении клинико-рентгенометрических характеристик и анализе результатов хирургического лечения пациентов с ишемическими деформациями головки бедра, прооперированных в период с 2014 г. по 2022 г. Срок наблюдения составлял $(4,6 \pm 0,3)$ года (от 2 до 10 лет).

Критерии включения: ишемические деформации головки, развившиеся вследствие дистрофических поражений тазобедренного сустава различного генеза, вызывающие нарушение суставных соотношений и формирование фемороацетабулярного импиджмента; выполнение уменьшающей остеотомии головки бедренной кости, срок наблюдения — более двух лет.

Критерии не включения: применение других внутрисуставных методик; использование исключительно внесуставных вмешательств; срок наблюдения — менее двух лет.

Пациенты с односторонним поражением сустава на момент проведения операции ($n = 15$) распределены на две группы с учетом объема выполненных оперативных вмешательств: первая группа — 7 пациентов ($14,0 \pm 0,2$) лет; вторая группа — 8 пациентов ($16,1 \pm 0,4$) лет. Пациентам первой группы выполнена уменьшающая остеотомия головки в изолированном виде, у пациентов второй группы дополнительно произведено внесуставное вмешательство на одном или обоих суставных компонентах. Распределение пациентов по полу и этиологическому фактору представлено в табл. 1.

Таблица 1

Распределение пациентов по этиологическому фактору и полу

Пол, этиология	1 группа ($n = 7$)		2 группа ($n = 8$)	
	абс.	%	абс.	%
Мальчики	5	33,3	5	33,3
Девочки	2	13,3	3	20,1
Болезнь Пертеса	3	20,1	3	20,1
Септический коксит	1	6,6	1	6,6
Асептический некроз вследствие лечения дисплазии т/б сустава			2	13,3
Асептический некроз вследствие лечения юношеского эпифизеолиза головки бедра	1	6,6		
Посттравматический асептический некроз			1	6,6
Идиопатический асептический некроз	2	13,3	1	6,6

Во всех наблюдениях выполнена уменьшающая остеотомия головки по методике Ganz (англ.: femoral head reduction osteotomy, HRO) [9, 12]. Производили остеотомию большого вертела, затем для сохранения кровоснабжения головки формировали мягкотканый лоскут. После выполнения хирургического вывиха бедра производили две остеотомии головки в сагиттальном направлении. Промежуточный фрагмент удаляли, оставшиеся костные фрагменты головки сопоставляли и фиксировали винтами. Затем производили вправление головки в вертлужную впадину. Сустав фиксировали аппаратом Илизарова в течение 30 дней. В изолированном виде данная операция проведена в семи наблюдениях (пациенты первой группы).

В трех случаях у пациентов второй группы дополнительно проведена корригирующая межвертельная остеотомия бедра. Показанием для ее выполнения было увеличение шеечно-диафизарного угла (два сустава) и ретроверсия эпифиза (один сустав). Межвертельную остеотомию выполняли одновременно с вмешательством на головке бедра. Срок фиксации аппаратом в этих случаях увеличивали до 45 дней. В трех наблюдениях дополнительно произведена остеотомия таза (пациенты второй группы). Показанием для ее выполнения была дисплазия вертлужной впадины (угол WBS $\geq 15^\circ$). Операцию на тазовой кости выполняли через две недели после операции на головке бедра. Срок фиксации аппаратом составил 50–55 дней. В двух случаях у пациентов второй группы дополнительные операции выполнены на обоих суставных компонентах.

В данном исследовании представлены только рентгенометрические результаты. Рентгенологическое исследование проведено на сертифицированном оборудовании (ФС № 2006/527). Данные рентгенографии приведены без указаний сведений о пациенте. Рентгенограммы тазобедренного сустава выполнены в передне-задней проекции до лечения и на последнем контрольном осмотре. Определены и проанализированы следующие рентгенометрические показатели: показатель экструзии головки (EI), индекс сферичности головки (HSI) [2], показатель ATD (артiculo-трохантерная дистанция), показатель краниального смещения (SL), угол латерального смещения (LDA-угол, образованный вертикальной линией, проведенной через фигуру «слезы» и линией, касательной к нижнемедиальному краю шейки, в норме $20\text{--}25^\circ$) [10], угол наклона опорной поверхности свода вертлужной впадины (WBS).

Оценку рентгенологических показателей производили по Kruczynski [10] и по методике НМИЦ ТО имени академика Г.А. Илизарова [11] (табл. 2). При оценке по Kruczynski учитывали прерывистость линии Шентона, угол латерального смещения, форму и центрацию головки. Оценку функциональных исходов производили по D'Aubigne – Postel.

Таблица 2

Оценка рентгенометрических результатов по методике НМИЦ ТО имени академика Г.А. Илизарова

Показатели	3 балла	2 балла	1 балл
Состояние головки	Структура и форма не изменились или улучшились	Ухудшилась форма головки бедра	Ухудшилась форма и структура головки бедра
ATD, мм	> 10	$0\text{--}10$	< 0
EI	$1,0\text{--}0,85$	$0,84\text{--}0,65$	$< 0,65$
HSI	$1,0\text{--}1,4$	$> 1,4$	$< 1,0$
LDA $^\circ$	< 20	$20\text{--}25$	> 25
SL, см	$< 0,5$	$0,5\text{--}1,0$	$> 1,0$
Степень артроза	Не изменилась	Ухудшилась на 1 степень	Ухудшилась более чем на 1 степень

Исследование проведено на базе НМИЦ ТО имени академика Г.А. Илизарова в соответствии с этическими стандартами Хельсинской декларации Всемирной медицинской ассоциации. От всех пациентов получено информированное согласие на проведение исследований без идентификации личности.

Статистический анализ полученных результатов исследования произведен с помощью программного обеспечения Microsoft Excel 2007. Из количественных данных составлены невзвешенные вариационные ряды. Определены средние, их ошибка и достоверность. Полученные данные обработаны с помощью методов непараметрической статистики с использованием U-критериев Вилкоксона, Манна – Уитни.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В первой группе пациентов продолжительность реабилитационного периода составила $(8,6 \pm 0,4)$ мес., во второй — $(10,2 \pm 0,3)$ мес.

При оценке функциональных результатов после лечения в обеих группах отмечено улучшение ходьбы (табл. 3). В первой группе у двух пациентов определены полное восстановление опороспособности нижней конечности и нормализация ходьбы. При оценке функции тазобедренного сустава выявлено улучшение показателей подвижности в обеих группах, при этом во второй группе средний показатель выше, чем в первой. Ограничение подвижности сустава в горизонтальной плоскости сохранилось во всех случаях. В первой группе амплитуда движений в сагитальной плоскости более 80° констатирована в четырех наблюдениях. В одном случае у пациента второй группы отмечено полное восстановление подвижности в сагитальной и фронтальной плоскости. В одном наблюдении у пациентки первой группы сохранилась разгибательная контрактура. Отсутствие болевого синдрома или его незначительный характер отмечали во всех случаях у пациентов второй группы и в шести случаях у первой.

Функциональные результаты первой группы по критериям D'Aubigne – Postel: хороший результат (15–18 баллов) достигнут в 3 случаях (42,86 %), удовлетворительный (12–14 баллов) — в 3 случаях (42,86 %), неудовлетворительный (11 баллов) — в 1 случае (14,28 %); во второй группе: хороший результат (15–18 баллов) — 4 наблюдения (50 %), удовлетворительный (12–14 баллов) — 4 наблюдения (50 %).

Таблица 3

Динамика функциональных показателей до и после лечения

Функциональный показатель	До лечения		После лечения	
	1 группа (n = 7)	2 группа (n = 8)	1 группа (n = 7)	2 группа (n = 8)
Средний показатель по шкале D'Aubigne – Postel, баллы	10,6 ± 0,2	10,3 ± 0,2	14,7 ± 0,3	15 ± 0,2
Болевой синдром, баллы	3,2 ± 0,1	3,4 ± 0,1	5 ± 0,3	5,5 ± 0,1
Средний показатель подвижности сустава, баллы	3,4 ± 0,3	3,4 ± 0,1	4,8 ± 0,3	5 ± 0,2
Показатель двигательной активности, баллы	3,8 ± 0,2	3,6 ± 0,2	5 ± 0,2	5,2 ± 0,2

При анализе рентгенометрических данных после лечения в обеих группах установлено достоверное улучшение показателей, характеризующих сферичность и степень центрации головки (табл. 4). Средний показатель индекса сферичности был выше в первой группе, различия между группами были статистически незначимыми. Форма головки в большинстве случаев стала овальной. Практически во всех наблюдениях уменьшилась степень экстрюзии: средняя величина EI в первой группе — 0,1 (0–0,15), во второй группе — 0,09 (0–0,12).

Показатель проксимального смещения достоверно улучшился в обеих группах и в 10 наблюдениях соответствовал норме (0 мм). Показатель латерального смещения достоверно улучшился только во второй группе. В первой группе статистически значимых изменений данного параметра после лечения не отмечено.

При анализе состояния проксимального отдела бедра в обеих группах отмечено достоверное улучшение соотношения между головкой бедра и вершущкой большого вертела. Однако нормальная величина показателя артикулотрохантерного расстояния констатирована только у двух пациентов второй группы. Средняя величина ATD в первой группе была 10,2 мм (5–13), во второй группе — 10,8 мм (7–16).

Таблица 4

Динамика рентгенометрических показателей

Показатель	1 группа (n = 7)		2 группа (n = 8)	
	Срок наблюдения			
	до операции	отдаленный результат	до операции	отдаленный результат
HSI	0,57 ± 0,06	0,79 ± 0,02*	0,55 ± 0,03	0,74 ± 0,02*
EI	0,31 ± 0,02	0,1 ± 0,03*	0,37 ± 0,03	0,09 ± 0,02*
SLI (мм)	8 ± 1,3	3 ± 1,2*	16,2 ± 1,6	4,4 ± 1,2*
LDA(°)	24,3 ± 1,9	21,5 ± 1	28,7 ± 3,8	22 ± 0,9*
WBS (°)	7,8 ± 1,2	7,6 ± 1,1	19,8 ± 1,5	9,3 ± 1,2*
ATD (мм)	3 ± 1,1	10,2 ± 1,3*	3,6 ± 1,8	10,8 ± 0,9*

Примечание: * — достоверные отличия от исходного показателя $P < 0,01$

Оценку рентгенологических результатов пациентов первой и второй группы производили по классификации Kruczynski и по критериям НМИЦ ТО имени академика Г.А. Илизарова (табл. 5)

Таблица 5

Оценка рентгенологических результатов пациентов

Критерии	1 группа (n = 7)		2 группа (n = 8)	
	абс.	%	абс.	%
Kruczynski				
хороший	4	57,1	4	50,0
удовлетворительный	3	42,9	4	50,0
НМИЦ ТО имени академика Г.А. Илизарова				
хороший	3	42,9	3	37,5
удовлетворительный	3	42,9	4	50
неудовлетворительный	1	14,2	1	12,5

Осложнения

У пациента 23 лет из первой группы при выполнении остеотомии головки произошел перелом шейки бедренной кости. Костные отломки фиксированы винтами. Указанное осложнение не оказало влияния на продолжительность аппаратного лечения и результат.

У пациентки 14 лет из второй группы выявлены рентгенологические признаки асептического некроза.

Через четыре года после оперативного лечения у пациентки первой группы обнаружены признаки прогрессирования артроза в виде субхондрального склероза и сужения суставной щели. Выраженный болевой синдром послужил показанием к эндопротезированию тазобедренного сустава.

Клинические примеры

Пациент первой группы 11 лет с ишемической деформацией головки правого бедра, сформировавшейся вследствие болезни Пертеса, IIIb стадия (рис. 1). Выполнены уменьшающая остеотомия головки правого бедра по методике Ganz и фиксация правого тазобедренного сустава аппаратом Илизарова в течение одного месяца.

Исходные функциональные показатели: болевой синдром — 4 балла, показатель подвижности — 2 балла, показатель двигательной активности — 3 балла. Рентгенологически выявлена деформированная уплощенная головка, индекс сферичности — 0,5, показатель экстррузии — 0,3, артикулотрохантерная дистанция — 5 мм, показатель краниального смещения — 7 мм.

Через девять лет у пациента полностью отсутствует болевой синдром (6 баллов), улучшилась походка (5 баллов), показатель подвижности сустава увеличился до 5 баллов, улучшилась сферичность головки (индекс сферичности — 0,8), увеличилось расстояние от вершины большого вертела до центра головки (9 мм), уменьшился показатель экстррузии (0,1) и краниального смещения (3 мм). Существенно не изменилась центрация головки в вертлужной впадине: угол наклона опорной поверхности свода вертлужной впадины (7° до и после операции) и угол латерального смещения (от 22° до 20°).

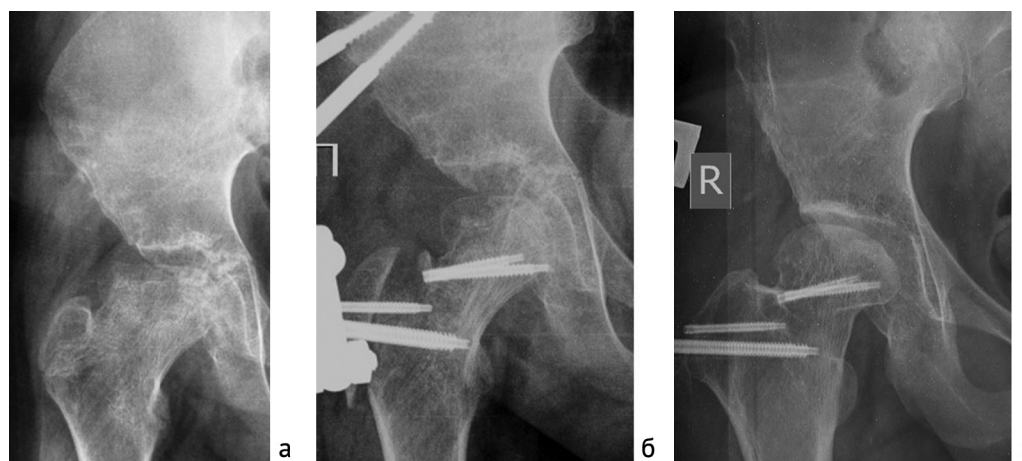


Рис. 1. Рентгенограммы пациента: а — до лечения; б — уменьшающая остеотомия головки бедра; в — результат через девять лет

Пациентка второй группы 13 лет с ишемической деформацией головки правого бедра вследствие асептического некроза головки, IV стадия (рис. 2). Произведена уменьшающая остеотомия головки правого бедра по Ganz, через 14 дней дополнительно выполнена остеотомия таза справа, тазобедренный сустав фиксирован аппаратом Илизарова в течение 50 дней.

Исходные функциональные показатели: болевой синдром — 3 балла, показатель подвижности — 2 балла, показатель двигательной активности — 3 балла. Рентгенологически выявлена деформированная уплощенная головка, высокое стояние вершины большого вертела, прерывистость линии Шентона. Индекс сферичности — 0,4, показатель экстррузии — 0,3, артикуло-трохантерная дистанция — 3 мм, показатель краниального смещения — 15 мм.

Через 10 лет у пациентки остался незначительный болевой синдром (5 баллов), улучшилась походка (6 баллов), увеличился показатель подвижности сустава до 4 баллов, индекс сферичности увеличился до 0,7, увеличилась артикуло-трохантерная дистанция (11 мм), уменьшился показатель экстррузии (0,08) и краниального смещения (4 мм). После выполнения остеотомии таза значительно изменился угол наклона опорной поверхности свода вертлужной впадины (от 19° до 8°) и угол латерального смещения (от 28° до 21°).

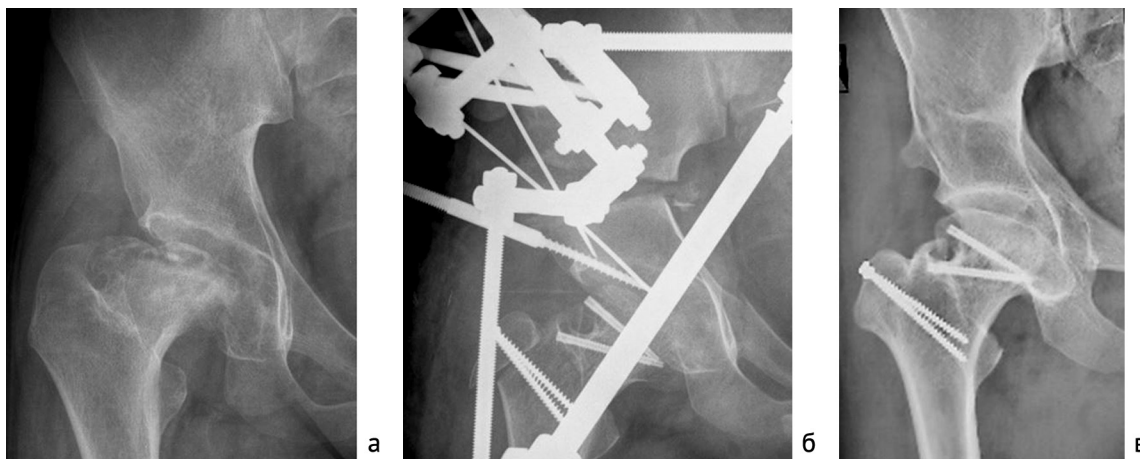


Рис. 2. Рентгенограммы пациентки: а — до лечения; б — уменьшающая остеотомия головки бедра, остеотомия таза; в — результат через 10 лет

ОБСУЖДЕНИЕ

Ишемическая деформация головки бедра в виде изменения ее сферичности и размера, вызывающая нарушение суставных соотношений, признается важной причиной раннего развития и быстрого прогрессирования артроза у лиц молодого возраста [1, 5, 14]. Возможности внесуставных реконструктивных вмешательств существенно ограничены [1, 6, 15, 16]. В этой ситуации большое значение приобретают внутрисуставные корригирующие вмешательства, направленные на изменение формы головки. К ним относятся остеохондропластика, хейлэктомия, уменьшающая остеотомия головки бедра [16, 17]. В данной работе представлены среднесрочные результаты применения НРО.

Ограничения данного исследования связаны с небольшим количеством пациентов и непродолжительным сроком наблюдения; проведен анализ рентгенометрических параметров, которые измеряли только по передне-задним рентгенограммам таза. Это связано с тем, что основной компонент деформации головки, на коррекцию которого направлено хирургическое лечение, был во фронтальной плоскости.

При сопоставлении функциональных результатов с данными других авторов следует отметить более низкий удельный вес (47 %) хороших результатов среди наших пациентов [1, 9, 18, 19, 20, 21]. Частота неудовлетворительных исходов (6 %) существенно не отличалась [1, 9, 18]. К. Siebenrock, анализируя результаты лечения 11 пациентов, отметил отсутствие достоверных отличий исходного и послеоперационного функционального состояния [1]. В наших группах дооперационный средний показатель по шкале D'Aubigne – Postel был существенно ниже и статистически значимо отличался от достигнутого функционального результата. Возможно, это связано с тем, что основной причиной развития деформации, по данным литературы, была болезнь Пертеса [3, 9, 12, 19, 21]. Удельный вес этой патологии среди этиологических факторов у наших пациентов составил только 40 %. В остальных наблюдениях имели место последствия асептического некроза другой этиологии, для которых характерны более выраженные функциональные и анатомические нарушения.

Согласно данным литературы, изменение формы и размера головки не всегда обеспечивают последующую стабильность сочленения [1, 3, 9, 18]. По мнению D. Paley, в данной ситуации возможно применение аппарата наружной фиксации [16, 18]. Большинство специалистов для коррекции нестабильности сустава рекомендуют применять внесуставные операции на суставных компонентах [1, 3, 14, 17]. Ряд авторов допускают их выполнение в отдаленный период при формировании подвывиха бедра [9, 18]. Согласно другой, более распространенной точке зрения, вмешательства на суставных компонентах следует производить одновременно с остеотомией головки [1, 3, 20, 21]. В анализируемой группе аппарат Илизарова применен во всех наблюдениях. Целью его использования была не компенсация сохранившейся нестабильности, а обеспечение декомпрессии тазобедренного сочленения и создание условий для нагрузки на конечность в послеоперационном периоде. Решение о необходимости выполнения дополнительных операций на суставных компонентах принимали в ходе предоперационного проектирования. Раздельное (с промежутком 2 нед.) выполнение остеотомии таза было обусловлено особенностями технологии этого вмешательства. Следует отметить, что среди пациентов первой группы, у которых не производили внесуставные дополнительные операции, не было отмечено признаков нестабильности сустава. Мы не выявили статистически значимых различий в функциональных и анатомических результатах при выполнении НРО в изолированном виде (1 группа) и при использовании комбинированных вмешательств (2 группа).

Одним из дискуссионных вопросов остается возможность выполнения уменьшающей остеотомии головки в условиях функционирующей ростковой зоны головки [1]. По мнению D. Paley, указанное состояние является относительным противопоказанием для применения данной операции [16, 18]. Согласно противоположной точке зрения, наличие ростковой зоны не оказывает существенного влияния на исход лечения [3, 20]. Ограниченное число наших наблюдений не дает возможности для объективного вывода. Однако следует отметить, что у всех четырех пациентов с функционирующей зоной роста головки достигнут хороший анатомо-функциональный результат.

Несмотря на агрессивность вмешательства, многие авторы отмечают низкий риск развития асептического некроза [1, 3, 9, 12, 19]. В анализируемой группе пациентов указанное осложнение отмечено в одном наблюдении. Возможно, причиной его были технические погрешности при выполнении внутрисуставного вмешательства.

Гетеротопическая оссификация считается одним из возможных неблагоприятных последствий уменьшающей остеотомии головки [1, 3]. В анализируемой группе указанного осложнения не отмечено. Интраоперационный перелом шейки бедра диагностирован у пациента 23 лет. По данным литературы, данное осложнение может быть причиной раннего эндопротезирования [18]. В условиях применения чрескостного остеосинтеза нарушение целостности шейки бедра не оказало никакого влияния на течение послеоперационного периода и исход лечения.

В одном наблюдении через 4 года после операции выполнено эндопротезирование сустава в связи с выраженными функциональными нарушениями (болевого синдрома). Аналогичные данные о конверсии на артропластику приводит D. Paley [16, 18].

Следует отметить, что большинство сообщений о применении HRO отличаются ограниченным количеством пациентов и небольшими сроками наблюдения [1, 3, 20, 21]. Поэтому вопросы влияния данного вмешательства на течение дегенеративно-дистрофического процесса в суставе требуют дальнейшего изучения.

Полученные предварительные результаты необходимы для планирования дальнейшего проведения исследования у большего числа испытуемых с более продолжительным сроком наблюдения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные предварительные результаты и данные литературы позволяют предположить, что внутрисуставные вмешательства, способствующие изменению формы и улучшению конгруэнтности суставных поверхностей, в определенных клинических ситуациях могут быть альтернативой раннему эндопротезированию у подростков и молодых взрослых.

Конфликт интересов. Не заявлен.

Источник финансирования. Не заявлен.

Этические нормы. Исследование проведено в соответствии с этическими стандартами Хельсинской декларации Всемирной медицинской ассоциации.

Информированное согласие. Родители пациентов подписали информированное согласие на участие в исследовании.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Siebenrock KA, Anwander H, Zurmühle CA, et al. Head reduction osteotomy with additional containment surgery improves sphericity and containment and reduces pain in Legg-Calvé-Perthes disease. *Clin Orthop Relat Res.* 2015;473(4):1274-1283. doi: 10.1007/s11999-014-4048-1.
2. Steppacher SD, Tannast M, Werlen S, Siebenrock KA. Femoral morphology differs between deficient and excessive acetabular coverage. *Clin Orthop Relat Res.* 2008;466(4):782-790. doi: 10.1007/s11999-008-0141-7.
3. Gharanizadeh K, Ravanbod H, Aminian A, Mirghaderi SP. Simultaneous femoral head reduction osteotomy (FHRO) combined with periacetabular osteotomy (PAO) for the treatment of severe femoral head asphericity in Perthes disease. *J Orthop Surg Res.* 2022;17(1):461. doi: 10.1186/s13018-022-03351-7.
4. Tannast M, Hanke M, Ecker TM, et al. LCPD: reduced range of motion resulting from extra- and intraarticular impingement. *Clin Orthop Relat Res.* 2012;470(9):2431-2440. doi: 10.1007/s11999-012-2344-1.
5. Hadley NA, Brown TD, Weinstein SL. The effects of contact pressure elevations and aseptic necrosis on the long-term outcome of congenital hip dislocation. *J Orthop Res.* 1990;8(4):504-513. doi: 10.1002/jor.1100080406.
6. Novais EN, Clohisy J, Siebenrock K, et al. Treatment of the symptomatic healed Perthes hip. *Orthop Clin North Am.* 2011;42(3):401-417. doi: 10.1016/j.ocl.2011.05.003.
7. Anderson LA, Erickson JA, Severson EP, Peters CL. Sequelae of Perthes disease: treatment with surgical hip dislocation and relative femoral neck lengthening. *J Pediatr Orthop.* 2010;30(8):758-766. doi: 10.1097/BPO.0b013e3181fcbaf.
8. Ganz R, Huff TW, Leunig M. Extended retinacular soft-tissue flap for intra-articular hip surgery: surgical technique, indications, and results of application. *Instr Course Lect.* 2009;58:241-255.
9. Leunig M, Ganz R. Relative neck lengthening and intracapsular osteotomy for severe Perthes and Perthes-like deformities. *Bull NYU Hosp Jt Dis.* 2011;69 Suppl 1:S62-S67.
10. Kruczynski J. Avascular necrosis of the proximal femur in developmental dislocation of the hip. Incidence, risk factors, sequelae and MR imaging for diagnosis and prognosis. *Acta Orthop Scand Suppl.* 1996;268:1-48.

11. Тепленький М.П., Олейников Е.В., Бунов В.С. Реконструкция тазобедренного сустава у пациентов с ишемическими деформациями проксимального отдела бедра, сочетающимися с ацетабулярной дисплазией. *Гений ортопедии*. 2020;26(4):502-507. doi: 10.18019/1028-4427-2020-26-4-502-507.
12. Slongo T., Ziebarth K. Femoral head reduction osteotomy to improve femoroacetabular containment in Legg-Calve-Perthes disease. *Oper Orthop Traumatol*. 2022;34:333-351. doi: 10.1007/s00064-022-00779-2.
13. Ganz R, Gill TJ, Gautier E, et al. Surgical dislocation of the adult hip a technique with full access to the femoral head and acetabulum without the risk of avascular necrosis. *J Bone Joint Surg Br*. 2001;83(8):1119-1124. doi: 10.1302/0301-620x.83b8.11964.
14. Leunig M, Ganz R. The evolution and concepts of joint-preserving surgery of the hip. *Bone Joint J*. 2014;96-B(1):5-18. doi: 10.1302/0301-620X.96B1.32823.
15. Paley D. Surgery for residual femoral deformity in adolescents. *Orthop Clin North Am*. 2012;43(3):317-328. doi: 10.1016/j.jocl.2012.05.009.
16. Paley D. Intra-Articular Osteotomies of the Hip, Knee, and Ankle. *Oper Tech Orthop*. 2011;21(2):184-196. doi: 10.1053/j.oto.2011.01.009.
17. Ganz R, Horowitz K, Leunig M. Algorithm for femoral and periacetabular osteotomies in complex hip deformities. *Clin Orthop Relat Res*. 2010;468(12):3168-3180. doi: 10.1007/s11999-010-1489-z.
18. Paley D. The treatment of femoral head deformity and coxa magna by the Ganz femoral head reduction osteotomy. *Orthop Clin North Am*. 2011;42(3):389-399. doi: 10.1016/j.jocl.2011.04.006.
19. Ziebarth K, Slongo T, Siebenrock KA. Residual Perthes deformity and surgical reduction of the size of the femoral head. *Oper Tech Orthop*. 2013;23:134-139. doi: 10.1053/j.oto.2013.08.001.
20. Massè A, Giachino M, Audisio A, et al. Ganz femoral head reduction associated with coverage and containment procedures improve radiological and functional outcomes in Perthes' disease. *Bone Joint J*. 2024;106-B(5 Supple B):40-46. doi: 10.1302/0301-620X.106B5.BJJ-2023-0853.R1.
21. Eltayeb NH, El-Adwar KL, Ahmed AA, et al. Femoral head reduction osteotomy for the treatment of late sequela of Legg-Calvé-Perthes disease and Perthes-like femoral head deformities. *J Pediatr Orthop B*. 2024;33(4):348-357. doi: 10.1097/BPB.0000000000001109.

Статья поступила 06.02.2025; одобрена после рецензирования 24.03.2025; принята к публикации 05.06.2025.

The article was submitted 06.02.2025; approved after reviewing 24.03.2025; accepted for publication 05.06.2025.

Информация об авторах:

Михаил Павлович Тепленький — доктор медицинских наук, заведующий отделением, врач — травматолог-ортопед, teplenkiymp@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1973-5192>;

Вячеслав Сергеевич Бунов — кандидат медицинских наук, научный сотрудник, bvsbunov@yandex.ru;

Алина Викторовна Акимова — аспирант, врач — травматолог-ортопед, fu-fu.psinka.16@mail.ru;

Эдуард Михайлович Парфёнов — врач — травматолог-ортопед, ed.ortoped@mail.ru.

Information about the authors:

Mikhael P. Teplenkiy — Doctor of Medical Sciences, Head of Department, orthopaedic surgeon, teplenkiymp@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1973-5192>;

Vyacheslav S. Bunov — Candidate of Medical Sciences, researcher, bvsbunov@yandex.ru;

Alina V. Akimova — post-graduate fellow, orthopaedic surgeon, fu-fu.psinka.16@mail.ru;

Eduard M. Parfenov — orthopaedic surgeon, ed.ortoped@mail.ru.

Научная статья

УДК 616.728.2/.3-089.843-77-022.1:615.281.9

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-4-487-494>

Антистафилококковая активность титановых 3D-имплантатов с магнийсодержащим многокомпонентным покрытием

Е.М. Гордина¹✉, С.А. Божкова¹, Д.В. Лабути¹, М.В. Богма², А.А. Ерузин²

¹ Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Р.Р. Вредена, Санкт-Петербург, Россия

² ОАО «Радиотехкомплект», Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Екатерина Михайловна Гордина, emgordina@win.rniito.ru

Аннотация

Введение. Благодаря своим превосходным характеристикам титан на протяжении десятилетий успешно используют в качестве искусственных имплантатов в ортопедической хирургии. Однако любое хирургическое вмешательство, связанное с установкой имплантата, имеет риск развития имплантат-ассоциированной инфекции (ИАИ), возбудителями которой более чем в половине случаев являются стафилококки.

Цель исследования — оценка антибактериальной, антибиопленочной активности и цитосовместимости многокомпонентного покрытия с оксидами магния и серебра на поверхности 3D-образцов титана.

Материалы и методы. Комплекс MgO-AgO-MgO наносили на 3D-образцы медицинского титана. Элементный анализ проведен с помощью сканирующего электронного микроскопа ТМ 4000 Plus. Для выявления антибактериальной активности в отношении *S. aureus* образцы сутки инкубировали совместно с бактериями. Биопленки *S. aureus* формировали путем погружения тестируемых образцов в питательную среду с бактериями. После суточной инкубации образцы промывали, помещали в УЗ-мойку, а затем выполняли посев соникационной жидкости методом секторных посевов. Цитосовместимость покрытия оценивали на культуре эукариотических клеток линии Vero.

Результаты. Элементный анализ и картирование подтвердили равномерное распределение оксидов на поверхности 3D-образцов титана. Разработанное покрытие характеризовалось антибактериальной активностью против *S. aureus* в течение трех суток. Установлено, что комплекс MgO-AgO-MgO обеспечивал эффективное препятствие адгезии *S. aureus* и формированию микробной пленки, в то время как на контрольных образцах регистрировали образование биопленки стафилококками. Однако анализ цитосовместимости полученных 3D-образцов показал отсутствие жизнеспособных клеток после 72 ч инкубации в среде с экстрактом из образцов титана с покрытием.

Обсуждение. Разработанный комплекс MgO-AgO-MgO несмотря на снижение антибактериальных свойств на четвертые сутки значимо предупреждал микробную адгезию на поверхность образцов, что обеспечивало защиту имплантата от образования микробной биопленки. Выявленная цитотоксичность комплекса, по-видимому, обусловлена значительной активацией реакций перекисного окисления липидов, которая и вызвала подавление жизнеспособности эукариотических клеток.

Заключение. Покрытие MgO-AgO-MgO предупреждает возможность первичного взаимодействия возбудителя и абиотической поверхности, что является одним из основных факторов в профилактике развития ИАИ и её рецидивов после ревизионных операций с заменой имплантата. Однако высокий уровень цитотоксичности требует дальнейшей модификации техники нанесения покрытия и его состава.

Ключевые слова: имплантат-ассоциированная инфекция, антибактериальное покрытие, магний, оксиды, серебро, *S. aureus*

Для цитирования: Гордина Е.М., Божкова С.А., Лабути Д.В., Богма М.В., Ерузин А.А. Антистафилококковая активность титановых 3D-имплантатов с магнийсодержащим многокомпонентным покрытием. *Гений ортопедии*. 2025;31(4):487-494. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-487-494.



Antistaphylococcal activity of 3D-printed titanium implants with magnesium-containing multicomponent coating

E.M. Gordina^{1✉}, S.A. Bozhkova¹, D.V. Labutin¹, M.V. Bogma², A.A. Eruzin²

¹ Vreden National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Saint Petersburg, Russian Federation

² JSC "Radiotekhnokomplekt", Saint Petersburg, Russian Federation

Corresponding author: Ekaterina M. Gordina, emgordina@win.rniito.ru

Abstract

Introduction Titanium has been successfully employed as artificial implants in orthopedic surgery for decades. Surgical intervention, specifically the implantation of medical devices, carries a risk of implant-associated infection (IAI), the causative agents of which are staphylococci in more than half of the cases.

The **objective** was to evaluate the antibacterial, antibiofilm activity and cytocompatibility of a multicomponent coating with magnesium and silver oxides on the surface of 3D titanium samples.

Material and methods The MgO-AgO-MgO complex The MgO-AgO-MgO complex was applied to 3D samples of medical titanium. Elemental analysis was performed using a TM 4000 Plus scanning electron microscope. The samples were incubated with bacteria for 24 hours to identify antibacterial activity against *S. aureus*. *S. aureus* biofilms were formed by immersing the test samples in a nutrient medium with bacteria. After a 24-hour incubation, the samples were washed, placed in an ultrasonic washer, and then sonication fluid was seeded using the sector seeding method. The cytocompatibility of the coating was assessed on a culture of eukaryotic cells of the Vero line.

Results Elemental analysis and mapping confirmed the uniform distribution of oxides on the surface of 3D titanium samples. The coating was characterized by antibacterial activity against *S. aureus* for three days. The MgO-AgO-MgO complex effectively prevented *S. aureus* adhesion and microbial film formation, while the control samples showed biofilm formation by staphylococci. However, cytocompatibility analysis of the 3D samples showed no viable cells after 72 h of incubation in a medium with an extract from coated titanium samples.

Discussion Despite a decrease in antibacterial properties on day 4, the MgO-AgO-MgO complex prevented microbial adhesion to the surface of the samples which ensured protection of the implant from the formation of microbial biofilm. The cytotoxicity of the complex was caused by significant activation of lipid peroxidation reactions, which resulted in suppression of the viability of eukaryotic cells.

Conclusion The MgO-AgO-MgO coating prevents primary interaction between the pathogen and the abiotic surface, which is one of the main factors in preventing the development of IAI and the relapses after revision surgeries with implant replacement. However, the high level of cytotoxicity requires further modification of the coating application technique and its composition.

Keywords: implant-associated infection, antibacterial coating, magnesium, oxides, silver, *S. aureus*

For citation: Gordina EM, Bozhkova SA, Labutin DV, Bogma MV, Eruzin AA. Antistaphylococcal activity of 3D-printed titanium implants with magnesium-containing multicomponent coating. *Genij Ortopedii*. 2025;31(4):487-494. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-487-494.

ВВЕДЕНИЕ

Инфекции, возникающие после установки имплантата, могут вызывать серьезные проблемы, связанные с длительным назначением антибактериальных препаратов, отторжением имплантата и риском развития серьезных осложнений [1, 2]. Заболеваемость перипротезной инфекцией (ППИ) после первичного хирургического вмешательства при тотальном эндопротезировании тазобедренного и коленного суставов составляет от 0,2 % до 2 % [1]. Увеличение продолжительности жизни приводит к росту количества эндопротезирований во всем мире, и по оценкам специалистов количество случаев ППИ значительно возрастет в ближайшие десятилетия [3]. S. Kurtz et al. подсчитали, что к 2030 г. эндопротезирований тазобедренного сустава будут выполнять на 613 % больше, чем в 2015 г., а коленного сустава — больше на 174% [4]. Имплантат-ассоциированные инфекции (ИАИ), особенно вызванные устойчивыми к антибактериальным препаратам бактериями, существенно влияют на экономические затраты системы здравоохранения [5].

Как правило, для профилактики развития послеоперационных инфекционных осложнений назначают системные антибактериальные препараты широкого спектра [6, 7]. Однако антибиотик сложно достичь достаточно высокой концентрации в инфекционном очаге костной ткани. Кроме того, системное введение антибиотиков повышает вероятность нежелательных побочных реакций и риск развития устойчивости бактерий к антибиотикам.

Новые технологии, такие как 3D-печать, открыли потенциальные возможности в проектировании медицинских имплантатов, поскольку позволяют изготовить имплантат в соответствии с анатомией конкретного пациента [8–11]. Наиболее часто используемые биосовместимые материалы для производства медицинских 3D-имплантатов — это титан и титановые сплавы [12, 13]. Для ортопедических имплантатов титан и его сплавы считаются превосходящими кобальт-хром и нержавеющую сталь из-за их более низкого модуля упругости и лучшей биосовместимости [14].

Металлические поверхности, как правило, не обладают достаточными антибактериальными свойствами, поэтому значительное количество исследований в настоящее время направлены на разработку методов изменения свойств поверхности с целью обеспечения имплантируемым устройствам антибактериальных эффектов [15–17]. Предложено много разнообразных стратегий для придания имплантатам антибактериальных свойств, в частности модификация поверхности. Методы физико-химической модификации вызывают изменения в химическом составе поверхности и наноструктуре, которые влияют на взаимодействие имплантата с бактериальной клеткой, нарушая молекулярное распознавание бактериями, и/или физически не допускают адгезию возбудителя и образование биопленки [18]. Такое существование в условиях биопленки позволяет бактериям уклоняться от различных антибактериальных препаратов и факторов иммунной системы, распространяться в новые локусы и инфицировать ранее не зараженные ткани организма, тем самым обеспечивая хроническое течение заболевания и невозможность тотальной эрадикации возбудителя [18–21].

Нанесение антибактериальных покрытий в качестве перспективного метода модификации поверхности имплантатов должно обеспечивать высокие антибактериальные свойства, препятствовать прикреплению бактерий к поверхности и образованию биопленок.

Цель исследования — оценка антибактериальной, антибиопленочной активности и цитосовместимости многокомпонентного покрытия с оксидами магния и серебра на поверхности 3D-образцов титана.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Комплекс MgO-AgO-MgO наносили на 3D-образцы медицинского титана в соответствии с оригинальной методикой (Приоритет 202590080 от 23.12.2024). Полученные образцы представлены на рис. 1.

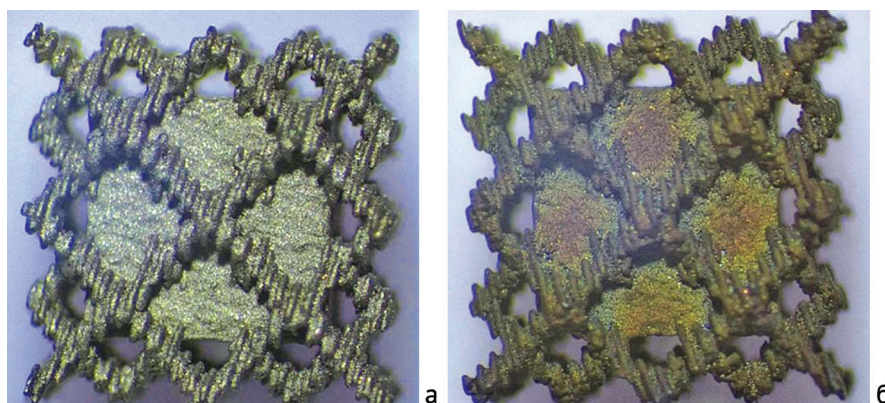


Рис. 1. 3D-образцы титана: а — образец без тестируемого покрытия; б — образец с комплексом MgO-AgO-MgO

Для исследования поверхности 3D-образцы фиксировали на держатель и помещали в камеру сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) TM 4000 Plus (Hitachi), имеющую спектрометр энергетической дисперсии XFlash 610 Mini. Разрешение спектрометра — 143 эВ, точность измерения — 0,01–1 %. Для определения состава покрытий выполняли элементный анализ при ускоряющем напряжении 15 кВ, рабочее расстояние — 10 мм, зондовый ток — 1,4 нА, глубина зондирования — 0,5–1 мкм, угол отбора характеристического рентгеновского излучения — 25°. Детекцию осуществляли по всей поверхности образца в нескольких точках путем оценки испускаемого рентгеновского излучения. Стереофотографии образцов получали на микроскопе МСП-1 ЛОМО.

Для выявления наличия и длительности антибактериальной активности в отношении *S. aureus* ATCC 29213 комплекса MgO-AgO-MgO 3D-образцы погружали в 1 мл бульона Мюллера – Хинтона (МХБ), содержащего 1×10^6 КОЕ/мл бактерий и инкубировали 24 ч при температуре 37 °С. В качестве контроля в МХБ вносили образцы без покрытия. При наличии статистически значимой разницы между значениями оптической плотности (ОП) инкубационных сред с тестируемыми образцами и контролем (инкубационные среды с образцами без покрытия) комплекс MgO-AgO-MgO считали активным. Если через сутки инкубации в пробирках регистрировали признаки роста бактерий, то выполняли посев бульонных культур, а через сутки — идентификацию выросших колоний. МХБ без признаков роста сливали и заменяли на 1 мл МХБ с 1×10^6 КОЕ/мл *S. aureus* ATCC 29213, процедуру повторяли ежедневно до появления признаков роста в опытных пробирках.

Биопленки эталонного штамма *S. aureus* ATCC 29213 формировали путем погружения тестируемых 3D-образцов титана в 3 мл LB-бульона, содержащего 1×10^5 КОЕ/мл бактерий, инкубировали при температуре 37 °С в течение 24 ч, после чего планктонную культуру удаляли, образцы дважды промывали физиологическим раствором и высушивали. Образцы переносили в 1 мл физиологического раствора в пробирки типа эппендорф и помещали в УЗ-мойку на 5 мин при 37 °С. Далее содержимое пробирок перемешивали с помощью вортекса и 100 мкл соникационной жидкости засеивали на поверхность Колумбийского агара. Чашки инкубировали 24 ч при 37 °С и затем выполняли подсчет. Для подтверждения видовой принадлежности выросших колоний выполняли идентификацию методом MALDI-TOF MS.

Клетки Vero выращивали в среде Dulbecco MEM/F12 с высоким содержанием глюкозы и 10 % эмбриональной бычьей сыворотки, 100 Ед/мл пенициллина и 100 мг/мл стрептомицина (Cargicor, Германия), разделяя каждые 3–4 дня в соотношении 1:3. Для получения экстракта исследуемые образцы титана помещали в 3 мл среды для культивирования клеток и инкубировали 24 ч в шейкере со скоростью 150 об/мин при +37 °С. Для оценки жизнеспособности клетки Vero засеивали в количестве 2000 в лунки 96-луночного планшета. После прикрепления клеток через 24 ч в лунки добавляли 200 мкл полученного ранее экстракта в среде для культивирования. Клетки Vero в лунках со стандартной средой без экстракта использовали в качестве контроля. Раствор 3-(4,5-диметилтиазол-2-ил)-2,5-дифенилтетразолия бромид (МТТ) вносили в лунки через 72 ч в конечной концентрации 1 мг/мл и инкубировали еще 3 ч. После удаления МТТ в лунки добавляли 100 мкл диметилсульфоксида и инкубировали в шейкере со скоростью 200 об/мин в течение 5 мин. Далее на спектрофотометре INNO-S измеряли разницу ОП при длине волн 570 нм и 620 нм с вычитанием сигнала пустых лунок. Жизнеспособность Vero определяли как долю ОП 570–620 нм в исследуемых образцах относительно контроля. Эксперимент повторяли три раза.

Статистический анализ. Анализ результатов проводили в программе Prism 9.0 (GraphPad, США) методом непарного t-теста. Значения $p < 0,05$ считали статистически значимыми.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты элементного анализа и картирование подтвердили наличие и равномерное распределение оксида серебра (AgO) и оксида магния (MgO) на поверхности 3D-образцов титана. Содержание серебра (Ag) составило 39,3 %, магния (Mg) — 10,6 %, кислорода (O) — 15,5 %. Примеси других элементов не регистрировали (рис. 2, 3).

Установлено, что полученные 3D-образцы титана с MgO-AgO-MgO характеризовались наличием антибактериальной активности против эталонного штамма *S. aureus* ATCC 29213 (MSSA) в течение трех суток (рис. 4). В пробирках с образцами с покрытием MgO-AgO-MgO отсутствовали признаки роста бактерий в отличие от нативных образцов, в пробирках с которыми был осадок и мутная питательная среда. Методом MALDI-TOF-MS подтверждено наличие в пробирках именно *S. aureus*.

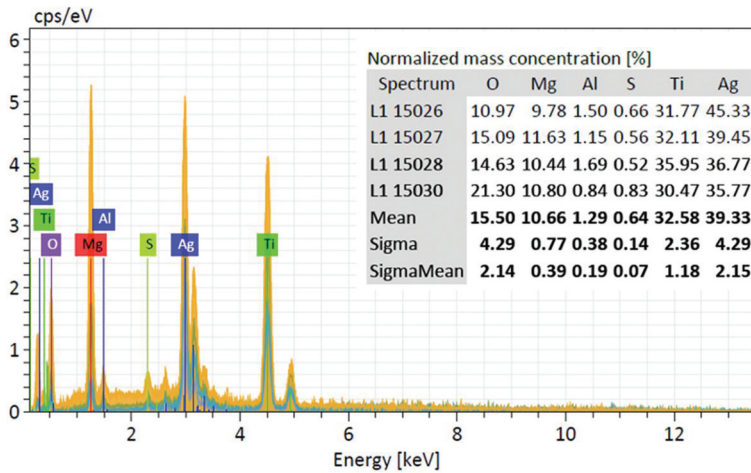


Рис. 2. Результаты элементного анализа титанового 3D-образца с комплексом MgO-AgO-MgO

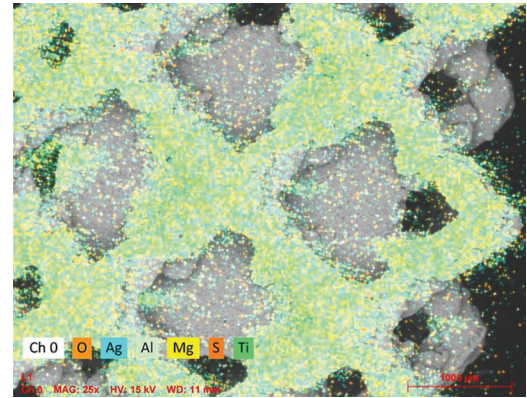


Рис. 3. Распределение серебра (Ag), магния (Mg) и кислорода (O) на поверхности титанового (Ti) 3D-образца



Рис. 4. Пробирки с инкубационными средами 3D-образцов и бактерий через сутки инкубации

Тестируемые образцы с оригинальным покрытием характеризовались также наличием антибиопленочной активности. Комплекс MgO-AgO-MgO обеспечивал эффективное препятствие адгезии *S. aureus* и формированию микробной пленки на поверхности 3D-образцов титана, в то время как на контрольных образцах стафилококки образовали биопленку с достаточным количеством бактериальных клеток для инициации инфекционного процесса (табл. 1). Следует отметить, что на четвертые сутки инкубации, несмотря на наличие признаков роста бактерий в пробирках с экспериментальными образцами, адгезия стафилококков к их поверхности была значительно меньшей в сравнении с контрольными образцами.

Анализ цитосовместимости полученных 3D-образцов в экспериментах *ex vivo* на культуре эукариотических клеток линии Vero показал отсутствие жизнеспособных клеток после 72 ч инкубации в среде с экстрактом из образцов титана с покрытием. При этом среда с экстрактом образцов без покрытия не оказывала выраженного влияния на жизнеспособность клеток Vero (рис. 5).

Таблица 1

Количество микробных клеток на поверхности образцов			
Сутки	Количество микробных клеток, КОЕ/мл		p
	Образцы с комплексом MgO-AgO-MgO	Контрольные образцы без покрытия	
1-е	5 ± 2	1 × 10 ⁸ ± 0	< 0,05
2-е	5 ± 2	1 × 10 ⁸ ± 0	< 0,05
3-е	10 ± 3	1 × 10 ⁸ ± 0	< 0,05
4-е	1 × 10 ² ± 30	1 × 10 ⁸ ± 0	< 0,05

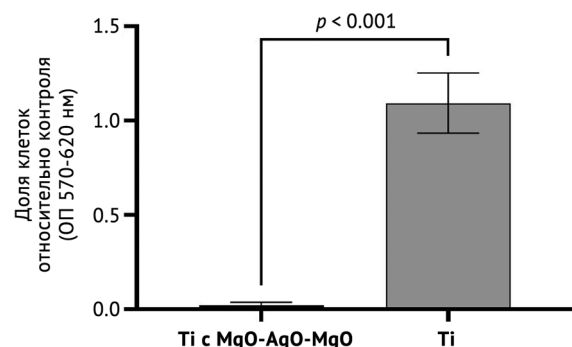


Рис. 5. Жизнеспособность клеток Vero через 72 ч после инкубации с экстрактами образцов титана

ОБСУЖДЕНИЕ

Биоматериалы играют ключевую роль в текущем успехе ортопедических и стоматологических операций. Чистый титан и его сплавы являются наиболее часто используемыми материалами для постоянных имплантатов, контактирующих с костью. Благодаря своим превосходным механическим и химическим свойствам, хорошей коррозионной стойкости и биосовместимости титан на протяжении десятилетий успешно используют в качестве искусственных имплантатов в ортопедической хирургии. Однако любое хирургическое вмешательство, связанное с установкой имплантата, имеет риск развития ИАИ. Более чем в 55 % случаев возбудителями ортопедической инфекции являются стафилококки [22]. По данным ретроспективного исследования динамики спектра возбудителей ортопедической инфекции за 12 лет доля *S. aureus* составила 31,3 %, *S. epidermidis* — 18,7 %, коагулазоотрицательных стафилококков (кроме *S. epidermidis*) — 5,8 % [22]. Стафилококки способны образовывать биопленки на поверхности имплантатов и окружающих тканях, интернализировать остеобласты и остециты, поэтому ключевым моментом является предупреждение формирования зрелой биопленки на имплантате и, как следствие, персистирующего микробного очага [23].

Резистентность бактерий к наночастицам металлов является крайне редким явлением, поэтому значительный интерес представляют данные о возможности их применения для модификации поверхностей за счет нанесения активного покрытия с частицами металлов и придание антиадгезивных и антибактериальных свойств имплантатам. В состав полученных нами покрытий входят оксиды магния и серебра. Ионы магния играют ключевую роль в образовании кристаллов гидроксиапатита [24]. Магний стимулирует пролиферацию остеобластов и способствует формированию костей, снижение уровня магния влияет на экспрессию провоспалительных цитокинов, которые, в свою очередь, вызывают резорбцию кости [25].

Антибактериальная активность магния известна [26, 27]. В работе С.С. Coelho et al. выявлены антибактериальные свойства оксида магния, внесенного в заменитель костной ткани на основе гидроксиапатита [28]. Q. Zhao et al. показали антибактериальный эффект комплекса магния и диоксида титана в отношении стафилококков [29]. S. Xiang et al. также регистрировали антибактериальные свойства комплекса с магнием на поверхности титана [30]. Следует отметить, что в данных работах отсутствуют данные о длительности сохранения антибактериальной активности разработанных авторами покрытий с магнием. Полученное нами многокомпонентное покрытие 3D-образцов титана со сложным комплексом оксидов магния и серебра MgO-AgO-MgO показало выраженные антибактериальные свойства против *S. aureus* ATCC 29213 в течение трех суток. Известно, что адгезия патогенов включает две стадии [31]: на первой стадии происходит начальное обратимое взаимодействие между бактериями и поверхностями имплантатов, в то время как на второй необратимой стадии возникают специфические и неспецифические взаимодействия между белками клеточной стенки бактерий и связывающими молекулами поверхности имплантата. Разработанный нами комплекс MgO-AgO-MgO несмотря на снижение антибактериальных свойств на четвертые сутки инкубации значительно предупреждает микробную адгезию на поверхности титановых 3D-образов, что обеспечивает защиту имплантата от образования микробной биопленки.

Крайне важно понимать, что кроме выраженных антибактериальных свойств любая модификация поверхности имплантата должна быть безопасна для окружающих имплантат тканей организма. Известно, что титановые дентальные имплантаты, покрытые оксидом магния, характеризуются антибактериальными свойствами *in vitro* и цитосовместимостью. Q. Zhao et al. модифицировали поверхность титана диоксидом титана, легированным магнием. Авторы показали, что такой комплекс способствует адгезии, пролиферации и дифференциации остеобластов, а также остеогенезу через сигнальный путь ERK/c-Fos и ранней остеointеграции титановых имплантатов [29]. S. Xiang et al. разработали покрытие с магнием, которое потенцировало жизнеспособность, пролиферацию и остеогенную дифференциацию мезенхимальных стволовых клеток костного мозга [30].

Установлено, что антибактериальный эффект оксидов металлов, в том числе магния, реализуется за счет развития окислительного стресса, повреждения клеточной стенки бактерий и нарушений в белках и ДНК [32]. По-видимому, выявленная нами цитотоксичность полученных титановых 3D-образцов с MgO-AgO-MgO может быть обусловлена значительной активацией реакций перекисного окисления липидов, которая и вызывает подавление жизнеспособности эукариотических клеток линии Vero.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученное нами оригинальное покрытие имеет высокий клинический потенциал в качестве многофункционального антибактериального покрытия поверхностей ортопедических имплантатов, напечатанных на 3D-принтере, предупреждает возможность первичного взаимодействия возбудителя с абиотической поверхностью, что является одним из основных факторов в профилактике развития ИАИ и её рецидивов после ревизионных операций с заменой имплантата. Однако высокий уровень цитотоксичности требует дальнейшей модификации техники нанесения покрытия или его состава для снижения уровня цитотоксичности при сохранении антибактериальной активности комплекса.

Конфликт интересов не заявлен.

Источник финансирования. Исследование выполнено в рамках реализации темы государственного задания № 056-00123-21-00.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Nelson SB, Pinkney JA, Chen AF, Tande AJ. Periprosthetic Joint Infection: Current Clinical Challenges. *Clin Infect Dis*. 2023;77(7):e34-e45. doi: 10.1093/cid/ciad360.
- Tabaja H, Abu Saleh OM, Osmon DR. Periprosthetic Joint Infection: What's New? *Infect Dis Clin North Am*. 2024;38(4):731-756. doi: 10.1016/j.idc.2024.07.007.
- Rudelli BA, Giglio PN, de Carvalho VC, et al. Bacteria drug resistance profile affects knee and hip periprosthetic joint infection outcome with debridement, antibiotics and implant retention. *BMC Musculoskelet Disord*. 2020;21(1):574. doi: 10.1186/s12891-020-03570-1.
- Kurtz S, Ong K, Lau E, et al. Projections of primary and revision hip and knee arthroplasty in the United States from 2005 to 2030. *J Bone Joint Surg Am*. 2007;89(4):780-785. doi: 10.2106/JBJS.F.00222.
- Miller R, Higuera CA, Wu J, et al. Periprosthetic Joint Infection: A Review of Antibiotic Treatment. *JBJS Rev*. 2020;8(7):e1900224. doi: 10.2106/JBJS.RVW.19.00224.
- Masters EA, Ricciardi BF, Bentley KLM, et al. Skeletal infections: microbial pathogenesis, immunity and clinical management. *Nat Rev Microbiol*. 2022;20(7):385-400. doi: 10.1038/s41579-022-00686-0.
- Ghimire A, Song J. Anti-Periprosthetic Infection Strategies: From Implant Surface Topographical Engineering to Smart Drug-Releasing Coatings. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2021;13(18):20921-20937. doi: 10.1021/acsami.1c01389.
- Jeong M, Radomski K, Lopez D, et al. Materials and applications of 3D printing technology in dentistry: an overview. *Dent J (Basel)*. 2023;12(1):1. doi: 10.3390/dj12010001.
- Celi S, Gasparotti E, Capellini K, et al. 3D Printing in Modern Cardiology. *Curr Pharm Des*. 2021;27(16):1918-1930. doi: 10.2174/1381612826666200622132440.
- Sun X, Zhong R, Wu C, et al. 3D printed titanium scaffolds with bi-directional gradient QK-functionalized surface. *Adv Mater*. 2025;37(8):e2406421. doi: 10.1002/adma.202406421.
- Phuoc HD, Hoang PN, Yang S, et al. Osseointegrability of 3D-printed porous titanium alloy implant on tibial shaft bone defect in rabbit model. *PLoS One*. 2023;18(9):e0282457. doi: 10.1371/journal.pone.0282457.
- Resnik M, Benčina M, Levičnik E, et al. Strategies for improving antimicrobial properties of stainless steel. *Materials*. 2020;13:2944. doi: 10.3390/ma13132944.
- Lee UL, Yun S, Lee H, et al. Osseointegration of 3D-printed titanium implants with surface and structure modifications. *Dent Mater*. 2022;38(10):1648-1660. doi: 10.1016/j.dental.2022.08.003.
- Jiang P, Zhang Y, Hu R, et al. Advanced surface engineering of titanium materials for biomedical applications: from static modification to dynamic responsive regulation. *Bioact Mater*. 2023;27:15-57. doi: 10.1016/j.bioactmat.2023.03.006.
- Teulé-Trull M, Altuna P, Arregui M, et al. Antibacterial coatings for dental implants: a systematic review. *Dent Mater*. 2025;41(3):229-247. doi: 10.1016/j.dental.2024.12.001.
- Feng P, He R, Gu Y, et al. Construction of antibacterial bone implants and their application in bone regeneration. *Mater Horiz*. 2024;11(3):590-625. doi: 10.1039/d3mh01298k.
- Chen ZY, Gao S, Zhang YW, et al. Antibacterial biomaterials in bone tissue engineering. *J Mater Chem B*. 2021;9(11):2594-2612. doi: 10.1039/d0tb02983a.
- Pan Z, Dai C, Li W. Material-based treatment strategies against intraosseous implant biofilm infection. *Biochem Biophys Rep*. 2024;39:101764. doi: 10.1016/j.bbrep.2024.101764.
- 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.
- Kranjec C, Morales Angeles D, Torrisen Mårli M, et al. Staphylococcal Biofilms: Challenges and Novel Therapeutic Perspectives. *Antibiotics (Basel)*. 2021;10(2):131. doi: 10.3390/antibiotics10020131.
- François P, Schrenzel J, Götz F. Biology and Regulation of Staphylococcal Biofilm. *Int J Mol Sci*. 2023;24(6):5218. doi: 10.3390/ijms24065218.
- Касимова А.Р., Туфанова О.С., Гордина Е.М. и др. Двенадцатилетняя динамика спектра ведущих возбудителей ортопедической инфекции: ретроспективное исследование. *Травматология и ортопедия России*. 2024;30(1):66-75. doi: 10.17816/2311-2905-16720.
- Li M, Yu J, Guo G, Shen H. Interactions between Macrophages and Biofilm during Staphylococcus aureus-Associated Implant Infection: Difficulties and Solutions. *J Innate Immun*. 2023;15(1):499-515. doi: 10.1159/000530385.
- Zhang Y, Xu J, Qin L, Jiang Q. Magnesium and osteoarthritis: from a new perspective. *Ann Jt*. 2016;1:29. doi: 10.21037/aoj.2016.11.04.
- Zhang JL, Tang L, Qi HN, et al. Dual function of magnesium in bone biomineralization. *Adv Healthc Mater*. 2019;8(21):e1901030. doi: 10.1002/adhm.201901030.
- S A, Kavitha HP. Magnesium Oxide Nanoparticles: Effective Antilarvicidal and Antibacterial Agents. *ACS Omega*. 2023;8(6):5225-5233. doi: 10.1021/acsomega.2c01450.
- Rodríguez-Hernández AP, Vega-Jiménez AL, Vázquez-Olmos AR, et al. Antibacterial properties *in vitro* of magnesium oxide nanoparticles for dental applications. *Nanomaterials (Basel)*. 2023;13(3):502. doi: 10.3390/nano13030502.
- Coelho CC, Padrão T, Costa L, et al. The antibacterial and angiogenic effect of magnesium oxide in a hydroxyapatite bone substitute. *Sci Rep*. 2020;10(1):19098. doi: 10.1038/s41598-020-76063-9.
- Zhao Q, Yi L, Jiang L, et al. Osteogenic activity and antibacterial ability on titanium surfaces modified with magnesium-doped titanium dioxide coating. *Nanomedicine (Lond)*. 2019;14(9):1109-1133. doi: 10.2217/nnm-2018-0413.
- Xiang S, Zhang C, Guan Z, et al. Preparation of a novel antibacterial magnesium carbonate coating on a titanium surface and its *in vitro* biocompatibility. *RSC advances*. 2024;14(15):10516-10525. doi: 10.1039/d4ra00399c.
- Rather MA, Gupta K, Mandal M. Microbial biofilm: formation, architecture, antibiotic resistance, and control strategies. *Braz J Microbiol*. 2021;52(4):1701-1718. doi: 10.1007/s42770-021-00624-x.

32. Kamyab H, Chelliapan S, Hayder G, et al. Exploring the potential of metal and metal oxide nanomaterials for sustainable water and wastewater treatment: A review of their antimicrobial properties. *Chemosphere*. 2023;335:139103. doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.139103..

Статья поступила 01.04.2025; одобрена после рецензирования 04.04.2025; принята к публикации 05.06.2025.

The article was submitted 01.04.2025; approved after reviewing 04.04.2025; accepted for publication 05.06.2025.

Информация об авторах:

Екатерина Михайловна Гордина — кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, emgordina@win.rniito.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2326-7413>;

Светлана Анатольевна Божкова — доктор медицинских наук, профессор, заведующая отделением, clinpharm-rniito@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2083-2424>;

Дмитрий Владимирович Лабутин — младший научный сотрудник, mailbox@dlabutin.com, <https://orcid.org/0000-0002-4405-7688>;

Марина Владимировна Богма — кандидат фармацевтических наук, специалист в области низкотемпературной плазмы, mvbogma@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-8446-5114>;

Александр Анатольевич Ерузин — кандидат технических наук, инженер участка вакуумной металлизации, специалист в области низкотемпературной плазмы, chemical-man@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2327-2466>.

Information about the authors:

Ekaterina M. Gordina — Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher, emgordina@win.rniito.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2326-7413>;

Svetlana A. Bozhkova — Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Scientific Department, clinpharm-rniito@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2083-2424>;

Dmitry V. Labutin — Junior Researcher, mailbox@dlabutin.com, <https://orcid.org/0000-0002-4405-7688>;

Marina V. Bogma — Candidate of Pharmaceutical Sciences, specialist in low-temperature plasma, mvbogma@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-8446-5114>;

Alexander A. Eruzin — Candidate of Technical Sciences, engineer, vacuum metallization section, specialist in low-temperature plasma, chemical-man@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2327-2466>.

Вклад авторов:

Гордина Е.М. — сбор, анализ или интерпретация данных существенный вклад в разработку концепции или дизайна исследования, редактирование текста рукописи.

Божкова С.А. — существенный вклад в разработку концепции или дизайна исследования, редактирование текста рукописи.

Лабутин Д.В. — сбор, анализ или интерпретация данных, редактирование текста рукописи.

Богма М.В. — сбор, анализ или интерпретация данных, редактирование текста рукописи.

Ерузин А.А. — сбор, анализ или интерпретация данных.

Научная статья

УДК 616.718..6-001.5-089.227.84-092.4

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-4-495-501>

Экспериментальное топографо-анатомическое обоснование гибридного остеосинтеза малоберцовой кости у пострадавших с переломами лодыжек

В.О. Цапенко[✉], Ю.Б. Кашанский, Р.В. Вашетко, И.П. Кондратьев, А.В. Поликарпов

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт скорой помощи имени И.И. Джанелидзе, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Владимир Олегович Цапенко, vovantsapa@mail.ru**Аннотация**

Введение. Проблема лечения пациентов с переломами лодыжек до настоящего времени не потеряла своей актуальности в силу их частоты и отсутствия единого стандарта оказания им медицинской помощи. При этом в литературе отмечены неудовлетворительные результаты и высокая инвалидизация при лечении пострадавших консервативными методами, а также частота развития инфекционных осложнений, усложняющих процесс реабилитации, при оперативных методах.

Цель работы — на секционном материале обосновать возможность, безопасность и целесообразность применения в клинической практике нового способа остеосинтеза малоберцовой кости при переломах лодыжек, позволяющего снизить негативные последствия оперативного лечения.

Материалы и методы. У 11 биоманекенов нижней трети голени выделены магистральные сосуды и нервы, затем механическим путем получены переломы лодыжек типов 44C1 и 44C2 (по классификации АО) и произведен остеосинтез малоберцовых костей предложенным способом. В дальнейшем принято силовое воздействие на зону повреждения путем проведения механических стресс-тестов.

Результаты. Предложенный способ остеосинтеза не приводит к конфликту фиксирующих винтов с магистральными сосудами и нервами. У всех биоманекенов при выполнении стресс-тестов, вызывающих вальгусную и варусную деформации, а также при приведении стопы в крайние положения подошвенной и тыльной флексий видимых изменений в положении отломков малоберцовой кости не отмечено.

Обсуждение. В отличие от традиционных способов оперативного лечения пострадавших с переломами лодыжек предложенный способ не требует больших разрезов для размещения имплантов. Кроме того, отсутствует потребность в применении различных пластин, так как вместо них фиксацию перелома осуществляют за счет парной кости травмированного сегмента. При этом фиксационные винты могут быть введены транскутанно через проколы мягких тканей. Новый способ обладает малой травматичностью и металлоемкостью, что сокращает вероятность развития гнойно-некротических осложнений. Он может быть применен при переломах лодыжек 44C1 и 44C2 (по классификации АО) в медицинских учреждениях с различной степенью оснащенности.

Заключение. Остеосинтез при переломах лодыжек предложенным способом технически возможен и не приводит к повреждению магистральных сосудов и нервов, расположенных в зоне выполнения операции. Проведение стресс-тестов показало, что во всех случаях достигнута стабильная фиксация отломков малоберцовой кости, исключая подвижность в зоне ее перелома. Новый способ будет способствовать нормальному процессу репаративного остеогенеза в клинической практике.

Ключевые слова: остеосинтез, перелом лодыжек, травма

Для цитирования: Цапенко В.О., Кашанский Ю.Б., Вашетко Р.В., Кондратьев И.П., Поликарпов А.В. Экспериментальное топографо-анатомическое обоснование гибридного остеосинтеза малоберцовой кости у пострадавших с переломами лодыжек. *Гений ортопедии*. 2025;31(4):495-501. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-495-501.



Experimental topographic and anatomical substantiation of hybrid osteosynthesis of the fibula in patients with ankle fractures

V.O. Tsapenko✉, Yu.B. Kashansky, R.V. Vashetko, I.P. Kondratiev, A.V. Polikarpov

St. Petersburg Research Institute of Emergency Medicine named after I.I. Dzhanelidze,
Saint Petersburg, Russian Federation

Corresponding author: Vladimir O. Tsapenko, vovantsapa@mail.ru

Abstract

Introduction Ankle fractures are one of the common injuries treated by orthopaedic surgeons. The lack of a standard medical care can be associated with poor outcomes, high disability rates with conservative treatments. Reported outcomes following operative fixation vary widely in the literature and infectious complications can complicate the rehabilitation process.

The **objective** was to show a clinical possibility, safety and feasibility of a new method of fibula fixation in ankle fractures using necropsy material and to reduce negative consequences after surgical treatment.

Material and methods Major vessels and nerves were isolated in the lower third of tibia in 11 biomannequins, AO 44C1 and 44C2 fractures obtained mechanically and fibula fixed using the technique offered. Forces were applied to the injury site through mechanical stress tests.

Results The fixation method did not lead to a conflict between fixing screws and major vessels and nerves. No visible changes in the fibula position were noted in the biomannequins with the foot brought to extreme positions of plantar and dorsal flexion, with stress tests causing valgus and varus deformities.

Discussion As opposed to conventional surgical treatments of ankle fractures, no large incisions are required with the technique to place implants. There is no need to use plates, and the fracture can be fixed using the paired bone of the injured segment instead. Fixation screws can be inserted transcutaneously through soft tissue punctures. The new method is associated with less trauma, less quantity of metal needed and reduced probability of infectious complications. It can be used for AO 44C1 and 44C2 fractures in medical institutions with different availability of equipment.

Conclusions Ankle fractures can be repaired with the technique offered causing no damage to the major vessels and nerves at the surgical site. Stress tests showed stable fibula fixation achieved in all cases avoiding mobility at the fracture site. The new technique can facilitate normal reparative osteogenesis in clinical practice.

Keywords: osteosynthesis, ankle fracture, trauma

For citation: Tsapenko VO, Kashansky YuB, Vashetko RV, Kondratiev IP, Polikarpov AV. Experimental topographic and anatomical substantiation of hybrid osteosynthesis of the fibula in patients with ankle fractures. *Genij Ortopedii*. 2025;31(4):495-501. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-495-501.

ВВЕДЕНИЕ

Переломы лодыжек нередко рассматривают как рутинную патологию [1–4], недооценка которой, а также выбор неверной тактики и техники лечения пострадавших могут стать весьма серьезной проблемой с неблагоприятным исходом [5–12]. До настоящего времени вопросы определения способа лечения при переломах лодыжек и выработки единого стандарта лечения представляются дискуссионными. Анализ лечения пострадавших с переломами лодыжек, предпринятый рядом авторов, указывает на неудовлетворительные результаты применения консервативных методов, в случае же оперативного пособия отмечают достаточно частое развитие инфекционных осложнений [13–16].

За последние годы существенные успехи получены при лечении пациентов с диафизарными переломами конечностей и значительно меньше, когда повреждение локализовано в метаэпифизарной зоне или носит внутрисуставной характер. Хотя данные переломы в большинстве случаев являются результатом низкоэнергетического воздействия, они часто являются оскольчатыми, сопровождаются существенным повреждением мягких тканей, а также значительным смещением отломков [17]. Это обстоятельство сделало приоритетным направление по разработке методов лечения переломов пилона и лодыжек [18, 19].

Опыт лечения пострадавших показал, что попытки раннего применения традиционных способов остеосинтеза металлоемкими конструкциями нередко приводят к негативным последствиям. Лечение переломов лодыжек по методике ORIF АО также имеет определенные недостатки, которые препятствуют широкому применению его в ближайшие часы после травмы [20]. Установлено, что ранний остеосинтез положительно влияет на исход травматической болезни, при оказании медицинской помощи в срочном порядке необходимым условием является применение щадящих методов [21]. В последние годы появились новые возможности, связанные с внедрением эффективных малоинвазивных лечебных методик. Все вышеизложенное послужило поводом для разработки способа остеосинтеза переломов, обладающего в отличие от традиционных подходов меньшей травматичностью и металлоемкостью, и позволяющего надежно фиксировать отломки до их полного сращения.

Цель работы — на секционном материале обосновать возможность, безопасность и целесообразность применения в клинической практике нового способа остеосинтеза малоберцовой кости при переломах лодыжек, позволяющего снизить негативные последствия оперативного лечения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование выполнено на 11 нижних конечностях биоманикенов, на которых применен предложенный способ остеосинтеза. Его особенностью являлось использование неповрежденной большеберцовой кости травмированной голени пострадавшего для фиксации отломков малоберцовой кости вместо накостного или внутрикостного импланта (Патент «Способ лечения переломов костей голени и предплечья») [22, 23].

Транскутанно в нижней трети голени через обе берцовые кости проводили по две пары спиц Киршнера снаружи кнутри. Их располагали в секущих плоскостях с произвольным расхождением от 6° до 30° между собой и проводили через все кортикальные слои малоберцовой и большеберцовой костей предполагаемого травмированного сегмента конечности на удалении $(4,2 \pm 0,3)$ см от верхушки латеральной лодыжки до дистального пучка спиц (первая дистально расположенная спица) и $(9,1 \pm 0,3)$ см от верхушки латеральной лодыжки до проксимального пучка спиц (четвертая проксимально расположенная спица). Таким образом осуществляли имитацию фиксации малоберцовой кости к большеберцовой, которая, как указано выше, заменяла пластину или другой имплантат (рис. 1).

После этого кожно-фасциальный лоскут удаляли, выполняли препарирование тканей с выделением переднего большеберцового сосудистого пучка и малоберцового нерва, визуально определяли взаимное расположение спиц по отношению к сосудисто-нервным образованиям и проводили измерения расстояний от них до верхушки латеральной лодыжки во фронтальной и парасагиттальной плоскостях (рис. 2). Затем выполняли остеотомию малоберцовой кости пилой Джилли в промежутке между введенными парами спиц на расстоянии $(6,2 \pm 0,2)$ см от верхушки латеральной лодыжки (рис. 3), спицы удаляли и временно выполняли открытую фиксацию перелома малоберцовой кости костодержателем (рис. 4). Следующим этапом осуществляли остеосинтез по предложенной методике с размещением винтов в сформированных спицами каналах таким образом, чтобы они также проходили через все кортикальные слои малоберцовой и большеберцовой костей (рис. 5).

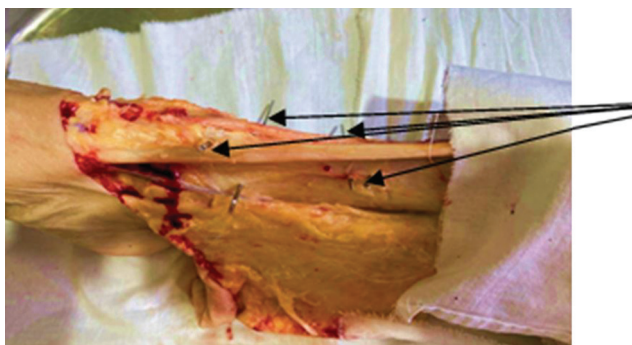


Рис. 1. Введение в берцовые кости спиц Киршнера

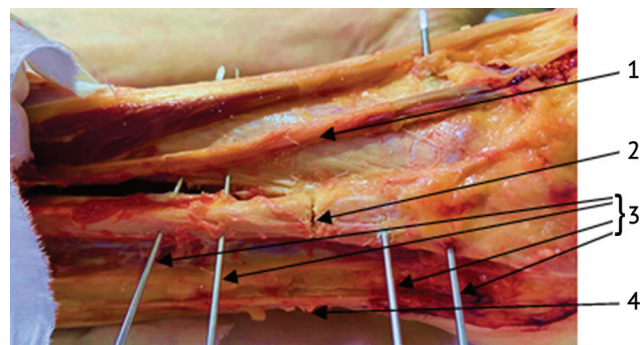


Рис. 2. Взаимное расположение спиц и сосудисто-нервных пучков: 1 — передняя большеберцовая артерия; 2 — спицы Киршнера; 3 — малоберцовый нерв

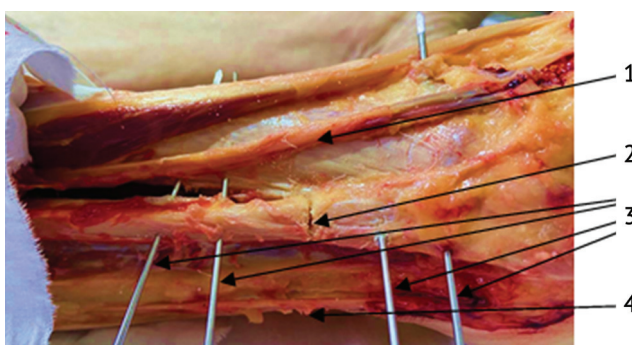


Рис. 3. Состояние после остеотомии малоберцовой кости: 1 — передняя большеберцовая артерия; 2 — линия сформированного перелома малоберцовой кости; 3 — спицы Киршнера; 4 — малоберцовый нерв

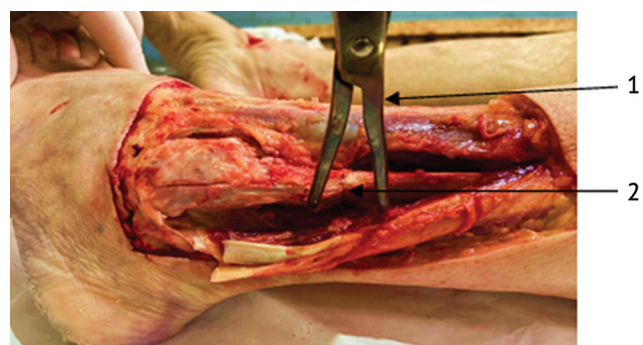


Рис. 4. Временная фиксация отломков: 1 — костодержатель; 2 — линия сформированного перелома малоберцовой кости

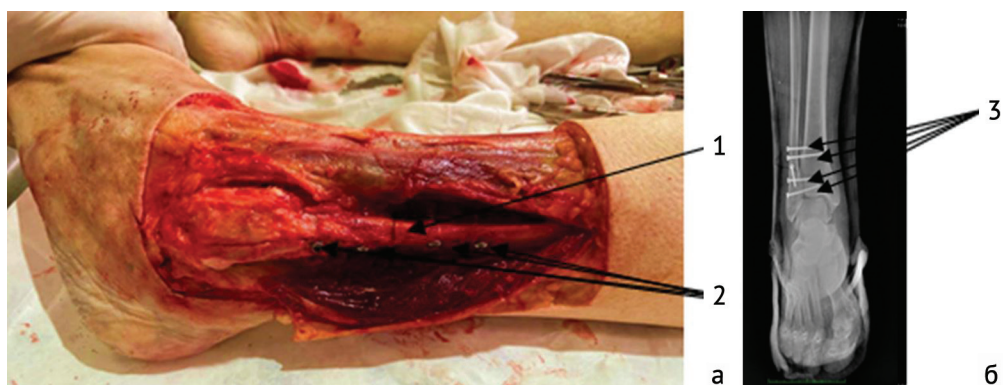


Рис. 5. Остеосинтез перелома по предложенной методике (а) и рентгенограмма травмированного сегмента после выполнения остеосинтеза по предложенной схеме (б): 1 — линия сформированного перелома малоберцовой кости; 2 — головки винтов после их введения; 3 — кортикальные винты

Визуальную оценку остеосинтеза на предмет степени фиксации перелома проводили во время выполнения стресс-тестов, направленных на максимальные медиализацию и латерализацию стопы, а также в крайних положениях подошвенной и тыльной флексий.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты проведенных замеров представлены в табл. 1.

Полученные объективные данные подтверждают результаты визуального контроля. Все это говорит о том, что предложенная методика не вызывает конфликт спиц, которые располагаются на значительном удалении от магистральных сосудисто-нервных образований.

Таблица 1

Результаты измерений

Измерения	№ препарата											Средние значения
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Расстояние от спиц на уровне линии перелома в зоне межберцового синдесмоза, проведенной перпендикулярно длинной оси ББК, см												
до передней большеберцовой артерии	1,2	1,1	1,3	1,0	1,3	1,2	1,0	1,1	1,3	1,2	1,0	1,1 ± 0,2
до малоберцового нерва	1,9	2,1	2,0	1,8	2,3	2,1	1,7	1,8	1,9	2,2	1,8	1,9 ± 0,4
Длина МБК от головки до верхушки латеральной лодыжки, см	41,5	40,2	42,4	41,0	41,2	42,0	41,3	41,9	40,3	42,1	41,7	41,4 ± 0,5
Расстояние от верхушки латеральной лодыжки, см												
до сформированной зоны перелома, см	6,3	6,2	6,4	6,0	6,3	6,5	6,1	6,3	6,2	6,0	6,4	6,2 ± 0,2
до дистального пучка спиц (1-я ДРС)	4,5	4,1	4,4	4,2	4,0	4,2	4,3	4,4	4,0	4,5	4,1	4,2 ± 0,3
до проксимального пучка спиц (4-я ПРС)	9,4	9,0	9,1	8,9	8,7	9,0	9,2	9,1	9,3	9,1	9,3	9,1 ± 0,3
Расстояние от спиц на уровне линии, проведенной перпендикулярно длинной оси ББК, см												
до передней большеберцовой артерии на уровне выхода пучка спиц	1-я ДРС	4,8	5,0	4,9	4,7	5,1	5,0	4,9	4,7	4,8	5,1	4,9 ± 0,2
	4-я ПРС	4,7	4,8	4,6	4,6	4,9	5,1	4,8	4,8	4,6	5,0	4,7 ± 0,4
до малоберцового нерва на уровне входа пучка спиц	1-я ДРС	2,6	2,4	2,5	2,4	2,3	2,5	2,6	2,2	2,4	2,5	2,3 ± 0,3
	4-я ПРС	2,2	2,5	2,1	2,5	2,2	2,6	2,3	2,4	2,5	2,3	2,3 ± 0,3

Примечание: ББК — большеберцовая кость; МБК — малоберцовая кость; ДРС — дистально-расположенная спица; ПРС — проксимально-расположенная спица.

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ литературы показал, что метод лечения перелома лодыжек зависит от вида повреждения. Если в результате травмы голеностопный сустав остается стабильным, то консервативные методы лечения дают отличные результаты. Однако, по мнению J.D. Michelson, после выполнения стресс-тестирования даже несмещенных повреждений синдесмоза возникает потребность в их фиксации [24]. Кроме того, иммобилизация при переломах в голеностопном суставе с помощью различных консервативных средств может привести к потере репозиции и осложнениям со стороны мягких тканей. Эти риски можно снизить хирургическим лечением, в том числе с использованием аппаратов внешней фиксации [25, 26]. Однозначным является мнение, что во всех случаях нестабильности в голеностопном суставе следует прибегать к операции. При этом фиксирующие пластины, как наиболее часто применяемый инструмент, целесообразно использовать и при наличии мини фрагментов в зоне перелома [27]. В то же время некоторые авторы для фиксации нестабильных дистальных переломов малоберцовой кости предлагают осуществлять интрамедуллярный остеосинтез [28]. В пользу этого говорит экспериментальное исследование, доказавшее преимущество фиксационных возможностей данной методики по сравнению с традиционной фиксацией пластиной [29].

В последнее время авторы придают особое значение повреждениям межберцового синдесмоза. Так, Ф.Л. Лазко предпочитает применять его динамическую фиксацию и предлагает использовать металлические пуговицы в комбинации с нитью [30]. Ф.А. Гафуров данную методику считает хорошей альтернативой традиционной статической фиксации с помощью позиционного винта [31]. Однако ряд авторов указывает, что динамическая фиксация, несмотря на свою актуальность, является достаточно финансово затратной. Поэтому статические методики по-прежнему остаются важным инструментом в арсенале травматологов и ортопедов [30, 31]. В то же время S.C. Murphy не видит существенной разницы между этими способами, хотя последние могут способствовать развитию послеоперационных осложнений и увеличению частоты повторных операций [32].

Предложенный нами гибридный способ остеосинтеза малоберцовой кости имеет следующую особенность, — места входа и выхода винтов находятся в зоне расположения передней большеберцовой артерии и малоберцового нерва. Именно поэтому мы провели данное исследование, доказавшее безопасность предложенной методики и ряд ее преимуществ по сравнению с традиционным способом остеосинтеза малоберцовой кости в нижней трети.

Таким образом, данный способ остеосинтеза при переломах лодыжек 44C1, 44C2 (по классификации АО) может быть применен в клинической практике. Он обладает простотой исполнения, малотравматичностью и металлоемкостью, а также широкой доступностью для оказания медицинской помощи пострадавшим в учреждениях с разной степенью оснащенности, снижая финансовые затраты на лечение данной категории пациентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный способ гибридного остеосинтеза малоберцовой кости у пострадавших с переломами лодыжек способствует стабильной фиксации отломков в зоне перелома, является безопасным и технически возможным в клинических условиях. Полученные результаты исследования позволяют рекомендовать разработанный способ к применению в клинической практике.

Конфликт интересов не заявлен.

Источник финансирования не заявлен.

Этическая экспертиза. Исследование освобождено от необходимости оценки этическим комитетом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ли С., Москалев В.П. Обзор способов лечения переломов лодыжек. *Учёные записки Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета имени академика И. П. Павлова*. 2015;22(3):6-10. doi: 10.24884/1607-4181-2015-22-3-6-10.
2. Сластинин В.В., Клюквин И.Ю., Филиппов О.П., Боголюбовский Ю.А. Внутрисуставные переломы дистального отдела большеберцовой кости: эволюция взглядов на хирургическое лечение (обзор литературы). *Журнал им. Н.В. Склифосовского «Неотложная медицинская помощь»*. 2015;(3):23-29.
3. Lehtonen H, Järvinen TL, Honkonen S, et al. Use of a cast compared with a functional ankle brace after operative treatment of an ankle fracture. A prospective, randomized study. *J Bone Joint Surg Am*. 2003;85(2):205-211. doi: 10.2106/00004623-200302000-00004.
4. Court-Brown CM, Caesar B. Epidemiology of adult fractures: A review. *Injury*. 2006;37(8):691-697. doi: 10.1016/j.injury.2006.04.130.
5. Franke J, von Recum J, Suda AJ, et al. Intraoperative three-dimensional imaging in the treatment of acute unstable syndesmotic injuries. *J Bone Joint Surg Am*. 2012;94(15):1386-1390. doi: 10.2106/JBJS.K.01122.
6. Омельченко Т.Н. Переломы лодыжек и быстропрогрессирующий остеоартроз голеностопного сустава: профилактика и лечение. *Ортопедия, травматология и протезирование*. 2013;(4):35-40.
7. Яременко Д.А., Шевченко Е.Г., Таршис В.Б. Внутрисуставные повреждения нижних конечностей как причины стойкой утраты трудоспособности. *Ортопедия, травматология и протезирование*. 1994;(Прил.):46-47.
8. Ролік О.В., Засаднюк І.А. Незрощення довгих кісток (аналіз, фактори ризику, лікувальна тактика). *Ортопедия, травматология и протезирование*. 2005;(2):61-65.
9. Thomas RH, Daniels TR. Ankle arthritis. *J Bone Joint Surg Am*. 2003;85(5):923-936. doi: 10.2106/00004623-200305000-00026.
10. Valderrabano V, Hintermann B, Horisberger M, Fung TS. Ligamentous posttraumatic ankle osteoarthritis. *Am J Sports Med*. 2006;34(4):612-620. doi: 10.1177/0363546505281815.
11. Elsoe R, Ostgaard SE, Larsen P. Population-based epidemiology of 9767 ankle fractures. *Foot Ankle Surg*. 2018;24(1):34-39. doi: 10.1016/j.fas.2016.11.002.
12. Martijn HA, Lambers KTA, Dahmen J, et al. High incidence of (osteo)chondral lesions in ankle fractures. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2021;29(5):1523-1534. doi: 10.1007/s00167-020-06187-y.
13. Leontaritis N, Hinojosa L, Panchbhavi VK. Arthroscopically detected intra-articular lesions associated with acute ankle fractures. *J. Bone Joint. Surg. Am*. 2009;91(2):333-339. doi: 10.2106/JBJS.H.00584.
14. Assal M, Ray A, Stern R. Strategies for surgical approaches in open reduction internal fixation of pilon fractures. *J Orthop Trauma*. 2015;29(2):69-79. doi: 10.1097/BOT.0000000000000218.
15. McFerran MA, Smith SW, Boulas HJ, Schwartz HS. Complications encountered in the treatment of pilon fractures. *J Orthop Trauma*. 1992;6(2):195-200. doi: 10.1097/00005131-199206000-00011.
16. Teeny SM, Wiss DA. Open reduction and internal fixation of tibial plafond fractures. Variables contributing to poor results and complications. *Clin Orthop Relat Res*. 1993;(292):108-117.
17. Толеуханов Б.О., Долгов А.А., Абилямажинов М.Т., и др. К вопросу о сложных переломах лодыжек. *Астана медицинский журнал*. 2019;3(101):259-264.
18. Телицын П.Н., Жила Н.Г. Тактика лечения переломов и переломовывихов костей голеностопного сустава. *Дальневосточный медицинский журнал*. 2016;(3):31-35.
19. Горбатов Р.О., Павлов Д.В., Малышев Е.Е. Современное оперативное лечение переломов лодыжек и их последствий (обзор). *Современные технологии в медицине*. 2015;7(2):153-167. doi: 10.17691/stm2015.7.2.20.
20. Рюди Т.П., Бабли Р.Э., Моран К.Г. АО — Принципы лечения переломов. Второе переработанное и дополненное издание. Васса Медиа; 2013;2:870-896.
21. Marazzi C, Wittauer M, Hirschmann MT, Testa EA. Minimally invasive plate osteosynthesis (MIPO) versus open reduction and internal fixation (ORIF) in the treatment of distal fibula Danis-Weber types B and C fractures. *J Orthop Surg Res*. 2020;15(1):491. doi: 10.1186/s13018-020-02018-5.
22. Кашанский Ю.Б., Кондратьев И.П., Кучеев И.О. и др. Математическое обоснование чрескостного остеосинтеза короткими спицами с незамкнутыми наружными опорами. *Медлайн.ру*. 2019;20:373-384.
23. Цапенко В.О., Кашанский Ю.Б., Кондратьев И.П. и др. *Способ лечения переломов костей голени и предплечья*. Патент РФ на изобретение № 2691015. 07.06.2019. Бюл. № 16. Доступно по: <https://patentimages.storage.googleapis.com/dc/a8/8c/183f543c027b09/RU2302835C1.pdf>. Ссылка активна на 06.05.2025.
24. Michelson JD, Wright M, Blankstein M. Syndesmotic Ankle Fractures. *J Orthop Trauma*. 2018;32(1):10-14. doi: 10.1097/BOT.0000000000000937.
25. Buyukkusu MO, Basilgan S, Mollaomeroglu A, et al. Splinting vs temporary external fixation in the initial treatment of ankle fracture-dislocations. *Foot Ankle Surg*. 2022;28(2):235-239. doi: 10.1016/j.fas.2021.03.018.
26. Sanders DW, Tieszer C, Corbett B; Canadian Orthopedic Trauma Society. Operative versus nonoperative treatment of unstable lateral malleolar fractures: a randomized multicenter trial. *J Orthop Trauma*. 2012;26(3):129-134. doi: 10.1097/BOT.0b013e3182460837.
27. Aiyer AA, Zachwieja SP, Lawrie CM, Kaplan JRM. Management of Isolated Lateral Malleolus Fractures. *J Am Acad Orthop Surg*. 2019;27(2):50-59. doi: 10.5435/JAAOS-D-17-00417.
28. Jain S, Haughton BA, Brew C. Intramedullary fixation of distal fibular fractures: a systematic review of clinical and functional outcomes. *J Orthop Traumatol*. 2014;15(4):245-254. doi: 10.1007/s10195-014-0320-0.
29. Smith G, Mackenzie SP, Wallace RJ, et al. Biomechanical Comparison of Intramedullary Fibular Nail Versus Plate and Screw Fixation. *Foot Ankle Int*. 2017;38(12):1394-1399. doi: 10.1177/1071100717731757.
30. Лазко Ф.Л., Загородний Н.В., Семенов А.Ю., и др. Хирургическое лечение переломов лодыжек с повреждением дистального межберцового синдесмоза. Статическая и динамическая фиксация межберцового синдесмоза, сравнение результатов. *Хирургическая практика*. 2018;34(2):15-21. doi: 10.17238/issn2223-2427.2018.2.15-21.

31. Гафуров Ф.А., Ходжанов И.Ю., Мансуров Д.Ш., Эранов Ш.Н. Внутрикостный остеосинтез при переломах лодыжек с разрывом дистального синдесмоза. *Гений ортопедии*. 2024;30(1):142-152. doi: 10.18019/1028-4427-2024-30-1-142-152.
32. Murphy SC, Murphy B, O'Loughlin P. Syndesmotic injury with ankle fracture: A systematic review of screw vs dynamic fixation. *Ir J Med Sci*. 2024;193(3):1323-1330. doi: 10.1007/s11845-024-03619-3.

Статья поступила 28.03.2025; одобрена после рецензирования 28.04.2025; принята к публикации 05.06.2025.

The article was submitted 28.03.2025; approved after reviewing 28.04.2025; accepted for publication 05.06.2025.

Информация об авторах:

Владимир Олегович Цапенко — младший научный сотрудник, vovantsapa@mail.ru;

Юрий Борисович Кашанский — доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник;

Игорь Павлович Кондратьев — кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник;

Анатолий Васильевич Поликарпов — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, dr.polikarpov@gmail.com;

Ростислав Вадимович Вашетко — доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник.

Information about the authors:

Vladimir O. Tsapenko — Junior Researcher, vovantsapa@mail.ru;

Yuri B. Kashansky — Doctor of Medical Sciences, Leading Researcher;

Igor P. Kondratyev — Candidate of Medical Sciences, senior researcher;

Anatoly V. Polikarpov — Candidate of Medical Sciences, orthopaedic surgeon, dr.polikarpov@gmail.com;

Rostislav V. Vashetko — Doctor of Medical Sciences, Leading Researcher.

Научная статья

УДК 616.717.4-001.59:(616.71-089.844+616.71-089.227.84):616.71-003.93

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-4-502-509>



Вариант восстановления плечевой кости при псевдоартрозе свободными аутотрансплантатами малоберцовой кости в условиях чрескостного остеосинтеза

Ш.М. Давиров¹, П.У. Уринбаев², Д.Ш. Мансуров², Ф.А. Гафуров², Д.Ю. Борзунов^{3,4}✉

¹ Самаркандский филиал Республиканского специализированного научно-практического медицинского центра травматологии и ортопедии, Самарканд, Узбекистан

² Самаркандский государственный медицинский университет, Самарканд, Узбекистан

³ Уральский государственный медицинский университет, Екатеринбург, Россия

⁴ Центральная городская клиническая больница № 23, Екатеринбург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Юрьевич Борзунов, borzunov@bk.ru

Аннотация

Введение. Результатом безуспешной хирургической реабилитации пациентов с переломами плечевой кости является формирование многокомпонентного патологического симптомокомплекса, включающего ложный сустав или костный дефект, изменение формы и длины отломков плечевой кости, развитие стойких ангиотрофических расстройств верхней конечности и контрактур плечевого и локтевого суставов. Несмотря на эффективность использования погружных металлоконструкций, имеются риски безуспешных оперативных вмешательств и несостоятельности остеосинтеза при сложных анатомо-функциональных поражениях.

Цель работы — продемонстрировать новую технологию использования свободных фрагментов малоберцовой кости в качестве костно-пластического материала для восстановления целостности плечевой кости при ложных суставах и костных дефектах в условиях чрескостного остеосинтеза и трансоссальной фиксации имплантатов спицами.

Материалы и методы. В качестве костно-пластического материала использовали свободный ауто-трансплантат малоберцовой кости в виде цилиндра – фрагмента, который резецировали проксимальнее уровня голеностопного сустава на 8,0-9,0 см. Интраоперационно имплантат малоберцовой кости фрагментировали. Имплантацию фрагментов осуществляли по периферии отломков плечевой кости с перекрытием зоны псевдоартроза. Свободные аутотрансплантаты малоберцовой кости трансоссально фиксировали спицами. Для фиксации сегмента использовали спице-стержневой вариант аппарата Илизарова из трех внешних опор.

Обсуждение. «Золотым стандартом» костно-пластического материала является аутокость. При локализации дефектов и ложных суставов плечевой кости в дистальном метаэпифизе использование малоберцовой кости в дизайне цилиндра – фрагмента с внутрикостным армированием плечевой кости технически затруднено. Открытая адаптация плечевой кости с адекватным контактом между отломками, использование оптимального аутогенного костно-пластического материала с перекрытием зоны псевдоартроза для увеличения объема костной массы обеспечивают восстановление костной регенерации в зоне псевдоартроза. Для фиксации отломков плечевой кости и костных имплантатов оптимальным является использование аппаратов внешней фиксации.

Заключение. Оригинальность разработанной технологии заключается в использовании нескольких свободных костных аутотрансплантов, сформированных из малоберцовой кости и имплантируемых по периферии зоны стыка отломков плечевой кости. Зона активного остеогенеза создается благодаря комбинированному эффекту открытой адаптации концов отломков плечевой кости с резекцией замыкательных пластинок и костной аутопластикой с перекрытием проблемной зоны. Дополнительная трансоссальная фиксация костных аутотрансплантатов спицами обеспечивает стабильность свободных имплантатов. Управляемая фиксация отломков плечевой кости с поддержанием компрессии и адекватного контакта отломков достигается при использовании аппарата Илизарова.

Ключевые слова: псевдоартроз, ложный сустав, плечевая кость, аутотрансплантаты малоберцовой кости, чрескостный остеосинтез, Илизаров, костно-пластический материал

Для цитирования: Давиров Ш.М., Уринбаев П.У., Мансуров Д.Ш., Гафуров Ф.А., Борзунов Д.Ю. Вариант восстановления плечевой кости при псевдоартрозе свободными аутотрансплантатами малоберцовой кости в условиях чрескостного остеосинтеза в. *Гений ортопедии*. 2025;31(4):502-509. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-502-509.

Original article

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-4-502-509>



Variant of bone restoration in humeral nonunion with a free fibular autograft in the conditions of transosseous osteosynthesis

Sh.M. Davirov¹, P.U. Urinbaev², Dz.Sh. Mansurov², F.A. Gafurov², D.Yu. Borzunov^{3,4}✉

¹ Samarkand branch of the Republican specialized scientific and practical medical center of traumatology and orthopedics, Samarkand, Uzbekistan

² Samarkand State Medical University, Samarkand, Uzbekistan

³ Ural State Medical University, Yekaterinburg, Russian Federation

⁴ Central city clinical hospital No. 23, Yekaterinburg, Russian Federation

Corresponding author: Dmitry Yu. Borzunov, borzunov@bk.ru

Abstract

Introduction Failures in surgical rehabilitation of patients with humeral fractures result in the formation of a multicomponent complex of pathological symptoms, including nonunion or bone defect, changes in the shape and length of humeral fragments, development of persistent angiotrophic disorders of the upper limb and contractures of the shoulder and elbow joints. Despite the effectiveness of using metal implants, there are risks in surgical osteosynthesis in complex anatomical and functional lesions.

The **purpose** of the work was to demonstrate a new technology of bone plasty with free fragments of the fibula as a bone-plastic material for restoring the integrity of the humerus in bone nonunion and defects in the conditions of transosseous osteosynthesis and transosseous fixation of the grafts with wires.

Materials and methods A free autograft of the fibula shaped as a cylindrical fragment, which was resected proximally to the ankle joint level at 8.0-9.0-cm distance, was used as a bone plastic material. The fibula graft was fragmented intraoperatively. Fragments were implanted along the periphery of the humerus fragments overlapping of the pseudarthrosis site. Free autografts of the fibula were transosseously fixed with wires. A wire/half-pine Ilizarov apparatus with three external supports was placed to fix the segment.

Discussion The "gold standard" material for bone plasty is autogenous bone. If defects and pseudoarthroses of the humerus are located in the distal metaepiphysis, the application of the fibular cylinder-shaped fragment with intraosseous reinforcement of the humeral bone is technically difficult. Open co-aptation of the humeral fragments with adequate contact between them and application of the optimal autogenous bone-plastic material which overlaps the pseudarthrosis zone to increase the volume of bone mass ensure the restoration of bone regeneration in the pseudarthrosis zone. External fixation is optimal for fixation of bone fragments and grafts.

Conclusion The originality of the developed technology lies in the use of several free bone autografts from the fibula implanted along the periphery of the humeral fragments junction. The area of active osteogenesis is thus created due to the combined effect of open co-aptation of the ends of the humeral fragments with resection of the endplates and bone autogenous grafts that overlap the problematic area. Additional transosseous fixation of bone autografts with wires ensures the stability of free grafts. Controlled fixation of humeral fragments with compression and adequate contact of the fragments is achieved with the Ilizarov apparatus.

Keywords: nonunion, pseudarthrosis, humerus, fibular autografts, transosseous osteosynthesis, Ilizarov, bone plasty material

For citation: Davirov SM, Urinbaev PU, Mansurov DzSh, Gafurov FA, Borzunov DYU. Variant of bone restoration in humeral nonunion with a free fibular autograft in the conditions of transosseous osteosynthesis. *Genij Ortopedii*. 2025;31(4):502-509. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-502-509.

ВВЕДЕНИЕ

По данным Федеральной службы государственной статистики РФ повреждения верхних конечностей в период с 2020 по 2023 гг. составляли от 34,6 % до 34,9 % в структуре скелетной травмы и ее последствий. К сожалению, не все пациенты со скелетной травмой верхней конечности имели благоприятные исходы лечения. Так, при переломах плечевой кости ложные суставы и костные дефекты выявляли в 2–30 % случаев [1]. Как правило, в результате безуспешной хирургической реабилитации у пациентов формируется многокомпонентный патологический симптомокомплекс, включающий ложный сустав или костный дефект, изменение формы и длины отломков плечевой кости, развитие стойких ангиотрофических расстройств верхней конечности и контрактур плечевого и локтевого суставов [2]. Патологические процессы отражаются на архитектонике костной ткани отломков плечевой кости, что приводит к их эбурнеации и атрофии, при этом отломки имеют мозаичное сочетание на протяжении участков склероза и остеопороза [2].

По данным литературы, в настоящее время ортопеды-травматологи в качестве средств и способов фиксации отдают предпочтение динамическим пластинам DCP, LCP, интрамедуллярному блокируемому остеосинтезу. Вместе с тем, признавая эффективность использования погружных металлоконструкций, авторы признают наличие рисков безуспешности оперативных вмешательств и в ряде случаев несостоятельности остеосинтеза при сложных анатомо-функциональных поражениях плечевой кости [1, 3–6].

Цель работы — продемонстрировать новую технологию использования свободных фрагментов малоберцовой кости в качестве костно-пластического материала для восстановления целостности плечевой кости при ложных суставах и костных дефектах в условиях чрескостного остеосинтеза и трансоссальной фиксации имплантатов спицами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проведена ретроспективная оценка реконструкции плечевой кости с использованием свободных аутооттрансплантатов малоберцовой кости в условиях чрескостного остеосинтеза и трансоссальной фиксации имплантатов спицами. Новизна технологии подтверждена зарегистрированной в ФИПС заявкой на получение Патента на изобретение «Аутооттрансплантация малоберцовой кости при дефектах диафиза длинных трубчатых костей» (рег. № 2024137957 от 17.12.2024).

Техническое исполнение

В качестве костно-пластического материала использовали свободный аутооттрансплантат малоберцовой кости в виде цилиндра – фрагмента длиной до 7 см, который резецировали проксимальнее уровня голеностопного сустава на 8–9 см. Резецированный аутооттрансплантат малоберцовой кости разделяли на два цилиндра – фрагмента и фрагментировали по длине на несколько имплантатов. Далее выполняли доступ к зоне псевдоартроза, резецировали сформированные замыкательные пластинки на концах отломков, отломки плечевой кости адаптировали с созданием торцевого контакта. Для увеличения объема костной массы в зоне псевдоартроза и костного дефекта, а также предполагаемого увеличения прочностных свойств формируемой мозоли по периферии зоны ложного сустава имплантировали ранее заготовленные костные аутооттрансплантаты с перекрытием зоны стыка отломков. Для исключения возможности миграции аутооттрансплантатов их дополнительно фиксировали трансоссально проведенными спицами, погруженными в мягкие ткани плеча по периферии. После контроля гемостаза рану зашивали послойно и наглухо. Для фиксации сегмента использовали аппарат Илизарова из трех внешних опор в спице-стержневом варианте фиксации костных отломков. Учитывая трансоссальную фиксацию костных трансплантатов и создание торцевого упора между отломками плечевой кости, мы воздержались от традиционного поддержания компрессии на стыке отломков в послеоперационном периоде, фактически перейдя на нейтральный вариант чрескостного остеосинтеза. После сращения отломков по результатам рентгенконтроля и клинической пробы консолидации аппарат Илизарова демонтировали.

Клинический пример

Пациент 38 лет поступил в клинику 23.04.2024. Давность травмы — 19 лет. Пациент перенес неоднократные и безуспешные оперативные вмешательства. К сожалению, полной медицинской документации о предшествующих этапах лечения пациент на руках не имел.

Несращение левой плечевой кости пациента классифицировано как ложный сустав с нормотрофическим типом костеобразования по классификации Weber & Szech [7] и верифицировано как дефект-псевдоартроз левой плечевой кости с анатомическим укорочением 6 см по классификации В.И. Шевцова с соавт. [2].

В результате перенесенных операций пациент имел многочисленные точечные и линейные рубцы, а также стойкие комбинированные контрактуры левых плечевого и локтевого суставов с резким ограничением функции верхней конечности. Движения на уровне левого локтевого сустава были возможны в основном за счет патологической подвижности в зоне сформированного неартроза (рис. 1).



Рис. 1. Фото больного и рентгенограммы левой плечевой кости в двух проекциях при поступлении пациента в клинику

В Самаркандском филиале РСНПМЦ ТО пациенту выполнена открытая адаптация отломков левой плечевой кости. Концы отломков экономно резецированы, вскрыты костномозговые каналы, создан торцевой контакт между ними. В зону псевдоартроза плечевой кости по периферии имплантированы фрагменты малоберцовой кости, которые дополнительно фиксировали спицами. Фиксацию сегмента осуществляли аппаратом Илизарова из трех опор в спице-стержневой компоновке (рис. 2). Пациенту в процессе динамического наблюдения регулярно проводили клинические осмотры с рентгенологическими исследованиями, при этом отмечена положительная динамика перестройки имплантатов и формирование костной мозоли в зоне псевдоартроза отломков плечевой кости (рис. 3).

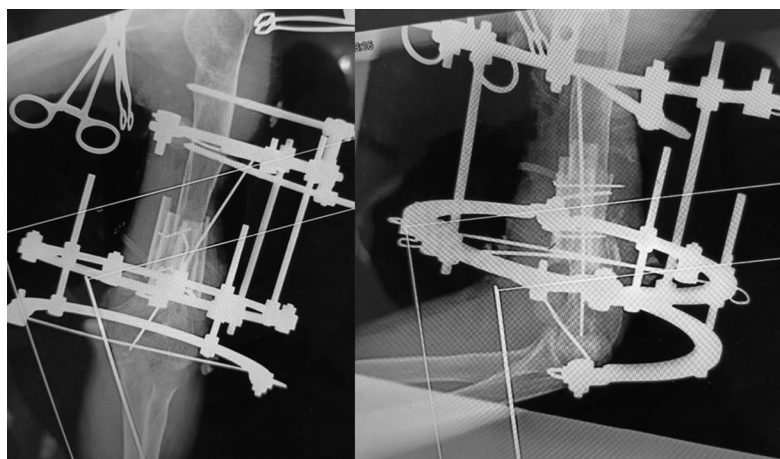


Рис. 2. Интраоперационные рентгенограммы левой плечевой кости в двух проекциях (26.04.2024)

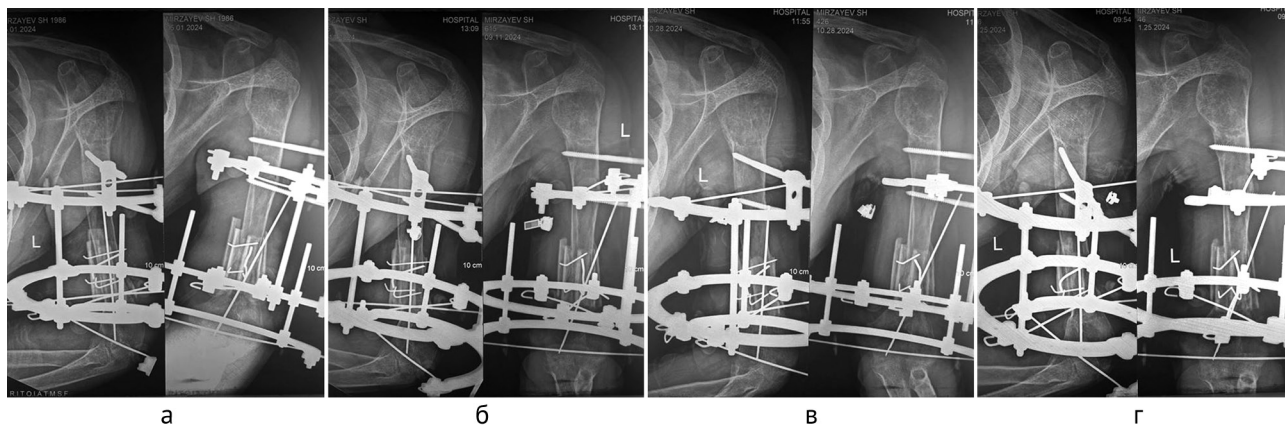


Рис. 3. Контрольные рентгенограммы левой плечевой кости в двух проекциях в динамике: а — 16.08.2024; б — 11.09.2024; в — 28.10.2024; г — 25.11.2024

После рентгенконтроля и клинической пробы консолидации выявлено достижение костного сращения с увеличением объема костной массы на уровне псевдоартроза. Свободные аутотрансплантаты малоберцовой кости перестроены, лизис и признаки остеонекроза костной ткани отсутствуют. Аппарат Илизарова демонтирован (рис. 4). Через три месяца после демонтажа аппарата результат лечения сохраняется, завершено ремоделирование новообразованной костной ткани (рис. 5).



Рис. 4. Фото больного и рентгенограммы левой плечевой кости в двух проекциях после демонтажа аппарата наружной фиксации и удаления трансоссально проведенных спиц (14.01.2025)



Рис. 5. Контрольные рентгенограммы левой плечевой кости в двух проекциях через три месяца после демонтажа аппарата (14.04.2025)

ОБСУЖДЕНИЕ

Мы считаем, что в сложных клинических ситуациях внешнюю фиксацию можно рассматривать как альтернативный вариант остеосинтеза. Безусловно, эта идея не нова. По нашим данным, впервые возможность и эффективность чрескостного остеосинтеза при лечении пациентов с ложными суста-

вами и дефектами плечевой кости были описаны в диссертационном исследовании В.И. Шевцова [8]. Несмотря на продолжительную историю успешного применения чрескостного остеосинтеза при лечении пациентов с дефектами и ложными суставами плечевой кости, нет оснований утверждать о широком распространении и популярности данного варианта фиксации. В основном публикации, посвященные данной проблеме, исходили от исследователей Центра Илизарова [2, 9–11].

Однако, в последнее время в литературе появились публикации авторов из Узбекистана об успешном применении чрескостного остеосинтеза для коррекции деформаций и ликвидации псевдоартрозов плечевой кости [12–15]. Выбор варианта остеосинтеза и фиксации отломков плечевой кости не является единственной проблемой в хирургической реабилитации пациентов с дефектами и ложными суставами плечевой кости. Для восстановления целостности плечевой кости необходимы открытая адаптация концов отломков с созданием между ними плотного контакта, вскрытие костномозговых каналов с использованием костнопластических материалов, в основном алло- и аутооттрансплантатов, в случае формирования костных дефектов [1, 16].

Известно, что «золотым стандартом» костно-пластического материала является аутокость, при этом эффективным и популярным признано использование малоберцовой кости в качестве наиболее доступного аутооттрансплантата [4, 17–20]. Безусловно, исследователи отдавали предпочтение использованию кровоснабжаемой малоберцовой кости с восстановленным артерио-венозным шунтированием [21–27]. Однако, данная технология сложна, двухэтапна, требует применения микрохирургической техники, создает проблемы в донорской зоне, сам ремплантат имеет риски тромбозов артериовенозных шунтов, да и в ряде клинических ситуаций операция технически не выполнима [28–31].

По нашим данным, впервые малоберцовую кость для реконструкции плечевой кости с интрамедуллярной фиксацией реплантата решили использовать T.W. Wright et al. [4]. В литературе можно встретить публикации об успешном применении свободной некровоснабжаемой малоберцовой кости у пациентов с ложными суставами плечевой кости, при этом авторы для фиксации отломков отдавали предпочтение пластинам с угловой стабильностью [16, 17, 20].

Опубликован опыт успешного замещения атрофических дефектов плечевой кости у пациентов, когда свободный аутооттрансплантат малоберцовой кости имплантировали в костно-мозговой канал плечевой кости, фиксацию отломков и поддержание компрессии осуществляли с помощью аппарата Илизарова [32], новизна разработанной технологии подтверждена патентом РФ [33].

Однако, в ряде клинических ситуаций внутрикостная имплантация, как вариант локализация посттравматического дефекта в дистальном отделе плечевой кости, и формирование интрамедуллярного канала с рассверливанием в межмышечковой зоне плечевой кости невозможны из-за анатомических особенностей плечевой кости и рисков ятрогенных переломов при формировании канала. Поэтому при локализации дефектов и ложных суставов плечевой кости в дистальном метаэпифизе использование малоберцовой кости в дизайне цилиндр – фрагмента с внутрикостным армированием плечевой кости по предложенной ранее технологии технически не возможно [32, 33].

Основываясь на данных литературы по поиску и разработке новых инновационных костно-пластических материалов, необходимо отметить, что до настоящего времени оптимальным по остеоиндуктивным и остеокондуктивным свойствам по-прежнему являются аутооттрансплантаты, не имеющие рисков отрицательных иммунных ответов и способные к полной органотипической перестройке [32, 34]. Ключевым недостатком использования костных аутооттрансплантатов являются ограниченные объемы костно-пластического материала [35]. Вместе с тем, в ряде сложных клинических ситуаций при костных дефектах верхних конечностей не требуются значительные объемы имплантационного материала. Рациональное использование имеющегося донорского материала может обеспечить необходимые объемы утраченной костной ткани.

Основываясь на данной концепции, мы рассматривали возможности замещения дефектов плечевой кости свободными аутооттрансплантатами из малоберцовой кости как вполне достаточные и рациональные. Представленный в клиническом примере пациент имел ложный сустав плечевой кости, локализованный в дистальном метаэпифизе, комбинированные стойкие контрактуры смежных суставов, выраженную патологическую подвижность костных отломков. Учитывая особенности сформированных патологических анатомо-функциональных изменений верхней конечности у пациента, эффективность применения динамических пластин DCP, LCP, интрамедуллярных блокируемых фиксаторов является сомнительной, так как эти инструменты имеют ограничения по силе и времени воздействия.

По данным литературы, основной причиной сохранения несращений и отсутствия положительных результатов после реконструктивных вмешательств является недостаток жесткой и стабильной фиксации отломков плечевой кости [5, 6, 36, 37]. Для достижения сращения необходим адекватный контакт между концами отломков [38]. Открытая адаптация плечевой кости с адекватным контактом

между отломками, использование оптимального аутогенного костно-пластического материала обеспечивает создание зоны костной регенерации в зоне псевдоартроза. По нашему мнению, при таком варианте костной пластики аппараты внешней фиксации имеют неоспоримые преимущества при фиксации отломков плечевой кости и костных имплантатов. Увеличение объема костной массы в зоне ложного сустава в результате ремоделирования кости в зоне адаптации концов отломков и организационной перестройки свободных аутоотрансплантатов позволяет рекомендовать данную технологию для восстановления целостности плечевой кости не только при нормотрофических ложных суставах, но и при атрофических несращениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новизна подходов и оригинальность разработанной технологии заключается в использовании нескольких свободных костных аутоотрансплантатов, сформированных из малоберцовой кости и имплантируемых по периферии зоны стыка отломков плечевой кости. В настоящее время, несмотря на активный поиск и разработку инновационных костнопластических материалов, наиболее эффективным и общепризнанным является использование аутоотрансплантатов, при этом в качестве «золотого стандарта» для костной пластики используют малоберцовую кость. Зона активного остеогенеза создается благодаря комбинированному эффекту открытой адаптации концов отломков плечевой кости с резекцией замыкательных пластинок и костной аутопластикой с перекрытием проблемной зоны. Дополнительная трансоссальная фиксация костных аутоотрансплантатов спицами обеспечивает стабильность свободных имплантатов. Управляемая фиксация отломков плечевой кости с поддержанием компрессии и адекватного контакта отломков достигается с помощью использования аппарата Илизарова.

Конфликт интересов. Не заявлен.

Источник финансирования. Не заявлен.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Campochiaro G, Baudi P, Gialdini M, et al. Humeral shaft non-union after intramedullary nailing. *Musculoskelet Surg*. 2017;101(2):189-193. doi: 10.1007/s12306-017-0468-x.
2. Шевцов В.И., Макушин В.Д., Куфтырев Л.М., Солдатов Ю.П. *Псевдоартрозы, дефекты костей верхней конечности и контрактуры локтевого сустава (базовые технологии лечения аппаратом Илизарова)*. Курган: Зауралье; 2001:407.
3. Pantalone A, Vanni D, Guelfi M, et al. From plate to nail: a case-report of proximal humerus non-union. *Injury*. 2015;46(Suppl 7):S48-50. doi: 10.1016/S0020-1383(15)30046-2.
4. Wright TW, Miller GJ, Vander Griend RA, et al. Reconstruction of the humerus with an intramedullary fibular graft. A clinical and biomechanical study. *J Bone Joint Surg Br*. 1993;75(5):804-807. doi: 10.1302/0301-620X.75B5.8376445.
5. Ring D, Jupiter JB, Quintero J, et al. Atrophic ununited diaphyseal fractures of the humerus with a bony defect: treatment by wave-plate osteosynthesis. *J Bone Joint Surg Br*. 2000;82(6):867-871. doi: 10.1302/0301-620X.82b6.10124.
6. Rubel IF, Kloen P, Campbell D, et al. Open reduction and internal fixation of humeral nonunions: a biomechanical and clinical study. *J Bone Joint Surg Am*. 2002;84(8):1315-1322. doi: 10.2106/00004623-200208000-00004.
7. Weber TW, Cech O. *Pseudarthrosis: pathophysiology, biomechanics, therapy, results*. New York: Grune and Stratton Publ.; 1976:323.
8. Шевцов В.И. *Закрытый компрессионно-дистракционный остеосинтез по Илизарову при лечении ложных суставов плечевой кости*: дис... канд. мед. наук. Курган; 1976:175.
9. Шевцов В.И., Свешников А.А., Носова Л.Н., Шапошникова Г.В. Возмещение диафизарных дефектов плечевой кости удлинением одного или обоих отломков по Илизарову. *Травматология и ортопедия России*. 1995;5:63-64.
10. Шапошникова Г.В. *Лечение больных с дефектами плечевой кости методом чрескостного остеосинтеза по Илизарову*: дис... канд. мед. наук. Курган; 1996:209.
11. Шевцов В.И., Шапошникова Г.В. Анатомо-функциональная реабилитация больных с дефектами плечевой кости по Илизарову. *Гений ортопедии*. 1996;(2-3):73.
12. Субанбеков Э. Обоснование исследования проблемы посттравматических деформации чрезмышелковых и надмышелковых переломов плечевой кости у детей. *Синергия наук*. 2018;(21):325-334. URL: <https://synergy-journal.ru/archive/article1973>.
13. Давиров Ш.М., Уринбоев П.У. Лечение пациента с открытым переломом костей предплечья и обширным дефектом костной ткани (случай из практики). *Гений ортопедии*. 2021;27(1):87-91. doi: 10.18019/1028-4427-2021-27-1-87-91.
14. Давиров Ш.М., Уринбоев П.У. Лечение пациента с открытым переломом плечевой кости с обширным дефектом костной ткани с использованием костной пластики (случай из практики). *Гений ортопедии*. 2022;28(1):91-96. doi: 10.18019/1028-4427-2022-28-1-91-96.
15. Уринбаев П.У., Давиров Ш.М., Уринбаев И.П. Эффективность оперативного лечения псевдоартрозов наружного мышелка плечевой кости у детей комбинированными методиками костнопластических операций с применением аппарата Илизарова. *Гений ортопедии*. 2024;30(1):46-58. doi: 10.18019/1028-4427-2024-30-1-46-58.
16. Babhulkar S, Babhulkar S, Vasudev A. Recalcitrant aseptic atrophic non-union of the shaft of the humerus after failure of surgical treatment: management by excision of non-union, bone grafting and stabilization by LCP in different modes. *Injury*. 2017;48(Suppl 2):S33-S43. doi: 10.1016/S0020-1383(17)30492-8.
17. Kashayi-Chowdojirao S, Vallurupalli A, Chilakamarri VK, et al. Role of autologous non-vascularised intramedullary fibular strut graft in humeral shaft nonunions following failed plating. *J Clin Orthop Trauma*. 2017;8(Suppl 2):S21-S30. doi: 10.1016/j.jcot.2016.12.006.
18. Балаев И.И., Куфтырев Л.М., Борзунов Д.Ю., Злобин А.В. Применение чрескостного остеосинтеза при лечении больного с саркомой Юинга плечевой кости. *Гений Ортопедии*. 2004;(2):63-65.
19. Борзунов Д.Ю., Митрофанов А.И., Моховиков Д.С. и др. Редкое клиническое наблюдение эхинококкового поражения диафиза плечевой кости. *Гений Ортопедии*. 2014;(2):64-68.
20. Crosby LA, Norris BL, Dao KD, McGuire MH. Humeral shaft nonunions treated with fibular allograft and compression plating. *Am J Orthop (Belle Mead NJ)*. 2000;29(1):45-47.
21. Голяна С.И., Тихоненко Т.И., Галкина Н.С., Гранкин Д.Ю. Микрохирургическая аутоотрансплантация малоберцовой кости как оптимальный метод закрытия обширных костных дефектов у детей с нейрофиброматозом. *Гений ортопедии*. 2023;29(4):368-375. doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-4-368-375.

22. Bumbasirevic M, Stevanovic M, Bumbasirevic V, et al. Free vascularised fibular grafts in orthopaedics. *Int Orthop*. 2014;38(6):1277-1282. doi: 10.1007/s00264-014-2281-6.
23. Van Den Heuvel SCM, Winters HAH, Ultee KH, et al. Combined massive allograft and intramedullary vascularized fibula transfer: the Capanna technique for treatment of congenital pseudarthrosis of the tibia. *Acta Orthop*. 2020;91(5):605-610. doi: 10.1080/17453674.2020.1773670.
24. Гаркавенко Ю.Е., Захарьян Е.А., Зубаиров Т.Ф. и др. Микрохирургическая аутотрансплантация фрагмента малоберцовой кости при лечении дефектов костей у детей – возможности дальнейшей реконструктивной хирургии. *Современные проблемы науки и образования*. 2021;(2). doi: 10.17513/spno.30624.
25. Bae DS, Waters PM, Sampson CE. Use of free vascularized fibular graft for congenital ulnar pseudarthrosis: surgical decision making in the growing child. *J Pediatr Orthop*. 2005;25(6):755-762. doi: 10.1097/01.bpo.0000186241.29415.df.
26. Bauer AS, Singh AK, Amanatullah D, et al. Free vascularized fibular transfer with langenskiöld procedure for the treatment of congenital pseudarthrosis of the forearm. *Tech Hand Up Extrem Surg*. 2013;17(3):144-150. doi: 10.1097/BTH.0b013e318295238b.
27. Ding DY, LaMartina J, Tai C, Pandya NK. Congenital Pseudoarthrosis of the Distal Radius Treated With Physseal-Sparing Double-Barrel Vascularized Free Fibula Transfer: A Case Report. *Hand (N Y)*. 2017;12(5):NP140-NP144. doi: 10.1177/1558944717702472.
28. Van Den Heuvel SCM, Winters HAH, Ultee KH, et al. Combined massive allograft and intramedullary vascularized fibula transfer: the Capanna technique for treatment of congenital pseudarthrosis of the tibia. *Acta Orthop*. 2020;91(5):605-610. doi: 10.1080/17453674.2020.1773670.
29. Гришин И.Г., Голубев В.Г., Крошкин М.М. и др. Пластика обширных дефектов длинных костей васкуляризованными малоберцовыми трансплантатами. *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова*. 2001;8(2):61-65. doi: 10.17816/vto98415.
30. Tu YK, Yen CY, Yeh WL, et al. Reconstruction of posttraumatic long bone defect with free vascularized bone graft: good outcome in 48 patients with 6 years' follow-up. *Acta Orthop Scand*. 2001;72(4):359-364. doi: 10.1080/000164701753542014.
31. 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.
32. Борзунов Д.Ю., Моховиков Д.С., Колчин С.Н. Новая технология реконструкции плеча свободным аутотрансплантатом из малоберцовой кости при гипотрофическом псевдоартрозе. *Гений ортопедии*. 2020;26(3):408-412. doi: 10.18019/1028-4427-2020-26-3-408-412.
33. Моховиков Д.С., Колчин С.Н., Борзунов Д.Ю. Способ реконструкции плечевой кости при гипотрофическом псевдоартрозе. Патент РФ на изобретение № 2695268. 22.07.2019. Бюл. № 21. Доступно по: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2695268&TypeFile=html. Ссылка активна на 16.05.2025.
34. Мухаметов У.Ф., Люлин С.В., Борзунов Д.Ю. и др. Аллопластические и имплантационные материалы для костной пластики: обзор литературы. *Креативная хирургия и онкология*. 2021;11(4):343-353. doi: 10.24060/2076-3093-2021-11-4-343-353.
35. Schmidt AH. Autologous bone graft: Is it still the gold standard? *Injury*. 2021;52(Suppl 2):S18-S22. doi: 10.1016/j.injury.2021.01.043.
36. Healy WL, White GM, Mick CA, et al. Nonunion of the humeral shaft. *Clin Orthop Relat Res*. 1987;(219):206-213.
37. Marti RK, Verheyen CC, Besselaar PP. Humeral shaft nonunion: evaluation of uniform surgical repair in fifty-one patients. *J Orthop Trauma*. 2002;16(2):108-115. doi: 10.1097/00005131-200202000-00007.
38. Sitati FC, Kingori J. Outcome of management of humerus diaphysis non-union. *East Cent Afr J Surg*. 2009;14(2):13-17.

Статья поступила 05.05.2025; одобрена после рецензирования 12.05.2025; принята к публикации 05.06.2025.

The article was submitted 05.05.2025; approved after reviewing 12.05.2025; accepted for publication 05.06.2025.

Информация об авторах:

Шароф Маждович Давиров — PhD, врач — травматолог-ортопед, заведующий отделением, sharofd1976@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-0954-4573>;

Пайзилла Уринбаевич Уринбаев — доктор медицинских наук, профессор кафедры;

Джалолдин Шамсидинович Мансуров — кандидат медицинских наук, заведующий кафедрой;

Фаррух Абуалиевич Гафуров — PhD, ассистент кафедры;

Дмитрий Юрьевич Борзунов — доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры, borzunov@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3720-5467>.

Information about the authors:

Sharof M. Davirov — PhD, orthopaedic surgeon, Head of the Department, sharofd1976@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-0954-4573>;

Paizilla U. Urinbaev — Doctor of Medical Sciences, Professor of the Department;

Dzhalolidin Sh. Mansurov — Candidate of Medical Sciences, Head of the Department;

Farrukh A. Gafurov — PhD, Assistant of the Department;

Dmitry Yu. Borzunov — Doctor of Medical Sciences, Professor, Professor of the Department, borzunov@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3720-5467>.

Клиническое наблюдение

УДК 616.728.3-007.248-089.843-77-06:617.58-007.56:616-035

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-4-510-519>



Гиперкоррекция оси нижней конечности как исход одномышцелкового эндопротезирования коленного сустава

Н.Н. Корнилов, Д.В. Чугаев, П.П. Иванов, М.Ш. Магомедов✉, Т.А. Куляба, А.С. Филь

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. Одномышцелковое эндопротезирование коленного сустава (ОЭКС) является эффективным хирургическим вмешательством, применяемым у пациентов с гонартрозом, когда преимущественно поражен один из отделов коленного сустава. Одним из факторов неблагоприятного исхода частичной артропластики может быть недостаточная или избыточная коррекция оси нижней конечности.

Цель работы — оценить возможные пути профилактики недостаточной или избыточной коррекции оси нижней конечности в ходе ОЭКС и продемонстрировать на клиническом примере варианты предотвращения и решения данной хирургической проблемы.

Материалы и методы. В клинику НМИЦ ТО им. Р.Р. Вредена поступила пациентка с жалобами на вальгусную деформацию на уровне коленного сустава, болезненность в области коленного сустава, невозможность ходьбы без опоры. Три года назад больной выполнено одномышцелковое эндопротезирование коленного сустава. На рентгенограммах обращали на себя внимание эконоmnые резекции бедренной и большеберцовой костей, рабочая поверхность модуля полиэтиленового вкладыша / большеберцового компонента эндопротеза находилась на 5 мм проксимальнее суставной поверхности латерального мыщелка большеберцовой кости.

Результаты и обсуждение. В ходе ревизионной артропластики ось конечности скорректирована на 6°. Через год после ревизионного вмешательства пациентка ходит без хромоты, результат проведенной операции оценен как отличный (45 баллов по шкале OKS). Авторами проанализированы возможные предпосылки для развития рассматриваемого осложнения и пути по его профилактике. Рассматриваются преимущественно ятрогенные причины, связанные непосредственно с хирургической техникой.

Заключение. Некорректное механическое выравнивание в ходе ОЭКС имеет гетерогенную природу и может быть обусловлено как недостаточным планированием операции, так и анатомическими особенностями пациента, а также техническими ошибками непосредственно в ходе вмешательства.

Ключевые слова: коленный сустав, одномышцелковое эндопротезирование, частичная артропластика, гиперкоррекция оси конечности, осложнения эндопротезирования

Для цитирования: Корнилов Н.Н., Чугаев Д.В., Иванов П.П., Магомедов М.Ш., Куляба Т.А., Филь А.С. Гиперкоррекция оси нижней конечности как исход одномышцелкового эндопротезирования коленного сустава. *Гений ортопедии*. 2025;31(4):510-519. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-510-519.

Clinical case

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-4-510-519>



Overcorrected lower limb axis as an outcome of unicompartmental knee arthroplasty

N.N. Kornilov, D.V. Chugaev, P.P. Ivanov, M.Sh. Magomedov✉, T.A. Kulyaba, A.S. Phil

Vreden National Medical Research Centre for Traumatology and Orthopedics, St. Petersburg, Russian Federation

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

Abstract

Introduction Unicompartmental knee arthroplasty (UKA) is an effective surgical procedure used in patients with gonarthrosis with a part of the knee being severely affected. Insufficient or excessive correction of the lower limb axis can cause a poor outcome of partial arthroplasty.

The **objective** was to evaluate ways that would help prevent insufficient or excessive correction of the lower limb axis with UKA and demonstrate techniques preventing and solving the surgical problem using a clinical example.

Material and methods A patient presented with valgus deformity at the knee level, knee pain and inability to walk without support was seen at the Vreden National Medical Research Centre for Traumatology and Orthopedics. The patient underwent UKA three years ago. The radiographs showed sparing resections of the femur and tibia, the working surface of the polyethylene liner/tibial implant component being 5 mm proximally to the articular surface of the lateral condyle of the tibia.

Results and discussion The limb axis was corrected by 6° during revision arthroplasty. The patient had no limping at one year and the result of the operation was rated as excellent measuring 45 OKS scores. The authors reviewed prerequisites of the complication in question and ways to prevent it. Iatrogenic causes primarily associated with surgical technique are reviewed.

Conclusion Inadequate mechanical alignment is characterized by a heterogeneous identity in UKA and can be caused by ineffective preoperative planning and specific anatomy of the patient, intraoperative technical failures.

Keywords: knee joint, unicompartmental knee arthroplasty, UKA, partial arthroplasty, overcorrected limb axis, complications of total joint replacement.

For citation: Kornilov NN, Chugaev DV, Ivanov PP, Magomedov MSh, Kulyaba TA, Phil AS. Overcorrected lower limb axis as an outcome of unicompartmental knee arthroplasty. *Genij Ortopedii*. 2025;31(4):510-519. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-510-519.

ВВЕДЕНИЕ

Как правило, научные работы, посвященные одномышечковому эндопротезированию коленного сустава (ОЭКС), начинаются с признания множества достоинств данной операции, таких как малоинвазивность, органосохраняющий подход, возможность быстрого восстановления и легкой реабилитации с получением эффекта «забытого коленного сустава» [1]. И это достаточно органично смотрится в тенденции к расширению показаний к данному типу хирургического вмешательства у больных гонартрозом и общему увеличению количества частичных артропластик в структуре мирового эндопротезирования [2].

Современные показания к одномышечковому эндопротезированию, сформулированные J. Goodfellow [3] и далее подтвержденные работами других авторов, включают простые клинико-рентгенологические критерии отбора пациентов, которые одинаковы для любой модели имплантата.

Однако текущий тренд к персонифицированному подходу при артропластике коленного сустава заставляет хирурга задумываться об учёте большего количества переменных, в частности, оси конечности пациента, геометрии костей, формирующих коленный сустав, степени и характере износа суставных поверхностей мыщелков, эластичности мягкотканых стабилизаторов, степени повреждения мениска и величине его экструзии, наличии, величине и локализации остеофитов [4]. Различия в этих характеристиках могут оказывать влияние на успех или неудачу ОЭКС.

Одним из важнейших факторов, влияющих на долгосрочные исходы ОЭКС, является послеоперационная ось конечности. Так, перегрузка латерального отдела сустава после частичной медиальной артропластики с гиперкоррекцией оси приводит к стойкому болевому синдрому, ассоциированному со связочным дисбалансом и иными механическими факторами. Это служит причиной быстрого износа хряща в латеральном отделе сустава и прогрессирования гонартроза, что ведёт к необходимости ревэндопротезирования [5, 6]. Множество исследований наглядно показало, что оптимальный результат хирургического лечения достигается только тогда, когда при ОЭКС ось конечности при медиальном гонартрозе восстанавливается до преартрозного состояния, что нередко выражается в сохранении остаточной варусной деформации [7, 8]. В противоположность этому, недостаточная коррекция деформации является общепризнанным фактором риска неудовлетворительного исхода в среднесрочной перспективе как околосуставных остеотомий, так и тотального эндопротезирования у больных медиальным гонартрозом. Для частичной артропластики ситуация — противоположна: чем в большей степени ось конечности корректируется до «средних по популяции» значений, тем быстрее прогрессирует артроз в контралатеральном отделе сустава [9, 10]. По сути, коррекция деформации при частичной артропластике должна быть суммой замещения остатков хрящевого покрова пораженной субхондральной кости, удаленного мениска и краевых остеофитов, минимально необходимой для позиционирования компонентов эндопротеза. Превышение этого лимита, равно как релиз интактных мягкотканых стабилизаторов, неизбежно ведет к гиперкоррекции оси конечности после ОЭКС. Анализ причин подобных ошибок посвящено данное исследование.

Цель работы — оценить возможные пути профилактики недостаточной или избыточной коррекции оси нижней конечности в ходе ОЭКС и продемонстрировать на клиническом примере варианты предотвращения и решения данной хирургической проблемы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пациентка Г. 52 лет поступила в клинику НМИЦ ТО им. Р.Р. Вредена с жалобами на вальгусную деформацию правой нижней конечности, болезненность в области коленного сустава, усиливающуюся при движениях, невозможность ходьбы без дополнительной опоры. Из анамнеза известно, что в течение предыдущих трех лет пациентку беспокоил умеренный болевой синдром в правом коленном суставе, возникавший при интенсивной физической нагрузке и ходьбе. Комплексное консервативное лечение, проводимое амбулаторно, не дало значимого стойкого эффекта. В одном из региональных специализированных медицинских учреждений после обследования было установлено наличие правостороннего медиального гонартроза и большой выполнен одномышечковое эндопротезирование медиального отдела правого коленного сустава эндопротезом с фиксированным полиэтиленовым вкладышем. После операции пациентка отметила появление выраженной боли в прооперированном коленном суставе с изменением ее характеристик по сравнению с предоперационным состоянием, видимое глазом изменение оси конечности, значительные затруднения при ходьбе, сгибании коленного сустава. Вначале данные жалобы трактовались как нормальное течение раннего послеоперационного периода, и пациентка проходила комплексное реабилитационное лечение.

В течение всего послеоперационного периода интенсивность вышеуказанных симптомов не уменьшалась, качество жизни оставалось неудовлетворительным, ходьба была возможна лишь с дополнительной опорой, в связи с чем возникла необходимость в проведении ревизионного хирургического вмешательства.

При поступлении в стационар пациентка могла передвигаться только с дополнительной опорой на костыли и значительной шадящей правосторонней хромотой. Вальгусная деформация правой нижней конечности на уровне коленного сустава составляла 8° . Обращала на себя внимание ригидность деформации с невозможностью коррекции оси конечности до нейтральной при выполнении теста приведения голени при лёгком сгибании коленного сустава для расслабления задней капсулы. Отмечалась разлитая болезненность в области правого коленного сустава с преимущественной локализацией в латеральном отделе и разгибательная контрактура: амплитуда движений $0^\circ/0^\circ/85^\circ$. Оценка функции по модифицированной шкале функции Oxford Knee Score (OKS) составила 11 баллов, что свидетельствует о выраженном нарушении функции.

Рентгенологически: имплантирован одномыщелковый эндопротез, замещающий медиальный отдел правого коленного сустава (рис. 1). На выполненных рентгенограммах обращают на себя внимание эконозные резекции бедренной и большеберцовой костей, а на панорамных снимках (телерентгенография) — вальгусная деформация оси конечности 8° ($MAD = 29$ мм), наклон большеберцового компонента кзади в пределах референтных значений (рис. 2). Отмечается, что рабочая поверхность модуля полиэтиленового вкладыша / большеберцового компонента эндопротеза находится на 5 мм проксимальнее суставной поверхности латерального мыщелка большеберцовой кости. Рентгенологические признаки нестабильности компонентов эндопротеза или износа вкладыша отсутствовали.

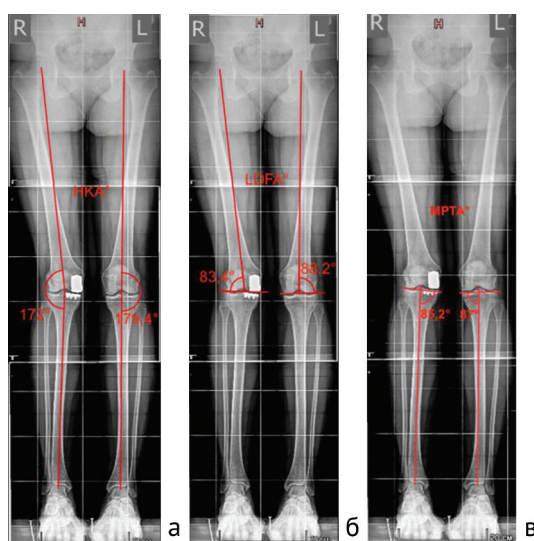


Рис. 1. Показатели референтных углов и линий на телерентгенограммах после ОМЭП: а — вальгусная деформация правой нижней конечности; б, в — снижение показателя угла LDFA и MPTA за счет неправильного позиционирования компонентов во фронтальной плоскости

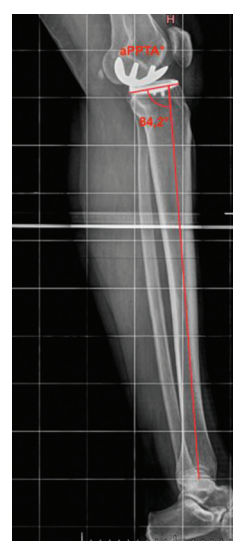


Рис. 2. Показатель угла наклона суставной поверхности большеберцового компонента в сагиттальной плоскости после ОМЭП

После клинико-рентгенологической оценки состояния пациентки установлено, что болевой синдром обусловлен гиперкоррекцией оси конечности в ходе предшествовавшего ОМЭП, «перетянутостью» медиальных связочных структур и гиперпрессией латерального отдела коленного сустава, а также несбалансированностью разгибательного и сгибательного промежутков, приводящих к ограничению амплитуды движений в правом коленном суставе. Ревизионное эндопротезирование правого коленного сустава осуществлено с использованием стандартной первичной инструментальной системы (рис. 3).

В ходе ревизионной артропластики ось конечности скорректирована на 6° . Наклон большеберцового компонента кзади в пределах референтных значений (рис. 4). Опилы костей выполнены в дно дефектов, сформировавшихся после удаления компонентов одномыщелкового эндопротеза, что позволило использовать стандартный первичный эндопротез коленного сустава с сохранением задней крестообразной связки с полностью полиэтиленовым (all poly) большеберцовым компонентом, толщиной 1 мм, цементной фиксации.

В ходе операции достигнута полная амплитуда пассивных движений в правом коленном суставе. Течение послеоперационного периода было неосложненным, послеоперационная рана зажила первичным натяжением.

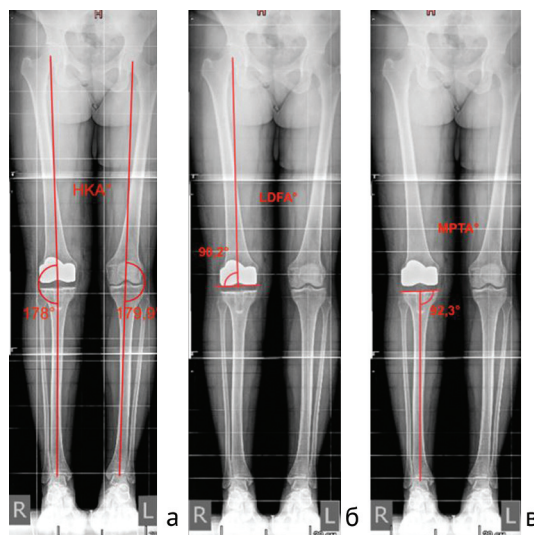


Рис. 3. Показатели референтных углов и линий после тотального эндопротезирования: а — коррекция оси на 6°; б, в — восстановление референтных значений углов LDFA и MPTA



Рис. 4. Показатель угла наклона суставной поверхности большеберцового компонента после тотальной артропластики

После прохождения стандартного реабилитационного лечения в амбулаторных условиях через 4 нед. после операции пациентка обрела способность к самостоятельному передвижению без дополнительной опоры, восстановила амплитуду движений в коленном суставе до острого угла сгибания (амплитуда движений: 0°/0°/110°). В настоящее время, через год после проведения ревизионного вмешательства, ходит без хромоты, оценивая результат проведенной операции как отличный (45 баллов по модифицированной шкале OKS).

ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности маркетинга имплантов усложняют задачу ортопедического хирурга, начинающего внедрять парциальную артропластику в своей практике. Имплантаты с подвижным вкладышем различных производителей практически не отличаются, используя концепцию Oxford, в то время как эндопротезы с фиксированным вкладышем весьма гетерогенны по дизайну. Разработанный в 1982 г. одномыщелковый эндопротез Oxford на настоящий момент является одним из наиболее часто используемых в мире имплантов такого типа [11, 12, 13]. Оригинальная и, что важно, повторяемая технология, множество научных исследований о различных аспектах использования данного имплантата [14, 15, 16], значительное количество обучающих технических видео на профессиональных видео-ресурсах, а также возможности обучения на теоретических курсах, биоманекенах и в операционной дают достаточное понимание хирургу о том, как правильно имплантировать данный тип искусственного сустава. В противоположность этому, эндопротезы с фиксированной платформой не являются одной унифицированной моделью, отличающейся лишь названием. В практике это очень гетерогенная группа имплантов, значительно отличающихся по хирургической технике, а зачастую и по философии имплантации, трибологии и биомеханике. Это обстоятельство создает пространство для наличия большого количества хирургических нюансов, пренебрежение которыми делает оперативное вмешательство крайне трудоемким, с малой степенью повторяемости [17]. При кажущейся простоте кривая обучения использования хирургом даже самых современных инструментальных систем частичной артропластики с фиксированным вкладышем может достигать сотни вмешательств, в отличие от подвижного, где достаточно пары десятков [18].

Очевиден и такой фактор, как следование индивидуальным хирургическим традициям, сформированным в ходе профессионального обучения и повседневной практики как рутинная хирургическая техника, в частности, протяженность доступа, травматичность манипуляций с мягкими тканями, особенно, теми из них, что влияют на баланс коленного сустава, например, глубокой порцией большеберцовой коллатеральной связки, прикрепление которой к плато желательно сохранять во время ОЭКС, а также полноценность удаления всех остеофитов с мыщелков бедренной и большеберцовой костей.

Если хирург использует в своей повседневной хирургической практике преимущественно тотальное эндопротезирование, то гиперрелиз медиальных стабилизаторов, популяризированный в руководствах по эндопротезированию прошлого века, порою усугубляемый чрезмерным удалением вместе с остеофитами и интактной костью, автоматически приведет к клинически значимому увеличению

сгибательного и/или разгибательного промежутков. В результате данных манипуляций для создания оптимального натяжения капсульно-связочного аппарата во время ОЭКС хирург будет вынужден использовать полиэтиленовый вкладыш избыточной толщины по сравнению с выполненными резекциями, что и послужит механическим субстратом для гиперкоррекции механической оси конечности [19]. Учитывая это, диссекция мягких тканей при ОЭКС не должна доходить до середины мышелка большеберцовой кости на уровне её резекции.

Важно помнить, что идеальный кандидат для одномышелкового эндопротезирования медиального отдела коленного сустава — это пациент с морфологической стадией гонартроза, при которой сформировался износ сочленяющихся поверхностей типа «кость на кости» и варусной деформацией конечности до 15° [20, 21, 22]. Но в то же время, как быть со значительной группой пациентов, имеющих терминальное дегенеративно-дистрофическое поражение медиального отдела коленного сустава, но при этом, за счет специфической геометрии диафизов и/или метафизов бедренной и/или большеберцовой костей сохраняющих нейтральную ось конечности? Ответ кажется очевидным: принципиально важным для нас является наличие ситуации «кость на кости» того отдела бедренно-большеберцового сочленения, который мы планируем заместить. Но именно данная группа пациентов подвергается риску гиперкоррекции оси конечности [23]. Это обусловлено тем, что медиальный проксимальный большеберцовый угол, равный 90° или более, требует асимметричной резекции большеберцового плато, что может быть осуществлено интраоперационно с недостаточной степенью точности. Кроме того, глубокий хрящевой дефект нагружаемой части медиального мышелка бедренной кости в сочетании с экструзией мениска приведут к трансляции механической оси конечности в вальгусную позицию за счет избыточной мобильности медиального отдела сустава, попытки создать оптимальное натяжение мягких тканей интраоперационно и конституциональной вальгусной деформации конечности и станут непреодолимым препятствием для успешной частичной артропластики. Пути борьбы с данным обстоятельством пока не представляются достаточно очевидными: выполнять ли опил большеберцового плато с учетом так называемого «угла Картье» [24], то есть в положении 3° варуса относительно механической оси большеберцовой кости, осуществлять одномышелковое эндопротезирование у данной группы пациентов только с использованием роботических систем или компьютерной навигации [25, 26] либо отдать предпочтение тотальному эндопротезированию? Все варианты представляются в значительной степени дискуссионными. В данном клиническом сценарии опил плато большеберцовой кости в положении 3° варуса еще более усугубит ситуацию, поскольку поверхность между бедренным компонентом и вкладышем эндопротеза с фиксированным вкладышем является плоской. Такой опил приведет к тому, что бедренный компонент начнет «скатываться» по неровному плато в медиальном направлении, что влечет за собой возрастание «перетянутости» медиального отдела.

Более того, существует достаточно большое количество современных исследований, изучающих результаты роботизированной хирургии либо эндопротезирования с использованием современных навигационных систем, но даже эти факторы позволяют иметь погрешности позиционирования компонентов эндопротеза в 10–11 % случаев [27]. А если говорить об использовании стандартных инструментальных систем, то данное отклонение от планируемой идеальной позиции будет еще более выраженным.

Говоря о результатах после одномышелкового эндопротезирования, нельзя недооценивать фактор хирурга [28]. T. Hamilton et al. [29] провели мета-анализ, посвященный результатам одномышелкового эндопротезирования в зависимости от опыта хирурга. По их данным, наилучшие результаты и снижение частоты ревизий наблюдаются у хирургов, выполняющих более 24 ОЭКС в год. Для достижения оптимальных результатов более 20 % операций хирурга по эндопротезированию коленного сустава должно приходиться на ОЭКС.

Первоначально, при выполнении частичной артропластики ортопеды придерживались критериев S.C. Kozinn, R. Scott [18], согласно которым идеальными кандидатами для одномышелкового эндопротезирования считались пациенты с массой тела менее 82 кг. Это казалось очевидным, поскольку у пациентов с ожирением технически сложнее разместить экстрamedулярный направитель и резекционные блоки из-за технических ограничений, связанных с определением костных ориентиров. Большая нагрузка в зоне интерфейса кость-имплантат у больных с ожирением также рассматривалась как одна из причин возможного снижения выживаемости имплантов. Затем, со временем, концепция изменилась, появилось большое количество исследований, в которых оспаривалось мнение о том, что ожирение следует рассматривать как противопоказание [30, 31, 32]. Так, в работах, посвященных выявлению предикторов риска гиперкоррекции механической оси конечности при одномышелковом эндопротезировании, имеются указания на отсутствие негативного влияния высокого ИМТ на данный параметр [17, 33].

Одним из важных инструментов прогнозирования точности позиционирования компонентов при одномышелковом эндопротезировании и коррекции оси конечности во фронтальной плоскости является такой параметр как НКА (hip-knee ankle angle) [34, 35, 36, 37]. Хотя дискуссия по уровню целевого значения угла НКА после операции частичного эндопротезирования продолжается, все большее число

исследований рекомендуют небольшую гипокоррекцию механической оси. Так, пациенты, у которых перед операцией была варусная деформация и остаточная сохраняется в пределах 3° после ОЭКС, демонстрируют наилучшие функциональные результаты [38, 39, 40, 41]. N. Nakano et al. [42] описали новый метод морфологической оценки: аНКА (arithmetic hip-knee-ankle angle). Для измерения аНКА используется следующая формула: $180^\circ - \text{LDFA}^\circ$ (lateral distal femoral angle) + MPTA° (medial proximal tibial angle). Результаты авторов показывают, что аНКА более точно коррелирует с послеоперационным углом LDFA° . Для достижения целевых значений опилов выполняли с использованием портативной навигационной системы на основе акселерометра. Y. Kokubu et al. [43] провели ретроспективное исследование, по результатам которого они сообщили об улучшении функциональных результатов в раннем послеоперационном периоде у пациентов с изменением послеоперационного угла аНКА в пределах $\pm 3^\circ$.

H. Shih et al. [44] и S. Asada et al. [34] предлагают оценивать точность позиционирования бедренного и большеберцового компонентов при одномышечковом эндопротезировании путем оценки следующих углов: FCCA (femoral coronal component angle) и TCCA (tibial coronal component angle). FCCA — это угол между осью, проведенной посередине бедренного компонента, и механической осью бедренной кости. TCCA — угол между линией, параллельной большеберцовому компоненту, и линией, перпендикулярной механической оси большеберцовой кости. Y. Khaw et al. [45] в исследовании, посвященном анализу выживаемости имплантатов в зависимости от точности позиционирования бедренного и большеберцового компонентов, пришли к выводу, что у пациентов с FCCA от 0° до 2° и TCCA от 2° до 4° наблюдались наилучшие функциональные результаты через 10 лет. Обнаружено, что пациенты, входившие в группу с оптимальными показателями (FCCA от 0° до 2° и TCCA от 2° до 4°), имели значительное преимущество в 15-летней выживаемости имплантов. Значимым ограничением этих исследований является отсутствие оценки точности позиционирования компонентов в сагиттальной плоскости.

Немаловажным фактором, сигнализирующим хирургу интраоперационно о степени послеоперационной коррекции механической оси конечности, является толщина устанавливаемого вкладыша и глубина резекции медиального отдела большеберцовой кости при ОЭКС. Y. Kuroda et al. [46] выявлена корреляция между величиной изменения угла НКА до и после операции, толщиной вкладыша и глубиной резекции медиального отдела большеберцовой кости. Выбор размера вкладыша основан на оценке хирургом «натяжения» медиальной коллатеральной связки во время операции. Однако эта оценка может быть субъективной. Хирург может выбрать более толстый вкладыш, чтобы избежать кажущейся интраоперационно нестабильности, например, у пациентов с гиперэластичностью мягкотканых стабилизаторов, что приводит к гиперкоррекции механической оси конечности и вальгусной деформации после операции [47].

В контексте обсуждения причин вальгусной гиперкоррекции оси конечности после ОЭКС, у пациентов с предоперационной варусной деформацией нельзя также не упомянуть о таком важном факторе, как экструзия медиального мениска. Резекция выдавленного мениска приводит к потере «натяжения» медиальной коллатеральной связки, что влечет за собой увеличение мобильности медиального отдела коленного сустава, для устранения которой хирург вынужден установить более толстый вкладыш, об эффекте увеличения толщины которого говорилось выше. K. Ishibashi et al. [48] провели ретроспективное исследование, в котором оценивали влияние экструзии медиального мениска на магнитнорезонансных томограммах перед операцией на механическую ось конечности после ОЭКС. Измерение степени экструзии производили в соответствии с методом, описанным C.R. Costa et al. [49], с использованием системы PACS. По результатам исследования выявлена прямая корреляция между изменением угла НКА после операции и степенью экструзии мениска до операции. Среднее расстояние экструзии мениска составило (8 ± 2) мм. C. Liu et al. [47] сообщают о получении аналогичных результатов.

Кроме того, геометрия переднего отдела большеберцовой кости может влиять на ошибки при определении глубины резекции во время одномышечкового эндопротезирования. Форма плато большеберцовой кости достаточно сложна и асимметрична. Так, по данным J. Hashemi et al. [50], существует большая вариабельность у пациентов с гонартрозом с точки зрения глубины вогнутости медиального плато и наклона большеберцовой кости во фронтальной и сагиттальной плоскостях. По их данным, наклон большеберцовой кости в медиальную сторону во фронтальной плоскости варьирует от -1° до $+6^\circ$, а глубина вогнутости медиального отдела может варьировать от 1,2 до 5,2 мм. При определении уровня резекции одной из частых ошибок является осуществление опилов выше дна дефекта плато большеберцовой кости. Это может привести к неправильной ориентации большеберцового компонента и к изменению упоминавшегося уже угла TCCA за пределами нормальных значений.

В последнее время появляется всё больше публикаций, посвященных этапному одномышечковому эндопротезированию смежного отдела коленного сустава, вместо конверсии в ТЭКС. S. Fuchs et al. [51, 52] значимыми преимуществами бикомпартментального эндопротезирования (БКЭ) перед тотальным считают сохранение проприоцепции сустава, сопоставимое со здоровыми людьми того же возраста,

которое достигается благодаря сохранению крестообразных связок. Вопрос лучшей кинематики после БКЭ в сравнении с ТЭКС остается спорным. Одни авторы поддерживают эту гипотезу [53], в то время как другие считают, что нет существенных различий в кинематике между пациентами, перенесшими БКЭ и ТЭКС, в отличие от ОЭКС [54]. Н. Pandit et al. [55], анализируя результаты лечения 27 коленных суставов, продемонстрировали значительное улучшение функциональных результатов и отсутствие ревизий после поэтапного БКЭ. В описываемом клиническом наблюдении переход на артропластику смежного отдела был неприменим, поскольку наличие контрактуры более 10° и деформации во фронтальной плоскости более 5° является противопоказанием для поэтапного БКЭ [56, 57].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Некорректное механическое выравнивание в ходе одномышечкового эндопротезирования коленного сустава может быть обусловлено недостатками планирования, индивидуальными особенностями эластичности мягко-тканых стабилизаторов, а также техническими ошибками непосредственно в ходе хирургического вмешательства.

Для профилактики данного осложнения необходимы адекватная селекция пациентов, тщательное предоперационное планирование, основанное на изучении рентгенограмм, в том числе панорамных (телерентгенография), морфологического типа деформации конечности, магниторезонансная томография сустава, учитывающая характер износа кости, сохранность и позиция мениска в зоне контакта бедренной и большеберцовой костей и параметры краевых остеофитов, гипермобильность пораженного отдела коленного сустава, а также прецизионность хирургической техники.

Конфликт интересов. Не заявлен.

Источник финансирования. Не заявлен.

Этические нормы. Исследование проведено в соответствии с этическими стандартами Хельсинской декларации Всемирной медицинской ассоциации.

Информированное согласие. Пациентка дала информированное согласие на публикацию результатов исследования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Lim JW, Cousins GR, Clift BA, et al. Oxford unicompartmental knee arthroplasty versus age and gender matched total knee arthroplasty - functional outcome and survivorship analysis. *J Arthroplasty*. 2014;29(9):1779-1783. doi: 10.1016/j.arth.2014.03.043.
2. SAR. Annual report 2022. The Swedish Arthroplasty Register. Swedish Arthroplasty Register; 2022. Available at: https://registercentrum.blob.core.windows.net/sar/r/SAR-Annual-Report-2022_EN-HkgQE89Nus.pdf. Accessed Oct 17, 2024.
3. Goodfellow JW, Tibrewal SB, Sherman KP, O'Connor JJ. Unicompartmental Oxford Meniscal knee arthroplasty. *J Arthroplasty*. 1987;2(1):1-9. doi: 10.1016/s0883-5403(87)80025-6.
4. Liu C, Ge J, Jiang Y, et al. Preoperative valgus-corrected hip-knee-ankle angle and medial meniscal extrusion are useful for evaluating postoperative alignment in mobile-bearing UKA. *Heliyon*. 2023;9(11):e22234. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e22234.
5. NJR. 13th Annual Report 2016. National Joint Registry for England, Wales, Northern Ireland and the Isle of Man. National Joint Registry; 2016. Available at: <https://reports.njrcentre.org.uk/Portals/0/PDFdownloads/NJR%2013th%20Annual%20Report%202016.pdf>. Accessed Oct 17, 2024.
6. Liddle AD, Pandit H, Judge A, Murray DW. Patient-reported outcomes after total and unicompartmental knee arthroplasty: a study of 14,076 matched patients from the National Joint Registry for England and Wales. *Bone Joint J*. 2015;97-B(6):793-801. doi: 10.1302/0301-620X.97B6.35155.
7. Plancher KD, Brite JE, Briggs KK, Petterson SC. Pre-Arthritic/Kinematic Alignment in Fixed-Bearing Medial Unicompartmental Knee Arthroplasty Results in Return to Activity at Mean 10-Year Follow-up. *J Bone Joint Surg Am*. 2022;104(12):1081-1089. doi: 10.2106/JBJS.21.00801.
8. Micicoi L, Machado A, Ernat J, et al. Restoration of preoperative tibial alignment improves functional results after medial unicompartmental knee arthroplasty. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2023;31(11):5171-5179. doi: 10.1007/s00167-023-07588-5.
9. Felson DT, Niu J, Gross KD, et al. Valgus malalignment is a risk factor for lateral knee osteoarthritis incidence and progression: findings from the Multicenter Osteoarthritis Study and the Osteoarthritis Initiative. *Arthritis Rheum*. 2013;65(2):355-362. doi: 10.1002/art.37726.
10. Kamenaga T, Hiranaka T, Hida Y, et al. Lateral osteoarthritis progression is associated with a postoperative residual tibiofemoral subluxation in Oxford UKA. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2022;30(9):3236-3243. doi: 10.1007/s00167-021-06729-y.
11. NJR. 19th Annual Report 2022. National Joint Registry; 2022. Available at: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK587525/pdf/Bookshelf_NBK587525.pdf. Accessed Oct 17, 2024.
12. AOANJRR. Hip, knee and shoulder arthroplasty: 2022 annual report. Australian Orthopaedic Association National Joint Replacement Registry; 2022. Available at: <https://aoanjrr.sahmri.com/annual-reports-2022>. Accessed Oct 17, 2024.
13. NAR. 2022 Annual Report. Norwegian Arthroplasty Register; 2022. Available at: https://helse-bergen.no/seksjon/Nasjonalt_kompetansetjeneste_leddproteser_hoftebrudd/Share%20point%20Documents/Rapport/Report%202022%20english.pdf. Accessed Oct 17, 2024.
14. Sun XW, Lu FF, Zou K, et al. Does new instrument for Oxford unicompartmental knee arthroplasty improve short-term clinical outcome and component alignment? A meta-analysis. *J Orthop Surg Res*. 2020;15(1):386. doi: 10.1186/s13018-020-01926-w.
15. Ma J, Yan Y, Wang W, et al. Lower early revision rates after uncemented Oxford Unicompartmental Knee Arthroplasty (UKA) than cemented Oxford UKA: A meta-analysis. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2021;107(3):102802. doi: 10.1016/j.otsr.2021.102802.
16. Zhang P, Bai J, Wang J, et al. How to perform better on Oxford UKA? A technical note from over 500 surgical experiences. *Orthop Surg*. 2023;15(9):2445-2453. doi: 10.1111/os.13811.
17. Ahn JH, Kang HW, Yang TY, Lee JY. Risk factors of post-operative malalignment in fixed-bearing medial unicompartmental knee arthroplasty. *Int Orthop*. 2016;40(7):1455-63. doi: 10.1007/s00264-015-3014-1.

18. Kozinn SC, Scott R. Unicompartmental knee arthroplasty. *J Bone Joint Surg Am.* 1989;71(1):145-150.
19. Kuroda Y, Takayama K, Ishida K, et al. Medial joint line elevation of the tibia measured during surgery has a significant correlation with the limb alignment changes following medial unicompartmental knee arthroplasty. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2018;26(11):3468-3473. doi: 10.1007/s00167-018-4935-1.
20. Корнилов Н.Н., Куляба Т.А., Федоров Р.Э. Современные представления об одномышечковом эндопротезировании в структуре хирургических методов лечения больных гонартрозом (обзор литературы). *Травматология и ортопедия России.* 2012;18(1):113-120. doi: 10.21823/2311-2905-2012-0-1-138-144.
21. Murray DW, Parkinson RW. Usage of unicompartmental knee arthroplasty. *Bone Joint J.* 2018;100-B(4):432-435. doi: 10.1302/0301-620X.100B4.BJJ-2017-0716.R1.
22. Marullo M, Tandogan RN, Kort N, et al. Trends in unicompartmental knee arthroplasty among 138 international experienced arthroplasty knee surgeons. *Heliyon.* 2024;10(2):e24307. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e24307.
23. Liu C, Chen H, Ge J, et al. Predicting valgus malalignment after mobile-bearing UKA using a new method: the arithmetic HKA of the arthritic knee. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2023;143(10):6381-6391. doi: 10.1007/s00402-023-04921-y.
24. Rivièrè C, Sivaloganathan S, Villet L, et al. Kinematic alignment of medial UKA is safe: a systematic review. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2022;30(3):1082-1094. doi: 10.1007/s00167-021-06462-6.
25. Ghazal AH, Fozo ZA, Matar SG, et al. Robotic versus conventional unicompartmental knee surgery: a comprehensive systematic review and meta-analysis. *Cureus.* 2023;15(10):e46681. doi: 10.7759/cureus.46681.
26. Xu K, Chen Q, Yan Q, et al. Comparison of computer-assisted navigated technology and conventional technology in unicompartmental knee arthroplasty: a meta-analysis. *J Orthop Surg Res.* 2022;17(1):123. doi: 10.1186/s13018-022-03013-8.
27. Park KK, Han CD, Yang IH, et al. Robot-assisted unicompartmental knee arthroplasty can reduce radiologic outliers compared to conventional techniques. *PLoS One.* 2019;14(12):e0225941. doi: 10.1371/journal.pone.0225941.
28. Филь А.С., Антипов А.П., Куляба Т.А., Корнилов Н.Н. Целесообразна ли частичная артропластика коленного сустава: мнения ортопедов крупного центра эндопротезирования. *Травматология и ортопедия России.* 2021;27(3):43-55. doi: 10.21823/2311-2905-2021-27-3-43-55.
29. Hamilton TW, Rizkalla JM, Kontochristos L, et al. The interaction of caseload and usage in determining outcomes of unicompartmental knee arthroplasty: a meta-analysis. *J Arthroplasty.* 2017;32(10):3228-3237.e2. doi: 10.1016/j.arth.2017.04.063.
30. Hamilton TW, Pandit HG, Jenkins C, et al. Evidence-based indications for mobile-bearing unicompartmental knee arthroplasty in a consecutive cohort of thousand knees. *J Arthroplasty.* 2017;32(6):1779-1785. doi: 10.1016/j.arth.2016.12.036.
31. Rodríguez-Merchán EC, Gómez-Cardero P. Unicompartmental knee arthroplasty: Current indications, technical issues and results. *EFORT Open Rev.* 2018;3(6):363-373. doi: 10.1302/2058-5241.3.170048.
32. Musbahi O, Hamilton TW, Crellin AJ, et al. The effect of obesity on revision rate in unicompartmental knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2021;29(10):3467-3477. doi: 10.1007/s00167-020-06297-7.
33. Zhang Q, Zhang Q, Guo W, et al. Risk factors of postoperative valgus malalignment in mobile-bearing medial unicompartmental knee arthroplasty. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2019;139(2):241-248. doi: 10.1007/s00402-018-3070-2.
34. Asada S, Inoue S, Tsukamoto I, et al. Obliquity of tibial component after unicompartmental knee arthroplasty. *Knee.* 2019;26(2):410-415. doi: 10.1016/j.knee.2018.12.013.
35. Mullaji AB, Shetty GM, Kanna R. Postoperative limb alignment and its determinants after minimally invasive Oxford medial unicompartmental knee arthroplasty. *J Arthroplasty.* 2011;26(6):919-925. doi: 10.1016/j.arth.2011.03.008.
36. Kim SJ, Bae JH, Lim HC. Factors affecting the postoperative limb alignment and clinical outcome after Oxford unicompartmental knee arthroplasty. *J Arthroplasty.* 2012;27(6):1210-1215. doi: 10.1016/j.arth.2011.12.011.
37. Tashiro Y, Matsuda S, Okazaki K, et al. The coronal alignment after medial unicompartmental knee arthroplasty can be predicted: usefulness of full-length valgus stress radiography for evaluating correctability. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2014;22(12):3142-3149. doi: 10.1007/s00167-014-3248-2.
38. Hopgood P, Martin CP, Rae PJ. The effect of tibial implant size on post-operative alignment following medial unicompartmental knee replacement. *Knee.* 2004;11(5):385-388. doi: 10.1016/j.knee.2003.12.008.9.
39. Wen PF, Guo WS, Gao FQ, et al. Effects of lower limb alignment and tibial component inclination on the biomechanics of lateral compartment in unicompartmental knee arthroplasty. *Chin Med J (Engl).* 2017;130(21):2563-2568. doi: 10.4103/0366-6999.217076.
40. Zuiderbaan HA, van der List JP, Chawla H, et al. Predictors of subjective outcome after medial unicompartmental knee arthroplasty. *J Arthroplasty.* 2016;31(7):1453-1458. doi: 10.1016/j.arth.2015.12.038.
41. Vasso M, Del Regno C, D'Amelio A, et al. Minor varus alignment provides better results than neutral alignment in medial UKA. *Knee.* 2015;22(2):117-121. doi: 10.1016/j.knee.2014.12.004.
42. Nakano N, Tsubosaka M, Kamenaga T, et al. Predicting postoperative coronal alignment after fixed-bearing unicompartmental knee arthroplasty using a new morphological assessment method: the arithmetic hip-knee-ankle angle. *Int Orthop.* 2024;48(4):889-897. doi: 10.1007/s00264-023-06072-6.
43. Kokubu Y, Kawahara S, Hamai S, et al. Small change in the arithmetic hip-knee-ankle angle during unicompartmental knee arthroplasty improves early postoperative functional outcomes. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2024;144(5):2297-2304. doi: 10.1007/s00402-024-05309-2.
44. Shih HT, Chen KH, Lee CH, et al. Factors predicting lower limb alignment after Oxford medial unicompartmental knee arthroplasty. *Sci Rep.* 2024;14(1):5597. doi: 10.1038/s41598-024-56285-x.
45. Khaw YZ, Liow MHL, Lee M, et al. The effect of tibial and femoral component coronal alignment on clinical outcomes and survivorship in unicompartmental knee arthroplasty. *Bone Joint J.* 2021;103-B(2):338-346. doi: 10.1302/0301-620X.103B2.BJJ-2020-0959.R1.
46. Kuroda Y, Takayama K, Ishida K, et al. Medial joint line elevation of the tibia measured during surgery has a significant correlation with the limb alignment changes following medial unicompartmental knee arthroplasty. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2018;26(11):3468-3473. doi: 10.1007/s00167-018-4935-1.
47. Liu C, Ge J, Jiang Y, et al. Preoperative valgus-corrected hip-knee-ankle angle and medial meniscal extrusion are useful for evaluating postoperative alignment in mobile-bearing UKA. *Heliyon.* 2023;9(11):e22234. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e22234.
48. Ishibashi K, Sasaki E, Otsuka H, et al. Valgus correctability and meniscal extrusion were associated with alignment after unicompartmental knee arthroplasty. *Clin Orthop Relat Res.* 2020;478(7):1636-1644. doi: 10.1097/CORR.0000000000001260.
49. Costa CR, Morrison WB, Carrino JA. Medial meniscus extrusion on knee MRI: is extent associated with severity of degeneration or type of tear? *AJR Am J Roentgenol.* 2004;183(1):17-23. doi: 10.2214/ajr.183.1.1830017.
50. Hashemi J, Chandrashekar N, Gill B, et al. The geometry of the tibial plateau and its influence on the biomechanics of the tibiofemoral joint. *J Bone Joint Surg Am.* 2008;90(12):2724-2734. doi: 10.2106/JBJS.G.01358.
51. Fuchs S, Tibesku CO, Genkinger M, et al. Proprioception with bicondylar sledge prostheses retaining cruciate ligaments. *Clin Orthop Relat Res.* 2003;406:148-154. doi: 10.1097/01.blo.0000038053.29678.a5.
52. Fuchs S, Tibesku CO, Genkinger M, et al. Clinical and functional comparison of bicondylar sledge prostheses retaining all ligaments and constrained total knee replacement. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2004;19(3):263-269. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2003.11.004.
53. Zhang Q, Zhang Q, Guo W, et al. The learning curve for minimally invasive Oxford phase 3 unicompartmental knee arthroplasty: cumulative summation test for learning curve (LC-CUSUM). *J Orthop Surg Res.* 2014;9:81. doi: 10.1186/s13018-014-0081-8.

54. Banks SA, Fregly BJ, Boniforti F, et al. Comparing in vivo kinematics of unicondylar and bi-unicondylar knee replacements. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2005;13(7):551-556. doi: 10.1007/s00167-004-0565-x.
55. Pandit H, Mancuso F, Jenkins C, et al. Lateral unicompartmental knee replacement for the treatment of arthritis progression after medial unicompartmental replacement. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2017;25(3):669-674. doi: 10.1007/s00167-016-4075-4.
56. Wada K, Price A, Gromov K, et al. Clinical outcome of bi-unicompartmental knee arthroplasty for both medial and lateral femorotibial arthritis: a systematic review-is there proof of concept? *Arch Orthop Trauma Surg.* 2020;140(10):1503-1513. doi: 10.1007/s00402-020-03492-6.
57. Parratte S, Pauly V, Aubaniac JM, Argenson JN. Survival of bicompartamental knee arthroplasty at 5 to 23 years. *Clin Orthop Relat Res.* 2010;468(1):64-72. doi: 10.1007/s11999-009-1018-0.

Статья поступила 27.09.2024; одобрена после рецензирования 14.10.2024; принята к публикации 05.06.2025.

The article was submitted 27.09.2024; approved after reviewing 14.10.2024; accepted for publication 05.06.2025.

Информация об авторах:

Николай Николаевич Корнилов — доктор медицинских наук, профессор, врач — травматолог-ортопед, drkornilov@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6398-2377>;

Дмитрий Валерьевич Чугаев — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, dr.chugaev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5127-5088>;

Павел Петрович Иванов — врач — травматолог-ортопед, ppivanov@rniito.ru;

Магомед Шамилович Магомедов — клинический ординатор, dr.magomedovmsh@gmail.com;

Тарас Андреевич Куляба — доктор медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, taraskuliaba@mail.ru;

Алексей Сергеевич Филь — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, asfil@rniito.ru.

Information about the authors:

Nikolay N. Kornilov — Doctor of Medical Sciences, Professor, orthopaedic surgeon, drkornilov@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6398-2377>;

Dmitriy V. Chugaev — Candidate of Medical Sciences, orthopaedic surgeon, dr.chugaev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5127-5088>;

Pavel P. Ivanov — orthopaedic surgeon, ppivanov@rniito.ru;

Magomed Sh. Magomedov — clinical resident, dr.magomedovmsh@gmail.com;

Taras A. Kulyaba — Doctor of Medical Sciences, orthopaedic surgeon, taraskuliaba@mail.ru;

Alexey S. Phil — Candidate of Medical Sciences, orthopaedic surgeon, asfil@rniito.ru.

Вклад авторов:

Корнилов Н.Н. — концепция и дизайн представления клинического случая, ответственность за целостность всех частей статьи, внесение корректив в первоначальный вариант.

Чугаев Д.В. — формулировка целей и задач исследования, разработка и проектирование методологии, внесение корректив в первоначальный вариант, подготовка работы к публикации.

Иванов П.П. — предоперационное планирование и хирургическое лечение пациента.

Магомедов М.Ш. — обзор литературы, подготовка работы к публикации.

Куляба Т.А. — редактирование статьи.

Филь А.С. — редактирование статьи.

Обзорная статья

УДК 616.71-001.515-089.843-77:546.82:621.793:615.281:616-089.168(048.8)

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-4-520-536>



Эффективность использования антибактериальных покрытий титановых имплантатов при лечении огнестрельных переломов

Д.В. Давыдов^{1,2}, Л.К. Брижань¹, А.А. Керимов¹, И.В. Хоминец^{1✉}, К.К. Бекшоков²,
А.А. Грицюк^{1,3}, Е.А. Кукушко¹, В.Д. Беседин¹

¹ Главный военный клинический госпиталь имени Н.Н. Бурденко, Москва, Россия

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

³ Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова, Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Игорь Владимирович Хоминец, khominets24_91@mail.ru

Аннотация

Введение. Высокий риск инфекционных осложнений при огнестрельных ранениях остается актуальной проблемой военной медицины. Анализ структуры санитарных потерь показывает, что ранения конечностей составляют от 55 % до 81,4 %, при этом около 35 % из них сопровождаются переломами костей. Выполнение операций по окончательной стабилизации данных переломов в условиях первичной микробной контаминации ассоциируется с высоким риском развития инфекционных осложнений. Однако использование антибактериальных покрытий на внутренних имплантатах значительно снижает риски развития таких осложнений.

Цель работы — на основании анализа российских и зарубежных литературных источников определить эффективность использования антибактериальных покрытий титановых имплантатов при огнестрельных переломах.

Материалы и методы. Поиск научных публикации осуществляли в поисковых системах eLibrary, PubMed и Connected Papers по ключевым словам: antibacterial coatings, gunshot fractures, implant-associated infection, internal osteosynthesis, infectious complications, антибактериальное покрытие, огнестрельные переломы, инфекционные осложнения, периимплантная инфекция. Источники отобраны исходя из гипотезы о возможности применения антибактериальных покрытий в клинической практике. Глубина поиска — с 2009 по 2025 гг.

Результаты и обсуждение. Существующие системы доставки антибактериальных препаратов в зону проведения оперативного вмешательства демонстрируют высокую клиническую эффективность в профилактике периимплантной инфекции. На сегодняшний день наиболее изученными агентами для создания покрытий являются ионы металлов, полимеры, а также композиты, содержащие в своем составе антибактериальные/антисептические препараты. При этом наиболее эффективными являются многофункциональные и интеллектуальные покрытия, оказывающие комбинированное воздействие на микробные биопленки благодаря выраженным антиадгезивным и биоцидным свойствам. Отмечен дефицит исследований по применению многофункциональных покрытий в травматологии и ортопедии. В настоящее время отсутствуют публикации, посвященные использованию антибактериальных покрытий при лечении огнестрельных переломов и их последствий.

Заключение. Применение полимерных и многофункциональных антибактериальных покрытий, гидрогелей, оксидов серебра, йода и цинка демонстрируют высокую эффективность в профилактике инфекционных осложнений после проведения внутреннего остеосинтеза, и могут быть использованы в клинической практике при лечении пострадавших с огнестрельными переломами костей конечностей.

Ключевые слова: антибактериальное покрытие, внутренний остеосинтез, огнестрельные переломы, инфекционные осложнения, периимплантная инфекция

Для цитирования: Давыдов Д.В., Брижань Л.К., Керимов А.А., Хоминец И.В., Бекшоков К.К., Грицюк А.А., Кукушко Е.А., Беседин В.Д. Эффективность использования антибактериальных покрытий титановых имплантатов при лечении огнестрельных переломов. *Гений ортопедии*. 2025;31(4):520-536. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-520-536.

Review

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-4-520-536>



Efficiency of using antibacterial coatings on titanium implants in the treatment of gunshot fractures

D.V. Davydov^{1,2}, L.K. Brizhan¹, A.A. Kerimov¹, I.V. Khominets^{1✉}, K.K. Bekshokov², A.A. Gritsyuk^{1,3}, E.A. Kukushko¹, V.D. Besedin¹

¹ Burdenko Main Military Clinical Hospital, Moscow, Russian Federation

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

³ Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russian Federation

Corresponding author: Igor V. Khominets, khominets24_91@mail.ru

Abstract

Introduction High risk of infectious complications in gunshot wounds remains a pressing issue in military medicine. Analysis of the structure of sanitary losses shows that limb injuries account for 55 % to 81.4 %, with about 35 % of them accompanied by bone fractures. Performing operations for the final stabilization of these fractures under the conditions of primary microbial contamination is associated with a high risk of infectious complications. However, the use of antibacterial coatings on internal implants significantly reduces the risk of such complications.

The **purpose** of the work, based on the analysis of Russian and foreign literary sources, is to determine the effectiveness of using antibacterial coatings on titanium implants for gunshot fractures.

Materials and methods The search for scientific publications was carried out in the search engines eLibrary, PubMed and Connected Papers using the keywords: antibacterial coatings, gunshot fractures, implant-associated infection, internal osteosynthesis, infectious complications, antibacterial coating, gunshot fractures, infectious complications, peri-implant infection. The sources were selected based on the hypothesis of the possibility of using antibacterial coatings in clinical practice. The search depth was from 2009 to 2025.

Results and discussion The existing systems for delivering antibacterial drugs to the surgical intervention area demonstrate high clinical efficacy in the prevention of peri-implant infection. To date, the most studied agents for creating coatings are metal ions, polymers, as well as composites containing antibacterial / antiseptic drugs. The most effective are multifunctional and intelligent coatings that have a combined effect on microbial biofilms due to their pronounced anti-adhesive and biocidal properties. There is a shortage of research on the use of multifunctional coatings in traumatological and orthopedic practice. There are no publications in the world literature devoted to the use of antibacterial coatings in the treatment of gunshot fractures and their consequences.

Conclusion The use of polymer and multifunctional antibacterial coatings, hydrogels, as well as oxides of silver, iodine and zinc demonstrate high efficiency in the prevention of infectious complications after internal osteosynthesis, and, in our opinion, can be considered for use in clinical practice in the treatment of gunshot fractures of limb bones.

Keywords: antibacterial coating, internal osteosynthesis, gunshot fractures, infectious complications, peri-implant infection

For citation: Davydov DV, Brizhan LK, Kerimov AA, Khominets IV, Bekshokov KK, Gritsyuk AA, Kukushko EA, Besedin VD. Efficiency of using antibacterial coatings on titanium implants in the treatment of gunshot fractures. *Genij Ortopedii*. 2025;31(4):520-536. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-520-536.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в лечении боевой хирургической патологии можно выделить две наиболее значимые проблемы, которые не теряют своей актуальности на протяжении длительного времени: сочетание огнестрельных ранений с обширными тканевыми дефектами и высокий процент инфекционно-воспалительных осложнений, вызванных полирезистентной микрофлорой [1, 2]. Развитие инфекционных осложнений при переломах костей, вызванных воздействием огнестрельных снарядов и боеприпасов, в первую очередь связано с тяжестью получаемых тканевых повреждений, первичной микробной контаминацией раневого канала, а также развитием вызванных повреждающим действием огнестрельных боеприпасов вторичных некробиотических изменений в окружающих раневой канал тканях.

Ранения, возникающие вследствие воздействия огнестрельных и взрывных боеприпасов, имеют ряд характерных особенностей, напрямую влияющих на процент развития осложнений и тактику лечения. Среди них можно выделить сложную конфигурацию раневого канала, неравномерную протяженность омертвевших и некротизирующихся тканей вокруг раневого канала, первичную микробную контаминацию, а также частое сочетание данных ранений с переломами костей и травмами сосудисто-нервных образований [3]. Особенности раневой баллистики при воздействии ранящих снарядов приводят к возникновению обширных комплексных (мягкотканых и костных дефектов), которые по своим патоморфологическим свойствам характеризуются значительным повреждением костномозговой полости и собственных питающих артерий, обуславливая тем самым гипоксию окружающих тканей, что замедляет репаративные процессы и зачастую является пусковым механизмом развития огнестрельного остеомиелита [4]. Так, к примеру, в результате анализа исходов лечения 148 раненых с огнестрельными переломами костей конечностей В.В. Хоминец и др. выявили развитие инфекционных осложнений среди пациентов основной и контрольных групп в 5,8 % и 9,7 % соответственно [5]. А.С. Lee et al. в многоцентровом ретроспективном исследовании по анализу осложнений огнестрельных переломов большеберцовой кости выявили развитие инфекционно-воспалительных осложнений после проведения остеосинтеза в 14 % наблюдений [6].

Дополнительные сложности в лечении огнестрельных переломов вносит наличие в раневом канале разнообразной по своему составу и резистентной к воздействию антибиотиков микрофлоры, которая во многом и обуславливает неэффективность классических методик лечения [7].

Исходя из вышеизложенного, выполнение окончательных реконструктивно-восстановительных операций (остеосинтез, эндопротезирование и др.) при огнестрельных переломах возможно только при стабилизации общего состояния пациента и соблюдения строгих рекомендаций по переходу на внутреннюю фиксацию [8]. Однако даже в случае соблюдения данных требований при проведении остеосинтеза сохраняется высокий риск возникновения инфекционных осложнений.

В связи с этим разработка и оптимизация существующих систем доставки антибактериальных, антисептических и репаративных агентов к поврежденным тканям в целях профилактики и лечения инфекционно-воспалительных осложнений является одной из перспективных передовых технологий в оказании комплексной специализированной медицинской помощи пациентам с огнестрельными ранениями, сопровождающимися переломами костей скелета [9, 10].

Цель работы — на основании анализа российских и зарубежных литературных источников определить эффективность использования антибактериальных покрытий титановых имплантатов при огнестрельных переломах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Поиск русскоязычных источников проведен в электронной библиотеке eLibrary по следующим ключевым словам и словосочетаниям на русском и английском языках: antibacterial coatings, gunshot fractures, implant-associated infection, internal osteosynthesis, infectious complications, антибактериальное покрытие, огнестрельные переломы, инфекционные осложнения, периимплантная инфекция. Глубина поиска — с 2009 г. по 2025 г. включительно. Поиск иностранных источников осуществлен в поисковой системе PubMed, а также с использованием аналитического инструмента на базе искусственного интеллекта ConnectedPapers с применением функций Seminal works для вывода перечня ключевых тематических работ и Derivative works для вывода новых, актуальных работ, систематических обзоров и мета-анализов, находящихся в зоне интересов авторов. Поиск на ресурсе ConnectedPapers начат со статьи: Akshaya S, Rowlo PK, Dukle A, Nathanael AJ. Antibacterial coatings for titanium implants: recent trends and future perspectives. *Antibiotics (Basel)*. 2022;11(12):1719. doi: 10.3390/antibiotics11121719.

Критерии включения:

— полнотекстовые научные публикации, в которых представлены результаты анализа эффективности различных антибактериальных покрытий, используемых в травматологии и ортопедии, в том числе при открытых и огнестрельных переломах;

— полнотекстовые систематические обзоры литературы и мета-анализы, освещающие тему использования антибактериальных покрытий в хирургии и опубликованные преимущественно за последние 5–10 лет.

Критерии не включения: тезисы научно-практических конференции, авторефераты кандидатских и докторских диссертации, а также статьи, не соответствующие в полной мере критериям включения.

Для анализа отобрано 85 статей (70 иностранных и 15 отечественных).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Современное состояние проблемы имплантат-ассоциированной инфекции

Развитие гнойно-воспалительных процессов в области проведения хирургического вмешательства является серьезным осложнением остеосинтеза, а их лечение в значительной мере затруднено наличием в очаге воспаления металлоконструкции, колонизированной микробными биопленками. Распространенность данных осложнений в послеоперационном периоде при проведении операции погружного остеосинтеза переломов мирного времени составляет от 2 до 22,4 % [11]. При лечении раненых с огнестрельными переломами, у которых развитие инфекционных осложнений наблюдается чаще, чем при открытых переломах мирного времени, проблема развития имплант-ассоциированной инфекции является наиболее актуальной [12].

По результатам различных исследований, даже при проведении плановых оперативных вмешательств эндопротезирования крупных суставов распространённость перипротезной инфекции может составлять до 15 % [13]. Традиционно профилактика и лечение имплантат-ассоциированной инфекции заключались в проведении радикальной хирургической обработки, местной и системной антибиотикотерапии, а также имплантации цементных «спейсеров», высвобождающих молекулы антибактериальных препаратов [14]. Однако массовое применение антибиотиков широкого спектра действия способно оказывать на организм выраженные токсические эффекты и приводит к увеличению числа антибиотикорезистентных бактерий, что требует поиска альтернативных методов профилактики и лечения периимплантной инфекции [15].

Наличие в очаге воспаления ортопедических имплантатов неизбежно приводит к адгезии колониеобразующих бактерий, которые формируют на их поверхности микробную биопленку, способную противостоять воздействию защитных сил организма и антибиотических препаратов [16]. Биопленку при этом можно определить как микробное сообщество бактерий, прикрепленных к субстрату и внедренных в матрицу, которую они произвели в процессе своей жизнедеятельности [17]. Бактерии, находящиеся в состоянии биопленки, демонстрируют повышенную устойчивость к антимикробным агентам и меньшую восприимчивость к воздействию систем иммунологической защиты организма [18]. В мировой литературе имеются сведения, что формирование биопленок на поверхности имплантатов может происходить в течение 12–18 часов после выполнения оперативного вмешательства [19]. В связи с этим главной задачей лечения при имплантат-ассоциированных инфекциях является именно предотвращение образования биопленок.

Характеристика основных возбудителей имплантат-ассоциированной инфекции при огнестрельных ранениях

Повреждения, полученные при воздействии огнестрельных и взрывных боеприпасов, представляют собой наиболее сложный вид ранений, что обусловлено массивным повреждением тканей различной локализации, подвергающим стерильные участки тела контаминации огромным количеством бактерий. При боевых повреждениях основой для развития инфекционных осложнений является загрязнение бактериями из собственной микрофлоры или попавшими в рану из окружающей среды вместе с экзогенными агентами (пулями, фрагментами ткани, пылью, грязью, водой). При этом возможна и вторичная контаминация из нозокомиальных источников на этапах оказания медицинской помощи [20]. Кроме того, на видовой состав этиологических агентов в контаминированных огнестрельных ранах влияют вид ранящего снаряда, поврежденная область тела, временной интервал между ранением и хирургической обработкой, климатические факторы, эколого-географические и санитарно-гигиенические условия местности.

Среди микробиологических агентов, связанных с образованием на имплантатах микробной биопленки и последующим развитием имплантат-ассоциированной инфекции, наиболее изучены *S. aureus*, *S. epidermidis*, *P. aeruginosa*, а также метициллин-резистентный *S. aureus* (MRSA) [21].

Е.В. Крюков и др. в работе, посвященной анализу антибиотикорезистентности микрофлоры раневого отделяемого, при сопоставлении результатов исследования раневого отделяемого за 2022 г. и 2020 г. обнаружили резкое изменение спектра возбудителей раневой инфекции: увеличение доли

Acinetobacter spp., *Bacillus spp.*, *Enterococcus spp.*, *P. aeruginosa*, *Klebsiella pneumoniae*; снижение доли ряда грамотрицательных бактерий, в том числе *Proteus spp.* и *Escherichia coli*; выраженное пятикратное сокращение доли *Streptococcus spp.* и *S. aureus* [7].

Адгезия бактерий на поверхность титанового имплантата является первым этапом в развитии имплантат-ассоциированной инфекции. Наиболее частыми микробными агентами, обуславливающими развитие данного инфекционного осложнения, являются стафилококки *S. aureus* и *S. epidermidis*, на долю которых приходится 18,4–37,4 % случаев [22]. Способность *S. aureus* к формированию трехмерной структуры, состоящей из бактерий и внеклеточных биополимеров (полисахаридов и/или белков), называемых биопленкой, является центральным звеном в процессе развития инфекций, связанных с наличием в организме имплантатов.

Развитие множественной лекарственной устойчивости у микроорганизмов представляет собой одну из наиболее значимых проблем во всем мире и рассматривается как угроза национальной безопасности [23]. Полирезистентные штаммы *S. aureus* обуславливают сложности профилактики и лечения инфекционных осложнений переломов костей, что особенно актуально при оказании помощи в условиях ограниченных ресурсов. В. Vijayakumar et al. в результатах когортного исследования сообщают, что 75 % изолятов, полученных от 100 пациентов, были устойчивы к гентамицину, 81 % — к ципрофлоксацину, 59 % — к цефотаксиму [24].

Еще одним значимым микробным агентом, обуславливающим развитие инфекционных осложнений у раненых, является *P. aeruginosa*, грамотрицательный условно-патогенный микроорганизм, играющий важную роль в развитии инфекционных осложнений при огнестрельных переломах благодаря способности к размножению в различных средах, образованию биопленок и устойчивости к антибиотикам [25]. Огнестрельные ранения, особенно полученные на открытом воздухе и/или в боевых условиях, часто загрязнены почвой, водой и другими объектами, которые являются резервуарами *P. aeruginosa* в окружающей среде. В медицинских учреждениях *P. aeruginosa* также может колонизировать организм раненых, особенно при длительном их пребывании в стационаре [26].

Упомянутые выше бактерии существуют на поверхности титановых имплантатов в виде микробных колоний и защищены капсулой, обуславливающей резистентность микроорганизмов к действию антибактериальных агентов. При этом следует упомянуть тот факт, что далеко не все случаи микробной контаминации имплантатов во время проведения хирургического вмешательства сопровождаются развитием клинически выраженной периимплантной инфекции и зачастую протекает в виде микробного носительства, что подтверждается данными L. Knabl et al. [27].

Данные особенности инфекционного процесса при наличии ортопедических имплантатов в организме обуславливают необходимость разработки стратегии для предотвращения колонизации поверхности имплантата, например, покрытия, содержащего антибиотика, или интраоперационного нанесения лечебного геля на имплантат.

Антибактериальные покрытия титановых имплантатов

Титан и его сплавы на сегодняшний день признаны «золотым стандартом» благодаря стойкости к коррозии и хорошей биосовместимости с костной тканью. В течение последних пятидесяти лет их широко применяют в травматологии и ортопедии в качестве материала для изготовления имплантатов, компонентов эндопротезов и фиксаторов для остеосинтеза переломов костей (интрамедуллярные штифты, наkostные пластины и винты) [28]. По мнению Y. Wang et al., титан или его сплавы сами по себе не способны предотвратить возможное развитие имплантат-ассоциированной инфекции, а системная антибиотикотерапия, несмотря на доказанную эффективность, имеет ряд недостатков (токсическое воздействие на органы и ткани, сложность доставки лекарственного средства в область оперативного вмешательства, развитие антибиотикорезистентности у бактерий) [29]. Перспективным направлением профилактики имплант-ассоциированных инфекций в области хирургического вмешательства является покрытие титановых имплантатов антимикробными агентами. Для достижения данных свойств поверхность имплантатов покрывают антибактериальными веществами с помощью различных методов модификации поверхности.

Существующие покрытия против бактериальных инфекций можно разделить на две категории: пассивные (для предотвращения прикрепления бактерий) и активные (для уничтожения бактерий и ингибирования их роста). Пассивные покрытия предназначены для предотвращения инфекции путем сопротивления адгезии патогенов вместо их прямого уничтожения. Данную стратегию обычно применяют при модификации структуры поверхности имплантата. Стандартными материалами пассивных покрытий являются полиэтиленгликоль, гиалуроновая кислота и др. Активное покрытие использует ионы металлов, антибиотики и антимикробные пептиды для функционализации поверхности имплантата и уничтожения бактерий посредством контактного устранения или высвобождения антибак-

териальных средств в окружающие ткани. Кроме того, совместно с антибактериальными материалами могут быть нанесены другие биоматериалы, способствующие остеointеграции, ангиогенезу и иммуномодуляции [30].

По мнению K. Bruellhoff et al., «идеальное» антибактериальное покрытие, наносимое на поверхность имплантатов, применяемых в травматологии и ортопедии, должно быть биологически совместимым и не оказывать местного раздражающего действия, а также проявлять выраженные бактерицидные свойства в раннем послеоперационном периоде, при этом сохраняя поверхностную бактерицидную активность в отношении широкого круга микроорганизмов в течение всего срока имплантации. Кроме того, покрытие должно препятствовать адгезии бактерий к поверхности имплантата и подавлять образование микробных биопленок [31].

В настоящее время в большинстве случаев нанесение антибактериального покрытия предполагает создание дополнительного слоя на поверхности имплантата без нарушения природных свойств основного материала. Это можно осуществить различными методами, например, электрохимическим осаждением, ионизированным струйным осаждением, золь-гель методом, микродуговым оксидированием и др. [32, 33]. Для профилактики инфекционных осложнений, предотвращения образования биопленок и улучшенной интеграции в ткани, покрытия могут содержать различные антимикробные агенты: антибиотики, неорганические элементы, полимеры, гибридные органические и органические компоненты, бактериальные пептиды [34] (рис. 1).

Покрывтия, содержащие антибактериальные и/или антисептические препараты

По данным литературы, наиболее применяемыми агентами для профилактики инфекционных осложнений после операции внутреннего остеосинтеза являются покрытия на основе антибактериальных препаратов. Для покрытия имплантата, высвобождающего антибиотик, решающее значение имеют концентрация лекарственного вещества и скорость его выделения. Проведенные клинические испытания доказали эффективность покрытий, содержащих антибиотики (гентамицин, ванкомицин, амикацин, доксициклин, линезолид, рифампицин и фузидиевая кислота), в отношении широкого спектра возбудителей хирургической инфекции [21].

Гентамицин является популярным антибиотиком, имеющим широкий бактерицидный спектр, низкую токсичность и высокую биосовместимость, его широко используют в клинической практике при множестве инфекций. Выраженность бактерицидного действия гентамицина зависит от концентрации препарата в составе антибактериального покрытия. Согласно некоторым сообщениям, покрытия на основе гентамицина улучшают остеointеграцию и предупреждают развитие остеомиелита, а также эффективны при инфекциях, вызванных золотистым стафилококком, синегнойной и кишечной палочкой. Проведено множество исследований, доказывающих эффективность амоксициллина, ванкомицина и тетрациклина в качестве покрытий поверхности имплантатов для предотвращения инфекции [35].

Согласно результатам исследования M.A. Harris et al., имплантаты с антиадгезивным покрытием с добавлением амикацина оказывают комбинированное воздействие на основные возбудители имплантат-ассоциированной инфекции и проявляют высокую биоцидную активность *in vitro*, что может быть использовано при изготовлении покрытий ортопедических имплантатов [36]. Однако применение антибиотиков на поверхности имплантата вызывает опасения по поводу антибиотикорезистентности в связи с распространенностью устойчивых к антибиотикам штаммов бактерий.

Доксициклин является антибиотиком широкого спектра действия, для которого задокументирована высокая бактерицидная активность к основным возбудителям имплантат-ассоциированной инфекции (даже для MRSA). Он менее нефротоксичен и проникает в клетки организма эффективнее, чем гентамицин [37]. Линезолид — синтетический антибиотик с низким потенциалом развития внутренней резистентности и отсутствием перекрестной резистентности к другим системно вводимым антибиотикам, имеет 100 % пероральную биодоступность, хорошую фармакокинетику и хорошее проникновение

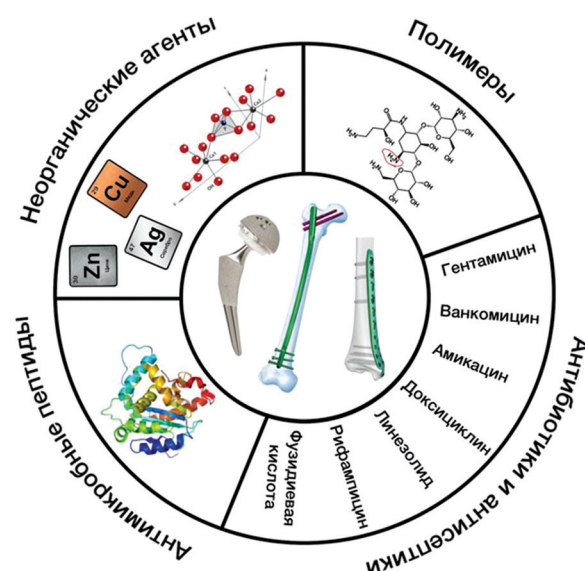


Рис. 1. Виды антибактериальных покрытий имплантатов (иллюстрация — авторская)

в соединительные ткани. Моксифлоксацин, используемый в золь-гелевых покрытиях, обеспечивает противомикробную активность как *in vivo*, так и *in vitro* в имплантатах Ti [38]. Использование антибиотика фосфомицин, по данным исследования A. Gulcu et al., не эффективно для уничтожения бактерий и профилактики образования биопленки [39]. Важным недостатком покрытий на основе антимикробных препаратов является постоянное снижение концентрации антимикробного препарата.

В нашей стране сотрудниками НМИЦ ТО имени академика Г.А. Илизарова в ходе проведения экспериментального исследования обнаружено, что нанесение на поверхность титана кальций-фосфатного покрытия, содержащего антибиотики, способно эффективно подавлять рост грамотрицательной микрофлоры и может быть успешно использовано для профилактики развития имплантат-ассоциированной инфекции. Однако эффективность данных покрытий напрямую зависит от используемого антибиотика и его концентрации [40].

Костный цемент на основе полиметилметакрилата с добавлением термостабильных антибактериальных препаратов, обладающих локальным бактерицидным действием, активно применяют в ортопедических клиниках на протяжении длительного времени как для лечения, так и для профилактики перипростетической инфекции [41]. Кроме того, костный цемент с добавлением антибиотиков хорошо зарекомендовал себя при лечении пострадавших с открытыми, в том числе огнестрельными, переломами, что подтверждено рядом исследований [42, 43]. Однако при изучении отдаленных результатов использования данного метода выявлены его очевидные недостатки: кратковременность высвобождения антибактериальных препаратов, образование биопленок на цементном покрытии, непредсказуемость концентрации препарата в окружающих тканях и т.д. При этом, несмотря на все имеющиеся недостатки, данная методика и по сей день остается «золотым стандартом» лечения пациентов с костно-суставной инфекцией, эффективность которого составляет от 60 до 87,5 %, а процент рецидивирования инфекционного процесса — от 6,3 до 40 % [44].

Еще одним популярным направлением предотвращения развития имплантат-ассоциированной инфекции является нанесение на поверхность имплантатов антисептических препаратов. Применение антисептиков оказывает мгновенный результат по сравнению с отсроченным воздействием антибиотиков, поскольку они напрямую воздействуют на бактериальную клеточную мембрану в отличие от ингибирования бактериального ДНК-зависимого синтеза РНК или ингибирования бактериальной РНК-полимеразы и синтеза белка, которые заложены в механизм действия антибиотиков [45].

Антибактериальные покрытия на основе наночастиц металлов и оксидов металлов

Наночастицы металлов и их оксиды способны оказывать избирательное бактерицидное действие на прокариотические клетки, распознавая их через металлопротеины и систему транспорта частиц металлов. Данные наночастицы способны обеспечивать длительное антибактериальное и бактериостатическое действие путем генерации активных форм кислорода, которые повреждают структуру бактериальных клеток, нарушая метаболические реакции и ингибируя синтез ДНК, что в итоге вызывает гибель клетки [46]. Более того, оксиды металлов взаимодействуют с бактериальными клетками на основе действия электростатических сил, разрушающих клеточную стенку бактерий, ферменты и ДНК посредством так называемого «кислородного взрыва». Наночастицы металлов и их оксиды обычно убивают бактериальные клетки несколькими способами, включая взаимодействие с билипидным слоем бактериальных клеточных стенок, прилипание к цитозольным белкам бактериальных клеток (включая ДНК и ферменты). Примерами металлов, используемых в составе антибактериальных покрытий, являются серебро, золото, железо, галлий, оксид цинка, оксид магния и оксид титана, они оказывают эффективное бактерицидное действие в отношении различных грамположительных и грамотрицательных бактерий [47]. Однако, по мнению E. Zhang, при использовании покрытия на основе металлов и их оксидов необходимо проявлять настороженность, так как высокие концентрации ионов металлов и их оксидов способны вызвать локальное и системное повреждающие действия на клетки и ткани организма [48].

Серебро

На сегодняшний день серебро является одним из наиболее широко используемых металлов для изготовления покрытий титановых имплантатов. Ионы серебра имеют широкий спектр антибактериальной активности и оказывают длительный антибактериальный эффект, который меньше зависит от лекарственной устойчивости бактерий и способен предотвратить адгезию бактерий к поверхности имплантатов. Кроме того, покрытия с ионами серебра характеризуются хорошей биосовместимостью, очень низкой гено- и цитотоксичностью и потенциалом применения в различных типах биоматериалов [49].

Также наночастицы серебра оказывают значительное биоцидное действие против полирезистентных бактерий и грибов и по сравнению с местным и системным применением антибиотиков являются привлекательной альтернативой для снижения риска лекарственной устойчивости у бактерий [50].

Аналитический обзор Q. Yang и L. Chen показал, что антимикробные свойства покрытий, содержащих серебро, напрямую зависят от количества высвобождаемых ионов [51]. Теоретически более высокая концентрация ионов серебра в локальной депо-системе приводит к лучшему антимикробному эффекту. Однако токсические эффекты усиливаются с увеличением концентрации ионов серебра, а их избыток в организме человека может вызвать повреждение печени, почек, легких, сердца и кишечника. Цитотоксичность ионов серебра в различных клетках млекопитающих зависит как от их размера, дозы и формы, так и от продолжительности взаимодействия с клетками. Наночастицы серебра способны не только накапливаться в печени и селезенке, но и пересекать гематоэнцефалический барьер, вызывая повреждение головного мозга. В ходе испытаний по культивированию клеток *in vitro* установлено, что наночастицы серебра токсичны для нескольких линий клеток человека, включая бронхиальные эпителиальные клетки человека, эндотелиальные клетки пупочной вены человека, эритроциты, моноклеарные клетки периферической крови человека, бессмертные кератиноциты человека, клетки печени и т.д. При этом ряд исследований показали, что низкая концентрация ионов серебра может оказывать антибактериальное действие без серьезных побочных эффектов на организм. Однако ионы серебра проявляют антибактериальные свойства только при концентрациях выше 0,2 %. Медленное высвобождение ионов серебра и их терапевтическая концентрация являются ключевыми факторами в клинической практике. Однако необходимо учитывать, что слишком медленное высвобождение ионов серебра с поверхности покрытия неспособно оказывать должного антибактериального действия [52].

В исследовании M. Thukkaram et al. титановые подложки, легированные наночастицами серебра, полученные путем плазменного электролитического окисления титана с последующей ионной имплантацией, оказывали выраженное бактерицидное действие против метициллинрезистентных золотистых стафилококков и устойчивых к антибиотикам *E. coli*. Антибактериальная активность покрытия и выделение ионов при этом зависели от концентрации ионов серебра. В ходе исследования наблюдали первоначальное быстрое высвобождение ионов серебра в концентрациях, подходящих для предотвращения инфекций после имплантации, за которым следовало медленное, длительное высвобождение ионов в течение семи дней [53].

Таким образом, ионы серебра, входящие в состав антибактериальных покрытий, оказывают выраженное антибактериальное воздействие против грамположительных и грамотрицательных бактерий, воздействуя на них различными механизмами. Кроме того, различные формы серебра могут быть использованы в качестве антибактериального вещества в ортопедических имплантатах, гелях, мазях и хирургических инструментах, что делает возможным его широкое применение в медицинской практике.

Медь, цинк и селен

К металлам, обладающим выраженной антибактериальной активностью, помимо серебра относятся медь, цинк и селен. Данные легирующие металлы являются востребованными благодаря их антибактериальной природе, низкой стоимости и способности стимулировать остеогенез. Упомянутые металлы являются микроэлементами, необходимыми организму для обеспечения нормального функционирования систем и органов, поэтому их использование в составе антибактериальных покрытий способствует повышению биосовместимости внедряемых в ткани хирургических имплантатов. Более того, по мнению W. Zhu et al., цинксодержащие покрытия способствуют дифференцировке остеобластов и улучшают коррозионную стойкость титановых имплантатов [54].

В исследовании L. Wang et al. показано, что титановые подложки, содержащие покрытия на основе полимолочной кислоты с различными концентрациями хлорида меди (CuCl_2), эффективно ингибируют рост золотистого стафилококка и оказывают остеогенный эффект *in vitro* и *in vivo*. Исследования *in vitro* продемонстрировали дозозависимое взрывное высвобождение иона Cu^{2+} и его антибактериальное действие, направленное на золотистый стафилококк [55].

Наночастицы селена являются выгодной платформой для разработки следующего поколения антимикробных покрытий, поскольку они обладают способностью уничтожать микробы при помощи нескольких механизмов, стабильны в условиях *in vitro* и *in vivo* и могут быть легко иммобилизованы на различных поверхностях. Кроме того, селен, нанесенный на микропористые покрытия из диоксида титана, с кальцием и фосфором на титановых подложках способен улучшить антибактериальные, антионкогенные и остеогенные свойства имплантата [56].

J. Zhou et al. установили, что покрытие, содержащее 8 мас. % селена, является оптимальным и обеспечивает 97 %-ную эрадикацию *E. coli* и *S. aureus*, максимальную остеогенную активность и проявляет антионкогенные свойства. Более высокие дозы селена препятствуют пролиферации клеток, в то время как низкие дозы не оказывают значительного антибактериального действия [57].

Аналогичным образом свое антибактериальное действие оказывает цинк в виде комплексов цинка и наночастиц оксида цинка. Комплексы цинка проявляют противогрибковую активность, тогда как оксиды цинка проявляют свою антимикробную активность посредством реализации двух различных ме-

ханизмов, а именно высвобождении активных форм кислорода (фотокаталитический процесс) или же наночастиц оксида цинка, которые приводят к образованию внутриклеточных кислородных радикалов, вызывая повреждение клеток [58].

Йод

Йодсодержащие антибактериальные покрытия и антисептики обладают широким спектром бактерицидного действия, а также проявляют высокую биоцидную активность по отношению к различным вирусам и грибкам, что делает их весьма эффективным средством для профилактики развития послеоперационных осложнений [59]. Кроме того, являясь микроэлементом, необходимым для синтеза гормонов щитовидной железы, йод практически не вызывает развития аллергических реакции.

D. Inoue et al. в ходе проведения экспериментального исследования установили, что нанесенное на поверхность титановых имплантатов йодное покрытие проявляет активное биоцидное действие по отношению к MRSA, *P. aeruginosa*, метициллин-резистентным *S. epidermidis* и *C. albicans*. При этом антибактериальная эффективность титановой поверхности, покрытой йодом, была выше, чем у титановых имплантатов с оксидной пленкой, нанесенной путем анодирования [60].

A S. Yamaguchi et al. разработали новый раствор и способ термической обработки поверхности имплантатов посредством ионообменной реакции с использованием слоистой структуры титаната кальция, при котором большое количество положительно заряженных ионов йода вводят в титановый имплантат и на его поверхность. Образованный таким образом титанат кальция, содержащий йод, медленно высвобождает $5,6 \times 10^{-6}$ ионов йода в течение 90 дней [61].

Результаты упомянутых исследований свидетельствуют о том, что титановые имплантаты с йодным покрытием могут иметь большой потенциал при разработке инновационных антибактериальных имплантатов, которые способны предотвратить раннее начало периимплантной инфекции, в том числе и при остеосинтезе огнестрельных переломов.

Другие металлы

Покрытия, содержащие кальций, стронций, галлий, висмут, также могут использовать для усиления биологически активных свойств титановых имплантатов. M.R. Katunar et al. сообщают, что керамика, содержащая стронций, усиливает бактерицидное действие и способствует росту и регенерации костной ткани [62]. Помимо этого, Q. Zhao et al. установили, что микропористое покрытие из диоксида титана, легированного цинком или стронцием, способствует адгезии остеобластов и ингибирует рост золотистого стафилококка [63].

Таким образом, одним из наиболее важных ограничений всех используемых металлов в качестве антибактериального покрытия является отсутствие доступных данных исследований *in vivo* с долгосрочными результатами, обобщающими применение данных имплантатов в клинической практике.

Представленные результаты включенных в данный обзор исследований *in vitro* и *in vivo* настоятельно предлагают травматологам-ортопедам применение традиционных и новых антимикробных модификаций поверхности имплантатов при лечении пациентов с периимплантной инфекцией. Отсутствие опыта использования в клинических условиях вызывает опасения относительно долгосрочных результатов этих имплантатов и роста множественных резистентных микроорганизмов в результате их клинического применения.

Антибактериальные неорганические покрытия с остеointегративными свойствами

К антибактериальным покрытиям, обладающим свойством повышения остеointеграции имплантатов, относятся покрытия на основе гидроксиапатита ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$), магния и другие. Гидроксиапатит, являясь естественным неорганическим компонентом костной ткани, хорошо зарекомендовал себя в клинической практике благодаря высокой биосовместимости и бактерицидной активности. Кристаллическая структура гидроксиапатита позволяет в небольших масштабах замещать Ca^{2+} различными чужеродными ионами, способствуя адгезии остеобластов и расширяя возможности модификации поверхности имплантатов для повышения бактерицидной активности и остеокондуктивных свойств [64].

K. Batebi et al. разработали структуру антибактериального гидроксиапатита путем замещения в нем различных Ca^{2+} на ионы Ag^+ , Cu^{2+} и Zn^{2+} . Среди данных ионов наночастицы серебра наиболее эффективно нарушали целостность бактериальной клетки, связываясь с белками и ферментами внутри бактерий. Это серьезно разрушало клетку и нарушало ее основные функции (регуляция ферментативной сигнальной активности, проницаемость, клеточное окисление, дыхательные процессы), что в конечном итоге приводило к гибели бактерии [65]. M. Turkoz et al. синтезировали композит гидроксиапатита с добавлением ионов серебра и фтора методом осаждения и обнаружили, что присутствие фтора в композите не только улучшило антибактериальный эффект гидроксиапатита против *E. coli*, но также

повысило его плотность и остеointегративные свойства. Авторы показали, что полученное соединение обладало хорошей антибактериальной активностью против клеток *E. coli* и *S. aureus* и улучшало остеointегративные свойства имплантатов [66].

Магний и его соединения относятся к биodeградируемым материалам, используемым в травматологии и ортопедии, обладают высокой механической прочностью и жесткостью, наряду с другими биоразлагаемыми материалами, что позволяет им прочно удерживать костные отломки при их использовании в качестве материала для изготовления ортопедических имплантатов. Кроме того, являясь макроэлементом, необходимым для нормальной жизнедеятельности, магний из покрытий имплантатов переходит в окружающую костную ткань, ускоряя при этом репаративную регенерацию костей и остеointегративные свойства имплантатов. Кроме того, магний активно препятствует колонизации *S. aureus* на поверхности имплантатов, что позволяет использовать его в качестве материала для изготовления антибактериальных покрытий. При этом магний проявляет и выраженные противогрибковые свойства [67]. Согласно данным обзора M. Pogorielov et al., добавление магния в хирургические имплантаты ускоряет образование твердой костной мозоли за счет адгезии остеобластов и ремоделирования кости [68].

Покрyтия на основе антимикробных пептидов

Покрyтия на основе антимикробных пептидов (АМП) в настоящее время широко используют в качестве альтернативы обычным методам обработки поверхности титановых имплантатов, поскольку они обладают широким спектром действия и требуют низких концентраций для эффективного антимикробного эффекта, а также способны снизить рост численности антибиотикорезистентных штаммов бактерий. Аминокислоты, входящие в состав данных пептидов, могут быть катионными или амфипатическими, взаимодействовать с плазматической мембраной бактерий, приводя к их гибели [69]. В настоящее время существует множество исследований, посвященных изучению эффективности использования АМП. L. Caselli et al. утверждают, что АМП на поверхности имплантатов усиливают антимикробные эффекты фотокаталитических наночастиц оксида титана, не оказывая при этом токсического действия на организм [70]. P. Keikhosravi et al. демонстрирует успешное использование АМП САТН-2 при разработке покрытий титановых имплантатов, что предполагает многообещающие результаты в разработке антибактериальных покрытий для профилактики образования биопленки и лечения перимплантной инфекции [71].

Покрyтия на основе полимеров

Для создания антибактериальных покрытий поверхности титановых имплантатов используются как натуральные, так и синтетические полимеры, поскольку их можно легко модифицировать при помощи биоактивных компонентов. Полимеры на основе хитозана, азотсодержащих полиэтиленаминов и четвертичных аммониевых соединений обладают собственными биоцидными свойствами, в то время как другие полимеры включают в состав антибиотиков для получения антибактериальной активности. Хотя нанесение антибиотиков на полимеры и дает желаемый антибактериальный эффект, оно не обеспечивает длительного высвобождения препарата. По сравнению с синтетическими большинству натуральных полимеров не хватает механической прочности и быстрой деградации, что может привести к неравномерному вымыванию частиц лекарственного препарата из имплантата. Следовательно, данные полимеры часто включают в состав неорганических систем, таких как оксиды металлов, гидроксипатит и др., для повышения антибактериального действия. Поэтому для оказания биоцидного действия можно провести модификацию полимерной цепи путем присоединения четвертичного аминного звена, которое придаст полимеру бактерицидные свойства, вместо того, чтобы превращать полимер в носитель антибиотиков [72].

Существует множество примеров использования подобных модификации полимерных покрытий. G. Kaleli-Can et al. обнаружили, что титановые имплантаты с покрытием из диэтилфосфита, нанесенным при помощи плазменной полимеризацией, демонстрируют отличную цитосовместимость и подавляют образование биопленки. Исследования *in vitro* показали антибактериальную активность данного покрытия против *S. aureus* и клеток *C. albicans*, что доказывает многообещающий потенциал их применения при лечении пациентов с перимплантной инфекцией [73]. Разработанное J. Peng et al. антибактериальное покрытие на основе полигексаметиленбигуанида позволило почти на 100 % подавить рост *S. aureus* и *E. coli* на поверхности имплантатов. Исследования *in vivo* на модели инфицированных крыс дополнительно подтверждают бактерицидную природу разработанного покрытия [74].

Одним из перспективных полимеров с антибактериальными свойствами, активно используемыми в настоящее время для разработки покрытий имплантатов, является хитозан. Он является природным катионным полисахаридом с хорошей биосовместимостью и отсутствием цитотоксичности, чьи положительно заряженные аминогруппы могут генерировать электростатические взаимодействия с от-

рицательно заряженными мембранами бактериальных клеток, тем самым изменяя проницаемость клеточных мембран и вызывая лизис и гибель бактерий. В связи с этим ожидается, что хитозан станет эффективным средством для предотвращения образования биопленки на поверхности ортопедических имплантатов. Z.X. Peng et al. оценили влияние гидроксипропилтриметиламмонийхлорида хитозана в трех различных концентрациях компонентов (6 %, 18 % и 44 %) на предотвращение образования биопленки на поверхности титановых имплантатов с помощью тестов *in vitro* и обнаружили, что три вида разработанного соединения, в особенности два последних, могут значительно ингибировать образование биопленки на поверхности имплантатов, а также оказывать эффективное терапевтическое воздействие на ранее сформированные зрелые биопленки [75].

Многофункциональные и интеллектуальные покрытия

Помимо придания поверхности имплантатов бактерицидных свойств стратегия разработки антибактериальных покрытий может реализовываться путем повышения биосовместимости имплантатов, увеличения их остеогенных эффектов, а также обеспечения их иммуномодулирующими и противовоспалительными свойствами. Покрытия с такими дополнительными функциями могут напрямую стимулировать репаративную регенерацию кости. При этом стимулирование остеогенеза и остеоинтеграции также способно снизить бактериальную адгезию и пролиферацию. Однако регенерация кости подавляется в условиях бактериальной инфекции, наличия костных секвестров и дефицита васкуляризации, что будет постоянно приводить к персистенции инфекции. В связи с этим, будущие исследования в этом направлении должны определить, как эффективно сдерживать инфекцию и усиливать процесс регенерации кости с помощью многофункциональных покрытий [76].

На сегодняшний день в мировой литературе имеется множество работ, посвященных изучению интеллектуальных покрытий. Y. Zhang et al. путем использования ванкомицина и пептидного конъюгата разработали чувствительную к *S. aureus* пептидную последовательность, а затем конъюгировали антибиотик с этим специально созданным пептидом. Затем конъюгат связывали с поверхностью титанового имплантата, где пептид может быть распознан и расщеплен ферментом, секретируемым *S. aureus*, что позволяет высвобождать антибиотик только в присутствии *S. aureus*, тем самым достигая доставки антибактериального средства именно при возникновении инфекционного процесса [77].

F. Zhang et al. описали чувствительное к изменению pH самоадаптирующееся покрытие с антибактериальными, противовоспалительными и остеоинтеграционными свойствами. Данное интеллектуальное покрытие состояло из антибактериального сополимера, содержащего соли четвертичного аммония, нанесенные на поверхность титана путем самосборки слоев. Изменение поверхностного заряда покрытий подтверждено измерением дзета-потенциала, покрытия демонстрировали отрицательный заряд в нейтральной среде и положительный заряд в кислой среде. Кислотная среда при этом запускает антибактериальный эффект положительного контроля. Данный эффект меняется на противоположный, когда pH высокий, создавая самоадаптирующееся покрытие. При проведении испытаний *in vitro* данное покрытие демонстрирует высокую эффективность в отношении *E. coli* и *S. aureus* [78].

Полимерные гели

В последние годы все большее внимание исследователей привлекает использование так называемых полимерных гелей в качестве локальных депо-систем для профилактики развития послеоперационных инфекционных осложнений. Клинический разбор D. Pressato et al. показал, что модификация поверхности титановых имплантатов и доставка антимикробных веществ при помощи локальных депо-систем, в дополнение к системной антибиотикотерапии, перспективны и высокоэффективны в снижении риска периимплантной инфекции. Однако данное направление требует дальнейшего изучения, так как отсутствуют литературные данные о длительной эффективности и безопасности данной методики [79].

Проведенное в 2023 г. в НМИЦ ТО им. Н.Н. Приорова клиническое исследование полимерных гидрогелей на основе ненасыщенных производных поливинилового спирта продемонстрировало высвобождение более 70 % загруженного в гель антибактериального препарата из состава матрицы против 10 % из полиметилметакрилата за весь период исследования (28 дней). При этом максимальное высвобождение препарата (до 90 %) наблюдали в течение первой недели [80].

Тем самым, полимерные гидрогели, в состав которых входят антибактериальные препараты, имеют более широкий спектр потенциального клинического применения по сравнению с костным цементом благодаря своей биорезорбируемой природе и контролируемому высвобождению антимикробного агента, обеспечивающему десяти-/стократное увеличение местных концентраций лекарственного препарата вокруг импланта. Кроме того, резорбция гидрогеля устраняет характерный для полиметилметакрилата риск развития антибиотикорезистентности у бактерий.

Применение аддитивных технологий при изготовлении антибактериальных покрытий

В течение последних лет аддитивные (3D) технологии выходят на передовые места в производстве медицинских изделий. Основным преимуществом 3D-печати является возможность изготовления индивидуальных имплантатов, имеющих сложную геометрическую форму, для конкретных пациентов, а также деталей с высокой усталостной прочностью и коррозионной стойкостью. В травматологии и ортопедии аддитивные технологии на протяжении длительного времени успешно применяют при эндопротезировании суставов и других реконструктивно-восстановительных операциях. Однако из-за относительной новизны технологии 3D-печати при производстве титановых медицинских имплантатов наблюдаются отсутствие базовых научных знаний о данном процессе (фазаобразование, новые легирующие элементы и т.д.), а также сложности при проведении процедур постобработки (стерилизация, полировка, заполнение решеточных структур в имплантатах) [81].

К.П. Головки и др. при проведении анализа эффективности изготовленного ими антибактериального покрытия на основе хитозана и поливинилпирролидона показали, что разработанное с помощью 3D-печати антибактериальное покрытие имело высокую биосовместимость, атравматичность, эластичность и адгезию к раневой поверхности. Кроме того, коллектив авторов установил, что использование аддитивных технологий для изготовления биоинженерной конструкции обеспечивает поддержание асептических условий, необходимой влажности, pH и температуры при создании имплантатов [82].

J.A. Inzana et al. в своем исследовании эффективности применения аддитивных технологий при лечении имплантат-ассоциированной инфекции продемонстрировали, что локальная доставка в зону хирургического вмешательства рифампицина и ванкомицина из 3D-печатного кальций-фосфатного скаффолда проявляет большую эффективность по сравнению с антибактериальными спейсерами из полиметилметакрилата, который не способен к переносу рифампицина. Однако данный метод не приводит к эрадикации микробной биопленки, что создает необходимость модификации поверхности данных имплантатов с целью придания им бактерицидных свойств [83].

ОБСУЖДЕНИЕ

На основании анализа современной литературы можно прийти к выводу, что многообразие существующих на сегодняшний день покрытий с антибактериальными свойствами говорит о незавершенности поиска «идеального» способа профилактики развития периимплантной инфекции. Развитие данных технологий по-прежнему остается актуальной темой для проведения научных исследований.

Применяющиеся в клинической практике локальные депо-системы доставки антибактериальных и антисептических препаратов в зону оперативного вмешательства, позволяют с различной степенью эффективности предотвращать развитие имплантат-ассоциированной инфекции (табл. 1). Однако до сих пор не существует единого мнения о том, какими свойствами должно обладать «идеальное» антибактериальное покрытие. Большинство исследователей склоняются к мнению, что именно сочетание высокоэффективного бактерицидного воздействия и устойчивости к прикреплению бактерий, хорошей биосовместимости, стимуляции остеоинтеграции и остеогенеза является многообещающим направлением для разработки новых антибактериальных покрытий имплантатов [10, 30, 31, 84].

На основании проведенного анализа мы сделали выводы, что основными требованиями к антибактериальным покрытиям являются:

- 1) биологическая совместимость покрытий и отсутствие у них локального раздражающего воздействия на ткани;
- 2) высокая биоцидная активность, поддерживаемая на протяжении длительного времени и в условиях колебаний термохимических показателей внутренней среды организма;
- 3) эффективное биоцидное действие в отношении к широкому спектру микроорганизмов (бактерий, вирусов, грибов);
- 4) сочетание у покрытий антиадгезивных и биоцидных свойств, оказывающих комплексное действие на возбудители имплантат-ассоциированной инфекции;
- 5) предотвращение развития резистентности бактерий к антибиотикам при использовании покрытий.

Анализ эффективности используемых в клинической практике антибактериальных покрытий

Состав	Техника нанесения покрытия	Антимикробная эффективность <i>in vitro</i> / <i>in vivo</i>	Источник
Покрyтия, содержащие антибактериальные препараты			
Цис-2-деценонвая кислота (C2DA) и амикацин	Покрyтие титана фосфатидилхолином с добавлением антибиотика	Уменьшение образования биопленки	[36]
Имплантаты титана, покрытые биоразлагаемой полимерно-липидной инкапсуляционной матрицей с добавлением доксициклина	Полимерно-липидная инкапсуляция	Подавление роста MRSA и MSSA стафилококков на имплантатах	[37]
Спицы Киршнера, покрытые полимолочной кислотой с добавлением фосфомицина	Химическое осаждение из раствора	Добавление фосфомицина в полимолочную кислоту не влияет на эффективность профилактики имплантат-ассоциированной инфекции	[39]
Диски из сплава титана с кальций-фосфатным покрытием, импрегнированные антибиотиками	Микродуговое оксидирование	Высокая биоцидная эффективность по отношению к возбудителям периимплантной инфекции	[40]
Мантия из полиметилметакрилата с добавлением антибиотиков на трансплантате из подвздошной кости	Нанесение мантии на поверхность имплантатов	Эффективная профилактика инфекции при лечении открытых переломов	[43]
Покрyтия, содержащие антисептические препараты			
Титановые диски, погруженные в растворы 6 различных антисептиков	Погружение дисков в растворы антисептиков	Высокая антибактериальная активность против <i>P. gingivalis</i> и <i>S. mutans</i>	[45]
Покрyтия на основе наночастиц металлов и их оксидов			
Легированный ионами Ag TiO ₂	Плазменное электролитическое окисление	Значительное снижение ($p < 0,05$) количества числа <i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> на поверхности имплантата	[53]
Микропористое покрытие имплантатов ионами Cu и TiO ₂	Микродуговое оксидирование	Эффективное ингибирование роста золотистого стафилококка, увеличение биосовместимости и оказание остеогенного эффекта <i>in vitro</i> и <i>in vivo</i>	[55]
Титановые имплантаты, покрытые TiO ₂ и наночастицами Se	Поверхностное зародышеобразование	Высокая биоцидная активность, антибактериальные, антионкогенные и остеогенные свойства на поверхности титанового импланта	[56]
Se, нанесенный на микропористые покрытия из TiO ₂ с Ca и P на титановые имплантаты	Микродуговое оксидирование	Эрадикация 97 % <i>E. coli</i> и <i>S. aureus</i> в исследовании <i>in vitro</i> на поверхности имплантатов, остеогенные и антионкогенные свойства	[57]
Покрyтие на основе гидроксиапатита с нанесением ZnO на поверхность имплантата	Химическое осаждение из раствора	Резкое сокращение численности <i>E. coli</i> и <i>S. aureus</i> после 4 час экспозиции	[58]
Покрyтия на основе наночастиц металлов и их оксидов			
Имплантаты, покрытые титаном кальция с добавлением йода	Метод термообработки поверхности имплантата, который контролируется включает от 0,7 % до 10,5 % йода в титан	Антибактериальная активность по отношению к MRSA, <i>E. coli</i> и <i>S. aureus</i> 99 %	[61]
Биоактивное покрытие на основе Si с частицами биоактивного стекла, легированного Sr	Золь-гель	Усиление антибактериального действия и придание имплантам остеогенных свойств	[62]
Покрyтие поверхности имплантатов TiO ₂ , легированного ионами Zn и Sr	Микродуговое оксидирование	Уменьшение численности колонии <i>S. aureus</i> на поверхности имплантатов	[63]
Антибактериальные неорганические покрытия с остеointегративными свойствами			
Композитное покрытие, содержащее Ag, F и гидроксиапатит	Золь-гель	Снижение численности <i>E. coli</i> на 96 % в течение 6 час. после имплантации	[65]
Покрyтие на основе гидроксиапатита, содержащее ионы Ag и F	Метод осаждения	Высокая антибактериальная активностью против <i>E. coli</i> и <i>S. aureus</i> и улучшение остеointегративных свойств	[66]

Таблица 1 (продолжение)

Анализ эффективности используемых в клинической практике антибактериальных покрытий

Состав	Техника нанесения покрытия	Антимикробная эффективность <i>in vitro</i> / <i>in vivo</i>	Источник
Покрывтия на основе антимикробных пептидов			
Покрывтие TiO ₂ синтезированным АМП LL-37	Фотокаталитический метод	Усиление антимикробных эффектов TiO ₂ без токсического влияния на организм	[70]
Титановые имплантаты с нанесенным АМП CATN-2	Метод послойной сборки полимеров и электрораспыления	Высокая антибактериальная активность против <i>E. coli</i> и <i>S. aureus</i> , биосовместимость с клетками организма	[71]
Покрывтия на основе полимеров			
Титан, покрытый плазмаполимеризованным диэтилфосфитом	Плазменная полимеризация	Высокая биоцидная активность <i>in vitro</i> по отношению к <i>S. aureus</i> и <i>C. albicans</i>	[73]
Сложноэфирные блок-полимеры с добавлением диэтил(гидроксиметил)фосфоната	Полимеризация с обратимым присоединением-фрагментацией с цепным переносом (RAFT)	Почти 100 % антибактериальная активность по отношению к <i>S. aureus</i> и <i>E. coli</i>	[74]
Покрывтие на основе хитозана с гидроксипропилтриметиламмонийхлоридом с различной степенью замещения четвертичного аммония	Полимеризация молекул хитозана и глицидилтриметиламмония	Значительное ингибирование образования и разрушение уже сформированных биопленок	[75]
Многофункциональные и интеллектуальные покрывтия			
pH-чувствительный антибактериальный полимер, содержащий катионные четвертичные аммониевые соли и карбоксильные группы	Метод послойной самосборки	Покрывтие обладает хорошими антибактериальными и противовоспалительными свойствами при имплантации и показывают хорошую остеointеграционную эффективность	[78]
Полимерные гели			
Полимерный гель на основе гиалуроновой кислоты, загруженный различными антибиотиками	Полимеризация молекул	Высвобождение более 70 % загруженного в гель антибактериального препарата из состава матрицы против 10 % из полиметилметакрилата в течении 28 дней	[80]
Покрывтия, полученные с помощью аддитивных технологий			
Покрывтие из 4 % гидрогеля среднемолекулярного хитозана с добавлением 1 % повидон-йода и дермальных фибробластов	Метод экструзионной 3D-биопечати	Высокая биосовместимость, атравматичность и адгезия покрывтия к раневой поверхности, эффективное антибактериальное и регенеративное воздействие	[82]
3D-печатный кальций-фосфатный скаффолд с добавлением рифампицина и ванкомицина	Метод экструзионной 3D-биопечати	Значительная эффективность в предотвращении имплантат ассоциированной инфекции в исследовании <i>in vivo</i>	[83]

Проведенный нами систематический обзор литературы позволяет судить о том, что на сегодняшний день при совершенствовании технологий разработки антимикробных покрывтий титановых имплантатов основное внимание должно уделяться полимерным покрывтиям, гидрогелям, многофункциональным интеллектуальным покрывтиям, а также аддитивным технологиям, позволяющим наносить покрывтие путем 3D-печати [10, 30, 31, 84, 85].

Что же касается возможности применения вышеупомянутых технологий при лечении огнестрельных переломов, то мы склоняемся к тому, что даже несмотря на высокие риски развития инфекционных осложнений при остеосинтезе данных переломов, предотвратить их развитие способно использование в ходе оперативного вмешательства полимерных, многофункциональных покрывтий, гидрогелей, а также оксидов таких металлов как серебро, йод и цинк.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день существует большое разнообразие покрывтий с антибактериальными свойствами, успешно применяющихся в клинической практике при лечении и профилактики имплантат-ассоциированной инфекции. Однако в мировой литературе по-прежнему отсутствуют исследовательские работы, посвященные изучению эффективности вышеперечисленных покрывтий при лечении огнестрельных переломов.

Поиск и разработка эффективных методов профилактики инфекционных осложнений при лечении раненых с огнестрельными переломами остается актуальной темой для проведения научных исследований.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Оприщенко А.А., Штутин А.А., Коктышев И.В. Тактика пластического закрытия огнестрельных раневых дефектов нижней конечности. *Университетская клиника*. 2019;(1(30)):48-53. doi: 10.26435/uc.v0i1(30).290.
- Оприщенко А.А., Штутин А.А. Клинико-эпидемиологическая характеристика открытых боевых повреждений нижних конечностей в условиях военного конфликта в Донбассе. *Университетская клиника*. 2018;(1(26)):20-25. doi: 10.26435/uc.v0i1(26).131.
- Король С.А., Матвейчук Б.В., Доманский А.Н. Объем хирургической помощи раненым с огнестрельными переломами костей предплечья на этапах медицинской эвакуации во время антитеррористической операции. *Травма*. 2016;17(6):76-80. doi: 10.22141/1608-1706.6.17.2016.88621.
- Овденко А.Г. Современные методы лечения гнойных осложнений в травматологии и ортопедии. *Церковь и медицина*. 2017;(1(17)):65-73.
- Хоминец В.В., Шукин А.В., Михайлов С.В., Фоос И.В. Особенности лечения раненых с огнестрельными переломами длинных костей конечностей методом последовательного внутреннего остеосинтеза. *Политравма*. 2017;(3):12-22.
- Lee C, Brodke DJ, Engel J, et al. Low-energy Gunshot-induced Tibia Fractures: What Proportion Develop Complications? *Clin Orthop Relat Res*. 2021;479(8):1793-1801. doi: 10.1097/CORR.0000000000001736.
- Крюков Е.В., Головкин К.П., Маркевич В.Ю. и др. Характеристика антибиотикорезистентности возбудителей инфекционных осложнений у раненых. *Вестник Российской Военно-медицинской академии*. 2023;25(2):193-202. doi: 10.17816/brmma207771.
- Брижань Л.К., Хоминец В.В., Шаповалов В.М. и др. Современное лечение раненых с огнестрельными ранениями конечностей. *Opinion Leader*. 2018;2(8(16)):48-56.
- Guda T, Stukel Shah JM, Lundquist BD, et al. An In Vivo Assessment of Different Mesenchymal Stromal Cell Tissue Types and Their Differentiation State on a Shape Memory Polymer Scaffold for Bone Regeneration. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*. 2024;112(12):e35516. doi: 10.1002/jbm.b.35516.
- Kozelskaya AI, Früh A, Rutkowski S, et al. Antibacterial double-layer calcium phosphate/chitosan composite coating on metal implants for tissue engineering. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2025;705(Part 2):135652. doi: 10.1016/j.colsurfa.2024.135652.
- Huang CY, Hsieh RW, Yen HT, et al. Short- versus long-course antibiotics in osteomyelitis: A systematic review and meta-analysis. *Int J Antimicrob Agents*. 2019;53(3):246-260. doi: 10.1016/j.ijantimicag.2019.01.007.
- Baumfeld D, Brito ASP, Torres MS, et al. Firearm-Related Fractures: Epidemiology and Infection Rate. *Rev Bras Ortop (Sao Paulo)*. 2020;55(5):625-628. doi: 10.1055/s-0040-1702960.
- Мурылев В., Куковенко Г., Елизаров П. и др. Перипротезная инфекция при эндопротезировании тазобедренного сустава. *Врач*. 2018;(3):17-22. doi: 10.29296/25877305-2018-03-04.
- Cooper C, Horner C, Barlow G, et al. A survey of practice and opinions on the use of topical antibiotics to prevent surgical site infection: more confusion than consensus. *J Antimicrob Chemother*. 2018;73(7):1978-1983. doi: 10.1093/jac/dky097.
- Amin Yavari S, Castenmiller SM, van Strijp JAG, Croes M. Combating Implant Infections: Shifting Focus from Bacteria to Host. *Adv Mater*. 2020;32(43):e2002962. doi: 10.1002/adma.202002962.
- Coppola GA, Onsea J, Moriarty TF, et al. An Improved 2-Aminoimidazole Based Anti-Biofilm Coating for Orthopedic Implants: Activity, Stability, and in vivo Biocompatibility. *Front Microbiol*. 2021;12:658521. doi: 10.3389/fmicb.2021.658521.
- Zheng Y, He L, Asiamah TK, Otto M. Colonization of medical devices by staphylococci. *Environ Microbiol*. 2018;20(9):3141-3153. doi: 10.1111/1462-2920.14129.
- Rupp M, Baertl S, Walter N, et al. Is There a Difference in Microbiological Epidemiology and Effective Empiric Antimicrobial Therapy Comparing Fracture-Related Infection and Periprosthetic Joint Infection? A Retrospective Comparative Study. *Antibiotics (Basel)*. 2021;10(8):921. doi: 10.3390/antibiotics10080921.
- Mirzaei R, Mohammadzadeh R, Alikhani MY, et al. The biofilm-associated bacterial infections unrelated to indwelling devices. *IUBMB Life*. 2020;72(7):1271-1285. doi: 10.1002/iub.2266.
- Бесчастнов В.В. Особенности лечения боевой травмы конечностей у военнослужащих блока НАТО в период вооруженных конфликтов на территории Ирака и Афганистана (обзор литературы). Раны и раневые инфекции. *Журнал имени проф. Б.М. Костюченко*. 2021;8(3):8-12. doi: 10.25199/2408-9613-2021-8-3-6-10.
- Kaspiris A, Vasiladis E, Pantazaka E, et al. Current Progress and Future Perspectives in Contact and Releasing-Type Antimicrobial Coatings of Orthopaedic Implants: A Systematic Review Analysis Emanated from In Vitro and In Vivo Models. *Infect Dis Rep*. 2024;16(2):298-316. doi: 10.3390/idr16020025.
- Ma T, Lyu J, Ma J, et al. Comparative analysis of pathogen distribution in patients with fracture-related infection and periprosthetic joint infection: a retrospective study. *BMC Musculoskelet Disord*. 2023;24(1):123. doi: 10.1186/s12891-023-06210-6.
- Dudareva M, Hotchen AJ, Ferguson J, et al. The microbiology of chronic osteomyelitis: Changes over ten years. *J Infect*. 2019;79(3):189-198. doi: 10.1016/j.jinf.2019.07.006.
- Vijayakumar B, Reddy Y, Suphala B, et al. Microbiological and antibiotic profile of osteomyelitis in tertiary care hospital. *Int Surg J*. 2021;8(3):910-914. doi: 10.18203/2349-2902.isj20210926.
- Ardehali B, Geoghegan L, Khajuria A, et al. Microbiological and functional outcomes after open extremity fractures sustained overseas: The experience of a UK level I trauma centre. *JPRAS Open*. 2017;15:36-45. doi: 10.1016/j.jpra.2017.09.003.
- Cerlioli M, Batailler C, Conrad A, et al. Pseudomonas aeruginosa Implant-Associated Bone and Joint Infections: Experience in a Regional Reference Center in France. *Front Med (Lausanne)*. 2020;7:513242. doi: 10.3389/fmed.2020.513242.
- Knabl L, Kuppelwieser B, Mayr A, et al. High percentage of microbial colonization of osteosynthesis material in clinically unremarkable patients. *Microbiologyopen*. 2019;8(3):e00658. doi: 10.1002/mbo3.658.
- Hanawa T. Titanium-Tissue Interface Reaction and Its Control With Surface Treatment. *Front Bioeng Biotechnol*. 2019;7:170. doi: 10.3389/fbioe.2019.00170.
- Wang Y, Zhang Y, Miron RJ. Health, Maintenance, and Recovery of Soft Tissues around Implants. *Clin Implant Dent Relat Res*. 2016;18(3):618-34. doi: 10.1111/cid.12343.
- Li B, Thebault P, Labat B, et al. Implants coating strategies for antibacterial treatment in fracture and defect models: A systematic review of animal studies. *J Orthop Translat*. 2024;45:24-35. doi: 10.1016/j.jot.2023.12.006.
- Bruellhoff K, Fiedler J, Möller M, et al. Surface coating strategies to prevent biofilm formation on implant surfaces. *Int J Artif Organs*. 2010;33(9):646-653. doi: 10.1177/039139881003300910.

32. Nichol T, Callaghan J, Townsend R, et al. The antimicrobial activity and biocompatibility of a controlled gentamicin-releasing single-layer sol-gel coating on hydroxyapatite-coated titanium. *Bone Joint J.* 2021;103-B(3):522-529. doi: 10.1302/0301-620X.103B3.BJJ-2020-0347.R1.
33. Hu Y, Wang Z, Ai J, Bu S, et al. Preparation of Coating on the Titanium Surface by Micro-Arc Oxidation to Improve Corrosion Resistance. *Coatings.* 2021;11(2):230. doi: 10.3390/coatings11020230.
34. Ständert V, Borchering K, Bormann N, et al. Antibiotic-loaded amphora-shaped pores on a titanium implant surface enhance osteointegration and prevent infections. *Bioact Mater.* 2021;6(8):2331-2345. doi: 10.1016/j.bioactmat.2021.01.012.
35. Akay S, Yagmur A. Recent Advances in Antibacterial Coatings to Combat Orthopedic Implant-Associated Infections. *Molecules.* 2024;29(5):1172. doi: 10.3390/molecules29051172.
36. Harris MA, Beenken KE, Smeltzer MS, et al. Phosphatidylcholine Coatings Deliver Local Antimicrobials and Reduce Infection in a Murine Model: A Preliminary Study. *Clin Orthop Relat Res.* 2017;475(7):1847-1853. doi: 10.1007/s11999-016-5211-7.
37. Metsemakers WJ, Emanuel N, Cohen O, et al. A doxycycline-loaded polymer-lipid encapsulation matrix coating for the prevention of implant-related osteomyelitis due to doxycycline-resistant methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*. *J Control Release.* 2015;209:47-56. doi: 10.1016/j.jconrel.2015.04.022.
38. Aguilera-Correa JJ, Garcia-Casas A, Mediero A, et al. A New Antibiotic-Loaded Sol-Gel Can Prevent Bacterial Prosthetic Joint Infection: From in vitro Studies to an in vivo Model. *Front Microbiol.* 2020;10:2935. doi: 10.3389/fmicb.2019.02935.
39. Gulcu A, Akman A, Demirkan AF, et al. Fosfomicin Addition to Poly(D,L-Lactide) Coating Does Not Affect Prophylaxis Efficacy in Rat Implant-Related Infection Model, But That of Gentamicin Does. *PLoS One.* 2016;11(11):e0165544. doi: 10.1371/journal.pone.0165544.
40. Попов А.В., Шастов А.Л., Шипицына И.В. и др. Бактерицидная активность экспериментальных образцов имплантатов из титанового сплава с кальций-фосфатным покрытием и антибактериальным компонентом в отношении грамотрицательных патогенов (экспериментальное исследование). *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова.* 2024;31(4):517-526. doi: 10.17816/vto630216.
41. Winkler H, Haiden P. Allograft Bone as Antibiotic Carrier. *J Bone Jt Infect.* 2017;2(1):52-62. doi: 10.7150/jbji.17466.
42. Иванов П.А., Соколов В.А. и др. Применение интрамедуллярных блокируемых штифтов с активным антибактериальным покрытием при лечении тяжелых открытых переломов и их осложнений. *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова.* 2009;16(1):13-18.
43. Zhou D, Yuan H, Han T, et al. Open Distal Femur Fractures Treated with Bone Cement Intramedullary Support Combined with Locked Plate Fixation. *Altern Ther Health Med.* 2024;30(9):72-77.
44. Меликова Р.Э., Дискаршвили А.В. Локальные антибактериальные депо-системы в лечении костно-суставной инфекции (обзор литературы). *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова.* 2024;31(4):677-695. doi: 10.17816/vto632032.
45. Lollobrigida M, Filardo S, Sessa R, et al. Antibacterial Activity and Impact of Different Antiseptics on Biofilm-Contaminated Implant Surfaces (2019). *Appl. Sci.* 2019;9(24):5467. doi: 10.3390/app9245467.
46. Raghunath A, Perumal E. Metal oxide nanoparticles as antimicrobial agents: a promise for the future. *Int J Antimicrob Agents.* 2017;49(2):137-152. doi: 10.1016/j.ijantimicag.2016.11.011.
47. Gold K, Slay B, Knackstedt M, Gaharwar AK. Antimicrobial Activity of Metal and Metal-Oxide Based Nanoparticles. *Adv Therap.* 2018;1(1):1700033. doi: 10.1002/adtp.201700033.
48. Zhang E, Zhao X, Hu J, et al. Antibacterial metals and alloys for potential biomedical implants. *Bioact Mater.* 2021;6(8):2569-2612. doi: 10.1016/j.bioactmat.2021.01.030.
49. Jia Z, Zhou W, Yan J, et al. Constructing Multilayer Silk Protein/Nanosilver Biofunctionalized Hierarchically Structured 3D Printed Ti6Al4V Scaffold for Repair of Infective Bone Defects. *ACS Biomater Sci Eng.* 2019;5(1):244-261. doi: 10.1021/acsbomaterials.8b00857.
50. Matai I, Sachdev A, Dubey P, et al. Antibacterial activity and mechanism of Ag-ZnO nanocomposite on *S. aureus* and GFP-expressing antibiotic resistant *E. coli*. *Colloids Surf B Biointerfaces.* 2014;115:359-367. doi: 10.1016/j.colsurfb.2013.12.005.
51. Yang Q, Chen L. Antibacterial surface coatings of fracture fixation implants. *Materials Express.* 2022;12(8):1013-1019. doi: 10.1166/mex.2022.2255.
52. Hao W, Xiong C, Yu Z, et al. Research Progress on Antibacterial Coatings for Preventing Implant-Related Infection in Fractures: A Literature Review. *Coatings.* 2022;12(12):1921. doi: 10.3390/coatings12121921.
53. Tukkar M, Cools P, Nikiforov A, et al. Antibacterial activity of a porous silver doped TiO2 coating on titanium substrates synthesized by plasma electrolytic oxidation. *Appl Surf Sci.* 2019;500:144235. doi: 10.1016/j.apsusc.2019.144235.
54. Zhu WQ, Shao SY, Xu LN, et al. Enhanced corrosion resistance of zinc-containing nanowires-modified titanium surface under exposure to oxidizing microenvironment. *J Nanobiotechnology.* 2019;17(1):55. doi: 10.1186/s12951-019-0488-9.
55. Wang LJ, Ni XH, Zhang F, et al. Osteoblast Response to Copper-Doped Microporous Coatings on Titanium for Improved Bone Integration. *Nanoscale Res Lett.* 2021;16(1):146. doi: 10.1186/s11671-021-03602-2.
56. Tran PA, O'Brien-Simpson N, Palmer JA, et al. Selenium nanoparticles as anti-infective implant coatings for trauma orthopedics against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* and *epidermidis*: in vitro and in vivo assessment. *Int J Nanomedicine.* 2019;14:4613-4624. doi: 10.2147/IJN.S197737.
57. Zhou J, Wang X. The osteogenic, anti-oncogenic and antibacterial activities of selenium-doped titanium dioxide coatings on titanium. *Surf Coat Technol.* 2020;403:126408. doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.126408.
58. Ohtsu N, Yuko K, Ohtsuki T. Antibacterial effect of zinc oxide/hydroxyapatite coatings prepared by chemical solution deposition. *Appl Surf Sci.* 2017;445:596-600. doi: 10.1016/j.apsusc.2017.09.101.
59. Shirai T, Tsuchiya H, Terauchi R, et al. A retrospective study of antibacterial iodine-coated implants for postoperative infection. *Medicine (Baltimore).* 2019;98(45):e17932. doi: 10.1097/MD.00000000000017932.
60. Inoue D, Kabata T, Kajino Y, et al. Iodine-supported titanium implants have good antimicrobial attachment effects. *J Orthop Sci.* 2019;24(3):548-551. doi: 10.1016/j.jos.2018.10.010.
61. Yamaguchi S, Le PTM, Shintani SA, et al. Iodine-Loaded Calcium Titanate for Bone Repair with Sustainable Antibacterial Activity Prepared by Solution and Heat Treatment. *Nanomaterials (Basel).* 2021;11(9):2199. doi: 10.3390/nano11092199.
62. Katunar MR, Pastore JJ, Cisilino AP, et al. Early osseointegration of strontium-doped coatings on titanium implants in an osteoporotic rat model. *Surf Coat Technol.* 2022;433(SUPPL.4):128159. doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.128159.
63. Zhao Q, Yi L, Jiang L, et al. Surface functionalization of titanium with zinc/strontium-doped titanium dioxide microporous coating via microarc oxidation. *Nanomedicine.* 2019;16:149-161. doi: 10.1016/j.nano.2018.12.006.
64. Arcos D, Vallet-Regí M. Substituted hydroxyapatite coatings of bone implants. *J Mater Chem B.* 2020;8(9):1781-1800. doi: 10.1039/c9tb02710f.
65. Batebi K, Khazaei BA, Afshar A. Characterization of sol-gel derived silver/fluor-hydroxyapatite composite coatings on titanium substrate. *Surf Coat Technol.* 2013;252:522-528. doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.08.021.
66. Turkoz M, Atilla AO, Evis Z. Silver and fluoride doped hydroxyapatites: Investigation by microstructure, mechanical and antibacterial properties. *Ceram Int.* 2013;39(8):8925-8931. doi: 10.1016/j.ceramint.2013.04.088.
67. Bohara S, Suthakorn J. Surface coating of orthopedic implant to enhance the osseointegration and reduction of bacterial colonization: a review. *Biomater Res.* 2022;26(1):26. doi: 10.1186/s40824-022-00269-3.
68. Pogorielov M, Husak E, Solodivnik A, Zhdanov S. Magnesium-based biodegradable alloys: Degradation, application, and alloying elements. *Interv Med Appl Sci.* 2017;9(1):27-38. doi: 10.1556/1646.9.2017.1.04.

69. Drayton M, Kizhakkedathu JN, Straus SK. Towards Robust Delivery of Antimicrobial Peptides to Combat Bacterial Resistance. *Molecules*. 2020;25(13):3048. doi: 10.3390/molecules25133048.
70. Caselli L, Parra-Ortiz E, Micciulla S, et al. Boosting Membrane Interactions and Antimicrobial Effects of Photocatalytic Titanium Dioxide Nanoparticles by Peptide Coating. *Small*. 2024;20(30):e2309496. doi: 10.1002/sml.202309496.
71. Keikhosravani P, Jahanmard F, Bollen T, et al. (2023). Antibacterial CATH-2 Peptide Coating to Prevent Bone Implant-Related Infection. *Adv Mater Technol*. 2023;8(18): 2300500. doi: 10.1002/admt.202300500.
72. Ozdil D, & Aydin HM. Polymers for Medical and Tissue Engineering Applications. *J Chem Technol Biotechnol*. 2014;89(12):1793-1810. doi: 10.1002/jctb.4505.
73. Kaleli-Can G, Ozguzar HF, Kahriman S, et al. Improvement in antimicrobial properties of titanium by diethyl phosphite plasma-based surface modification. *Mater Today Commun*. 2020;25:101565. doi: 10.1016/j.mtcomm.2020.10156.
74. Peng J, Liu P, Peng W, et al. Poly(hexamethylene biguanide) (PHMB) as high-efficiency antibacterial coating for titanium substrates. *J Hazard Mater*. 2021;411:125110. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125110.
75. Peng ZX, Tu B, Shen Y, et al. Quaternized chitosan inhibits icaA transcription and biofilm formation by Staphylococcus on a titanium surface. *Antimicrob Agents Chemother*. 2011;55(2):860-866. doi: 10.1128/AAC.01005-10.
76. Li B, Thebault P, Labat B, et al. Implants coating strategies for antibacterial treatment in fracture and defect models: A systematic review of animal studies. *J Orthop Translat*. 2024;45:24-35. doi: 10.1016/j.jot.2023.12.006.
77. Zhang Y, Hu K, Xing X, et al. Smart Titanium Coating Composed of Antibiotic Conjugated Peptides as an Infection-Responsive Antibacterial Agent. *Macromol Biosci*. 2021;21(1):e2000194. doi: 10.1002/mabi.202000194.
78. Zhang F, Hu Q, Wei Y, Meng W et al. Surface modification of titanium implants by pH-Responsive coating designed for Self-Adaptive antibacterial and promoted osseointegration. *Chem Eng J*. 2022;435(Part 2):134802, doi: 10.1016/j.cej.2022.134802.
79. Pressato D, Battista A, Govoni M, et al. The Intraoperative Use of Defensive Antibacterial Coating (DAC®) in the Form of a Gel to Prevent Peri-Implant Infections in Orthopaedic Surgery: A Clinical Narrative Review. *Materials (Basel)*. 2023;16(15):5304. doi: 10.3390/ma16155304.
80. 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.
81. Koptuyug A, Rännar LE, Bäckström M et al. Additive manufacturing technology applications targeting practical surgery. *IJLSR*. 2013;3(1):15-24. doi: 10.5963/LSMR0301003.
82. Головкин К.П., Юдин В.Е., Овчинников Д.В. и др. Антибактериальное раневое покрытие на основе хитозана и повидона, полученное методом 3D-печати. *Известия Российской военно-медицинской академии*. 2024;43(1):23-34. doi: 10.17816/rmmar626501.
83. Inzana JA, Trombetta RP, Schwarz EM, et al. 3D printed bioceramics for dual antibiotic delivery to treat implant-associated bone infection. *Eur Cell Mater*. 2015;30:232-247. doi: 10.22203/ecm.v030a16.
84. Hameed S, Sharif S, Ovais M, Xiong H. Emerging trends and future challenges of advanced 2D nanomaterials for combating bacterial resistance. *Bioact Mater*. 2024;38:225-257. doi: 10.1016/j.bioactmat.2024.04.033.
85. He X, Guo C, Liu X, et al. Progress in antibacterial coatings of titanium implants surfaces. *Sheng Wu Yi Xue Gong Cheng Xue Za Zhi*. 2024;41(1):191-198. Chinese. doi: 10.7507/1001-5515.202209051.

Статья поступила 09.04.2025; одобрена после рецензирования 23.04.2025; принята к публикации 05.06.2025.

The article was submitted 09.04.2025; approved after reviewing 23.04.2025; accepted for publication 05.06.2025.

Информация об авторах:

Денис Владимирович Давыдов — доктор медицинских наук, профессор, dvdavydov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5449-9394>;

Леонид Карлович Брижань — доктор медицинских наук, профессор, Brizhan.leonid@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0391-8912>;

Артур Асланович Керимов — кандидат медицинских наук, kerartur@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5783-6958>;

Игорь Владимирович Хоминетс — кандидат медицинских наук, khominets24_91@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0964-653X>;

Казбек Керимович Бекшоков — ординатор, kazbek.bekshokov.99@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2667-341X>;

Андрей Анатольевич Грицюк — доктор медицинских наук, профессор, drgaamma@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4202-4468>;

Евгений А. Кукушко — doctruma87@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2941-9601>;

Владимир Дмитриевич Беседин — BesedinVD@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9087-1421>.

Information about the authors:

Denis V. Davydov — Doctor of Medical Sciences, Professor, dvdavydov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5449-9394>;

Leonid K. Brizhan — Doctor of Medical Sciences, Professor, Brizhan.leonid@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0391-8912>;

Artur A. Kerimov — Candidate of Medical Sciences, kerartur@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5783-6958>;

Igor V. Khominets — Candidate of Medical Sciences, khominets24_91@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0964-653X>;

Kazbek K. Bekshokov — Resident of the Department, kazbek.bekshokov.99@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2667-341X>;

Andrey A. Gritsyuk — Doctor of Medical Sciences, Professor, drgaamma@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4202-4468>;

Evgeniy A. Kukushko — doctruma87@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2941-9601>;

Vladimir D. Besedin — BesedinVD@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9087-1421>.

Вклад авторов:

Все авторы внесли значимый вклад в проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

Обзорная статья

УДК 616.728.3-089.843-77-089.168)

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2025-31-4-537-545>

Специфика ротационного планирования и интраоперационного размещения бедренного компонента эндопротеза коленного сустава с применением навигационных устройств

Р.А. Зубавленко[✉], Д.А. Марков, В.В. Островский

Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского, Саратов, Россия

Автор, ответственный за переписку: Роман Андреевич Зубавленко, sarniiton@yandex.ru**Аннотация**

Введение. Оптимальное ротационное выравнивание бедренного компонента эндопротеза при использовании навигационных устройств имеет большое значение для тотальной артропластики коленного сустава. Методы измеряемой резекции и балансировки зазора представляют собой доступные интраоперационные техники, осуществляемые с помощью навигационных устройств для установки ротации бедренной кости. Однако каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки. Данные аспекты способствуют активному развитию разработки навигационного инструментария для эндопротезирования крупных суставов и его клинической апробации.

Цель работы — оценка эффективности определения ротационного позиционирования бедренного компонента эндопротеза коленного сустава с применением механических и роботизированных навигационных устройств как основы процессинга принятия интраоперационных решений хирургами.

Материалы и методы. Процедуры планирования, выполнения и отчетности настоящего систематического обзора проведены в соответствии с установленными руководящими принципами PRISMA. Изначально выявлено 366 публикаций, соответствовавших основному направлению данного исследования. После исключения дублирующих публикаций для анализа отобрано 158 источников. Критериям отбора соответствовали 11 статей. При оценке учтены выходные данные статей, типы используемых механических или роботизированных навигационных устройств, количество наблюдений, процент осложнений, особенности пред-, интра- и послеоперационного методов определения ротации бедренного компонента эндопротеза коленного сустава в рассмотренных когортах. В общей сложности проанализированы результаты 1198 тотальных артропластик коленного сустава, представленные в анализируемых литературных источниках.

Результаты и обсуждение. В большинстве научных работ, посвященных послеоперационным осложнениям при использовании навигационных устройств, информация о них была неполной, либо данные пациенты были исключены из исследования. Частота возникновения осложнений составила в среднем 2 %.

Заключение. При применении навигационных устройств предоперационное планирование ротации бедренного компонента зачастую не осуществляют, а в ходе хирургического вмешательства применяют те же методики и ориентиры, что и при традиционной технике. Послеоперационный мониторинг ротационного позиционирования эндопротеза коленного сустава осуществляют исключительно при выявлении осложнений.

Ключевые слова: тотальная артропластика коленного сустава, механические и роботизированные навигационные устройства, мальротация бедренного компонента, пателлофemorальный болевой синдром, ротация эндопротеза коленного сустава, предоперационное планирование, интраоперационные методы, послеоперационная оценка ротации

Для цитирования: Зубавленко Р.А., Марков Д.А., Островский В.В. Специфика ротационного планирования и интраоперационного размещения бедренного компонента эндопротеза коленного сустава с применением навигационных устройств. *Гений ортопедии*. 2025;31(4):537-545. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-537-545.



Specifics of rotational planning and intraoperative alignment of the femoral component in the knee implant with navigation devices (systematic review)

R.A. Zubavlenko✉, D.A. Markov, V.V. Ostrovskij

Razumovsky Saratov State Medical University, Saratov, Russian Federation

Corresponding author: Roman A. Zubavlenko, sarniiton@yandex.ru

Abstract

Introduction The optimal rotational alignment of the femoral component in a knee implant with navigation devices is important for total knee arthroplasty. Measured resection and gap technique are available intraoperative methods to determine the rotation of femur with navigation devices, but each of these methods has its advantages and disadvantages. These aspects have contributed to the development and clinical validation of navigation tools for large joint arthroplasty.

The **objective** of this study was to evaluate the efficacy of determining the rotational alignment of the femoral component in a knee implant with mechanical and robotic navigation devices as a basis for processing intraoperative decision making by surgeons.

Material and methods The planning, execution and reporting of this systematic review were conducted in accordance with the established Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses (PRISMA) guidelines. Initially we identified 366 studies that corresponded to the main focus of this research, and 158 studies were selected for analysis after the duplicates had been excluded. Ultimately, only 11 studies fully met the selection criteria. The evaluation included the article data, the type of mechanical or robotic navigation device, the number of cases, the complication rate, and the specifics of the preoperative, intraoperative, and postoperative methods used for determining the rotation of the femoral component in a knee implant in the cohorts reviewed. A total of 1,198 total knee arthroplasties reported in those studies were analyzed.

Results and discussion It should be noted that in most of the scientific papers on the postoperative complications of surgeries that involved various navigation devices, the information about them was incomplete or the patients with complications were excluded from the study. In general, the incidence of complications averaged 2 %.

Conclusions When the navigation devices are used, the preoperative planning of the femoral component alignment frequently remains unperformed, and techniques and reference points used in surgeries are the same as in the traditional technique. The postoperative monitoring of rotational alignment of the knee implant is performed exclusively when complications are detected.

Keywords: total knee arthroplasty, mechanical and robotic navigation devices, femoral component malrotation, patellofemoral pain, knee endoprosthesis rotation, preoperative planning, intraoperative techniques, postoperative rotation assessment

For citation: Zubavlenko RA, Markov DA, Ostrovskij VV. Specifics of rotational planning and intraoperative alignment of the femoral component in the knee implant with navigation devices (systematic review). *Genij Ortopedii*. 2025;31(4):537-545. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-4-537-545.

ВВЕДЕНИЕ

Тотальная артропластика коленного сустава является одним из наиболее эффективных методов лечения прогрессирующего остеоартрита коленных суставов (терминальных стадий) и обеспечивает восстановление опороспособности нижних конечностей. За последние два десятилетия данная методика претерпела значительные улучшения и получила развитие благодаря совершенствованию хирургических тактик, разработке сопровождающего инструментария и материалов, применяемых для изготовления компонентов эндопротезов. Несмотря на это, у 20 % пациентов после операции выявляют неудовлетворительные результаты [1, 2].

Согласно выводам аналитиков, точное ротационное позиционирование компонентов эндопротеза, а также выравнивание оси конечности представляют собой ключевые аспекты, определяющие степень удовлетворённости пациента и достижение необходимых функциональных результатов после проведения тотальной артропластики коленного сустава [3–5]. Вместе с тем, следует отметить, что задача достижения корректного расположения компонентов эндопротеза является достаточно сложной для хирургов, поскольку визуальная и тактильная оценка анатомических структур зачастую затруднена, особенно при наличии тяжёлых деформаций и посттравматических изменений.

Известно, что мальротация бедренного компонента эндопротеза значительно влияет на кинематику сустава, что приводит к нарушению трекинга, возникновению подвывихов и вывихов надколенника, формированию нестабильности при сгибании, развитию артрофиброза и ускоренному износу компонентов эндопротеза коленного сустава [6, 7]. Данные аспекты способствуют активной разработке навигационного инструментария для эндопротезирования крупных суставов и его клинической апробации.

Многие авторы отмечают, что использование механических и роботизированных навигаций при тотальной артропластике коленного сустава позволяет достичь более точной резекции костной ткани и оптимального расположения имплантата, а также обеспечивает сбалансированные зазоры разгибания и сгибания (ротация бедренного компонента), максимально соответствующие анатомии скелета человека и позволяющие сохранить естественный баланс связок [3, 8, 9]. Это снижает вероятность возникновения чрезмерного напряжения и износа компонентов эндопротеза, а также развития болевых ощущений в переднем отделе коленного сустава, что в большей степени связано с неправильной ротацией эндопротеза. При использовании механических и роботизированных навигационных инструментов предоперационное планирование начинается с исследования оперируемого сустава и всей нижней конечности пациента с помощью компьютерной томографии (КТ), которую проводят наряду со стандартной лучевой диагностикой. Применение данной методологии в сочетании с рентгенографией со сшивкой в прямой, боковой и аксиальной проекциях позволяет определить размеры и качество кости, анатомическую и механическую оси нижней конечности, ротацию бедренной кости и выявить любые возможные деформации. Интраоперационно хирурги используют механические устройства (натяжители) для установки бедренного компонента при первичном и ревизионном эндопротезировании коленного сустава, основанные на методе балансировки зазора (англ.: gap technique). При применении роботизированных компьютерных навигационных систем ротационное позиционирование бедренного компонента эндопротеза основано на методе измеряемой резекции (англ.: measured resection), в том числе ориентированной по уровню антегорсии проксимального отдела (шейки) бедренной кости [10, 11]. Представленные методологические подходы обладают значительным теоретическим потенциалом для улучшения клинических исходов. Тем не менее, продолжаются активные дебаты относительно эффективности механических и роботизированных навигационных систем по сравнению с визуально-мануальными техниками. Исследователи не сообщают о статистически значимой разнице в послеоперационных результатах, несмотря на благоприятные рентгенологические исследования [7]. Поэтому мы попытались подобрать соответствующие статьи и провести метаанализ возможностей навигационных устройств в контексте корректного ротационного позиционирования эндопротеза при тотальной артропластике коленного сустава.

Цель работы — оценка эффективности определения ротационного позиционирования бедренного компонента эндопротеза коленного сустава с применением механических и роботизированных навигационных устройств как основы процессинга принятия интраоперационных решений хирургами.

Основной гипотезой данного исследования является обоснование доказательной базы анатомически и клинически превосходящих результатов механических и роботизированных навигационных устройств по сравнению с визуально-мануальными техниками, применяемыми в хирургической ортопедии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Систематический обзор доступной литературы выполнен с использованием в нескольких комбинациях синонимичных или родственных выражений для терминов: ротация бедренного компонента, роботизированные системы эндопротезирования, механические навигационные устройства при то-

тальной артропластике, позиционирование компонентов эндопротеза коленного сустава, тотальная артропластика коленного сустава, пателлофemorальная боль после эндопротезирования. Поиск проведен в базах данных PubMed, Google Scholar, Web of Science, CyberLeninka и eLibrary с 10 по 31 марта 2025 г. без ограничений по времени. Рассмотрены рецензируемые журналы, учтены представленные результаты рандомизированных контролируемых испытаний, проспективных испытаний и ретроспективных исследований. Поиск ограничен русскоязычными и англоязычными источниками.

Один из авторов осуществил изучение заголовков и аннотаций информационных источников, представленных в перечисленных реферативных базах с последующей полнотекстовой выборкой материалов по направлениям проводимого поиска. Все ссылки на использованные литературные источники впоследствии были также детально изучены как потенциально информативные по исследуемой отрасли знаний. В случае выявления в доступной литературе признаков противоречивых данных, консенсус достигался с привлечением старших авторов.

Статьи считали соответствующими целям и задачам проводимого исследования при наличии следующих обязательных формальных признаков:

- источник включал детальное описание механических и/или роботизированных навигационных устройств, применяемых при первичной или ревизионной тотальной артропластике коленного сустава;
- в источнике отражены возможности или пред-, или интра-, или послеоперационной оценки ротации бедренного компонента эндопротеза при использовании навигационных устройств;
- в источнике проведена оценка осложнений после применения навигационных устройств.

Помимо языковых ограничений из данного аналитического исследования исключены статьи обзорного характера без исследовательской части, технические заметки, не содержащие описания пациентов, результаты экспериментальных работ, выполненных на животных, или испытания *in vitro*.

Планирование, выполнение и отчетность настоящего систематического обзора выполнено в соответствии с установленными руководящими принципами PRISMA (англ.: Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses), рекомендованными для корректного проведения систематических обзоров и метаанализов данных.

На рис. 1 представлена блок-схема процесса отбора источников информации. Изначально выявлено 366 публикаций, релевантных основному вектору настоящего исследования. После удаления дублирующих публикаций к рассмотрению приняли 158 источников. Из данной совокупности источников литературы осуществили извлечение 85 полнотекстовых работ в соответствии с названием и резюме. После детального ознакомления с текстами 74 статьи были исключены из аналитического обзора на основе несоответствия заявленным критериям включения и исключения. В систематический обзор включены 11 статей, соответствующие критериям отбора.

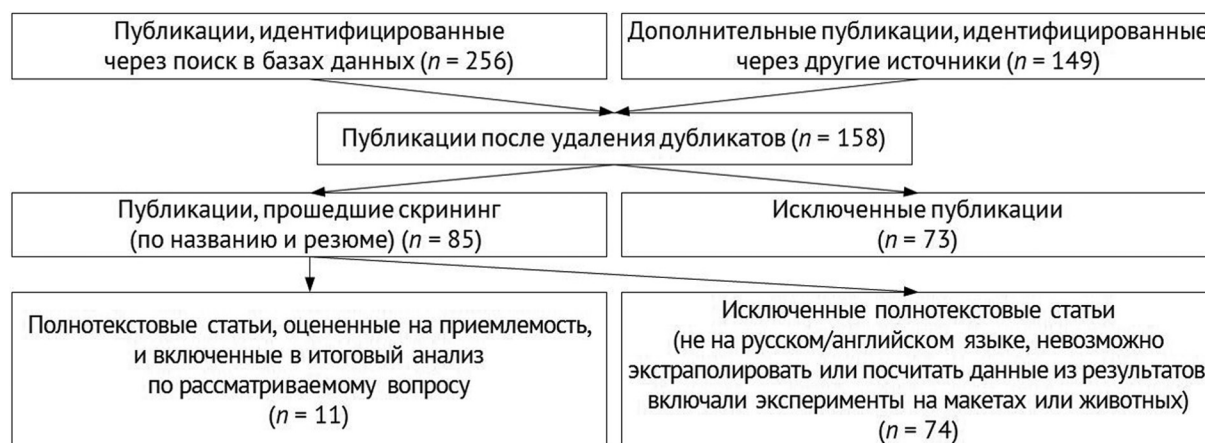


Рис. 1. Методология отбора литературных источников по PRISMA

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Суммарно проанализированы результаты 1198 операций тотальной артропластики коленного сустава, представленных в литературных источниках. Необходимо подчеркнуть, что в большинстве научных работ информация о возникших послеоперационных осложнениях оказалась недостаточной, либо пациенты с осложнениями были исключены из исследований. В среднем же частота возникновения осложнений составила 2 %.

Согласно представленным литературным данным, необходимость повторного эндопротезирования коленного сустава зачастую обусловлена болью в переднем отделе. Следует отметить, что именно ротационное выравнивание бедренного компонента эндопротеза оказывает непосредственное воздействие на надколенно-бедренный сустав и, как следствие, на окончательные клинические результаты [12, 13]. Ротация бедренного компонента должна быть тщательно отрегулирована с такой же точностью, как и выравнивание компонента во фронтальной и сагиттальной плоскостях. Естественным также представляется стремление к правильному центрированию надколенника в контексте эндопротезирования. Внедрение новых механических и роботизированных навигационных устройств делает это основополагающим принципом, поскольку процесс центрирования определяет ротацию, придаваемую бедренному компоненту [14, 15].

С целью обеспечения баланса зазоров и определения величины ротации бедренного компонента эндопротеза в роботизированной хирургии применяют два основных метода: *measured resection* и *gap technique*. Предоперационного планирования с использованием механических устройств типа FUZION практически не проводят, т.к. оценка ротационного позиционирования бедренного компонента основана на *gap technique* [16]. A. Bensa et al. провели рандомизированное контрольное исследование, посвященное сравнению методов *measured resection* и *gap technique* при тотальной артропластике коленного сустава с применением датчика силы непосредственно перед установкой эндопротеза. Результаты показали, что использование *gap technique* привело к большей дисперсии ротации бедренного компонента за счет увеличения толщины задней резекции бедренной кости (что расширяет пространство для сгибания) [17].

Как правило, предоперационное планирование при эндопротезировании коленного сустава с применением роботизированных навигационных устройств осуществляют на основе данных компьютерной томографии (КТ), для чего в некоторых случаях требуется использование не всегда доступного специализированного программного обеспечения. В отличие от данных способов при применении механических навигационных устройств и визуально-мануальной техники предоперационная оценка особенностей топографии суставных компонентов ограничивается анализом рентгенограмм в прямой, боковой и иногда аксиальной проекциях, что не всегда является достаточно информативным. Невзирая на то, что традиционная артропластика коленного сустава доказала свою эффективность и доступность, а также на постоянные инновации в области протезирования и хирургических инструментов, значительное число пациентов остаются неудовлетворенными результатами данного вида оперативного пособия. Причины этого явления могут быть как хорошо известными, так и неопределенными, и сложно выявляемыми. Стремясь к достижению конечной цели, — созданию надёжного, безболезненного и долговечного сустава, хирург-ортопед все чаще опирается на роботизированные навигационные системы, которые позволяют ему измерить параметры коленного сустава, выбрать эндопротез и реализовать хирургический план путем использования стандартизированных подходов [18–20]. Активное развитие роботизированной артропластики обусловлено хорошими результатами, базирующимися на строгих стандартах позиционирования компонентов эндопротеза, корректного восстановления оси нижней конечности и долгосрочной послеоперационной стабильности сустава [21–24]. Данное направление разработано с целью устранения потенциальных неточностей в позиционировании и выравнивании имплантата, тем самым снижая количество неудовлетворенных пациентов и способствуя повышению качества их жизни.

В ходе многочисленных исследований установлено, что навигационные системы способствуют уменьшению погрешностей в позиционировании компонентов, особенно в сагиттальной плоскости. Однако остаётся открытым вопрос о том, смогут ли новые технологии, о которых говорилось выше, спрогнозировать и воспроизвести интраоперационно ротацию компонентов эндопротеза, улучшить восстановление функций после операции и повысить клиническую эффективность применяемых хирургических подходов [21, 22, 25].

Оценивая суммарные результаты эффективности применения механических и роботизированных навигационных систем при эндопротезировании крупных суставов, можно определить особую значимость выравнивания с их помощью осей нижних конечностей, что обеспечивает точность позиционирования имплантата. На сегодняшний день не вызывает сомнений, что поддержание механической оси в безопасном диапазоне, ограниченном $\pm 3^\circ$, может способствовать существенному повышению выживаемости имплантата. Данный параметр является определяющим фактором, влияющим на выживаемость эндопротеза. В случае отклонения механической оси от допустимых значений существенно повышается риск вывиха и нестабильности эндопротеза, что может привести к нарушению функционального восстановления и увеличению частоты ревизий [26].

Внешнее вращение на 3° от задних мыщелков бедренной кости считается приемлемым и общепринятым в методе измеряемой резекции. Однако взаимосвязь между точным позиционированием имплантата и клиническими результатами остаётся предметом дискуссии [26]. Многие систематические

обзоры показывают, что визуально-тактильная техника и навигационные системы не демонстрируют значительной разницы при достижении планируемых клинических результатов, что согласуется с нашими собственными результатами [27]. Таким образом, возникает вопрос, является ли механическое выравнивание на 180° и наружная ротация бедренного компонента на 3° универсальными «нормальными» параметрами, и должно ли это быть рутинно целью тотальной артропластики для всех пациентов. На основе исследования 250 здоровых пациентов определили, что угол варусной деформации 1° у женщин и 2° у мужчин является нормой [28]. Кроме того, эти исследования свидетельствуют о значительной вариативности показателей естественной анатомии коленного сустава среди 4 884 пациентов, прошедших КТ, при этом только 5 % общей популяции демонстрируют естественное нейтральное выравнивание [29]. У большинства пациентов, перенесших тотальную артропластику, сустав может быть вынужденно смещён в неестественное положение, что потенциально способно привести к негативным клиническим результатам, несмотря на достигнутое нейтральное выравнивание. Учитывая изменчивость коронарного выравнивания коленного сустава у пациентов без остеоартрита и широкую вариативность всех параметров позиционирования, становится очевидной необходимость более точного и индивидуального подхода при эндопротезировании коленного сустава [30].

Как следует из представленных литературных данных, настройка и регистрация роботизированных или механических навигационных систем при тотальной артропластике уникальны, требуют детальной проработки и приводят к увеличению общего времени операции [31]. Данное исследование показало, что при использовании механической или роботизированной навигации на завершение интеграции эндопротеза затрачивается больший временной промежуток, чем в группе визуально-тактильной техники, что может быть обусловлено сложностью выполнения отдельных этапов, неопытностью оператора и более длительным обучением данной методологии. Значительная доля времени в ходе операции отводится на выполнение таких задач, как настройка, фиксация бедренной и большеберцовой костей, а также их выравнивание [32].

Следует отметить, что увеличение продолжительности хирургического вмешательства может привести к повышению вероятности возникновения инфекционных осложнений, что, в свою очередь, способно вызвать необратимые изменения, как в мягких тканях, так и в костных структурах сустава [33].

Выходные данные статей, виды используемых механических или роботизированных навигационных устройств, количество наблюдений, число осложнений (в %), особенности пред-, интра- и послеоперационного способов определения ротации бедренного компонента эндопротеза коленного сустава рассмотренных когорт отражены в табл. 1.

Таблица 1

Количество пациентов, навигационное устройство, способы пред-, интра- и послеоперационного определения ротационного положения бедренного компонента эндопротеза коленного сустава

Автор(-ы), номер ссылки	Используемое механическое или роботизированное навигационное устройство	Общее количество наблюдений, n	Количество осложнений, %	Предоперационное планирование ротации эндопротеза	Интраоперационный способ определения ротации эндопротеза	Послеоперационный контроль ротации эндопротеза
Петухов А.И. и др. [34]	Medtronic, Stryker и Brain LAB	120	2,5 %	Не проводили	Measured resection	Не проводили
Blyth M.J. et al. [35]	Electromagnetic navigation systems	101	Не определено	КТ	Measured resection	КТ
Matassi F. et al. [36]	i-ASSIST accelerometer-based navigation system	18	Не определено	КТ или MPT	Combined technique	КТ
Nam C.H. et al. [37]	MAKO (Stryker, MAKO (Stryker, Mahwah, NJ))	154	Не определено	КТ	Measured resection	Не проводили
Лычагин А.В. и др. [38]	T-Solution One® (THINK Surgical Inc.)	29	Не определено	КТ	Measured resection	Не проводили
Айрапетов Г.А. и др. [39]	Робот ассистент	20	Не определено	КТ	Measured resection	Не проводили
Лычагин А.В. и др. [40]	T-Solution One® (THINK Surgical, Inc.)	47	Не определено	КТ	Measured resection	Не проводили
Chandrashekar P. et al. [41]	CUVIS Joint™	500	Не определено	КТ, предоперационный планировщик J planner™	Measured resection	КТ
Blum C.L. et al. [42]	OMNIBotics и ультраконгруэнтная система OMNI Apex (Corin USA, Raynham, MA)	32	1,9 %	КТ	Measured resection	КТ
Vanlommel L. et al. [43]	ROSA Total Knee System	90	Не определено	КТ	Measured resection	КТ
Masiag B.M. et al. [44]	Динамический натяжитель FUZION	87	Не определено	Не проводили	Gap technique	КТ

Принимая во внимание ключевые аспекты, результаты следует трактовать с осторожностью и нельзя их экстраполировать на все системы. В условиях прогресса в области механических и роботизированных навигационных систем возникает необходимость в проведении новых исследований, направленных на оценку последних достижений в этой сфере, предполагающих долгосрочное наблюдение, которые позволят сделать более точные выводы относительно результатов и преимуществ.

Таким образом, тотальная артропластика коленного сустава, выполненная с применением механических и роботизированных навигационных устройств, продемонстрировала более эффективное восстановление механической оси нижней конечности по сравнению с группой пациентов, прооперированных с использованием визуально-тактильной техники. Однако ротационное положение компонентов эндопротеза в пред- и послеоперационном периодах очень часто не было оценено, а время операции при использовании стандартной техники было короче на 30–40 минут.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При использовании механических и роботизированных навигационных устройств зачастую не осуществляют предоперационное планирование ротации бедренного компонента, а в ходе хирургического вмешательства применяют те же методики, что и при традиционной технике тотальной артропластики коленного сустава.

Послеоперационный мониторинг ротационного позиционирования эндопротеза коленного сустава осуществляют исключительно при обнаружении осложнений. В основном в представленных публикациях внимание уделяют оценке механического выравнивания и клиническим результатам, выраженным в шкале WOMAC.

Тотальное эндопротезирование, выполняемое в соответствии с традиционной методикой, предполагает более длительный период наблюдения и демонстрирует сопоставимые результаты в отношении объема движений. Для полноценного анализа долгосрочных преимуществ и экономической целесообразности применения механических и роботизированных навигационных систем необходимы дополнительные исследования.

Конфликт интересов. Не заявлен.

Источник финансирования. Исследование выполнено в рамках государственного задания «Разработка хирургического навигационного инструментария для ротационного позиционирования бедренного компонента эндопротеза коленного сустава» ФГБОУ ВО Саратовский ГМУ им. В.И. Разумовского Минздрава России, РК №125030703257-1.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Maciag BM, Wilk B, Nawrocki M, et al. Establishing femoral component rotation using a dynamic tensioner does not improve patellar position after total knee replacement with use of anatomic implants: A case-control study. *Knee*. 2024;48:217-225. doi: 10.1016/j.knee.2024.04.001.
2. Cidambi KR, Robertson N, Borges C, et al. Intraoperative Comparison of Measured Resection and Gap Balancing Using a Force Sensor: A Prospective, Randomized Controlled Trial. *J Arthroplasty*. 2018;33(7S):S126-S130. doi: 10.1016/j.arth.2018.02.044.
3. Berger RA, Crossett LS, Jacobs JJ, Rubash HE. Malrotation causing patellofemoral complications after total knee arthroplasty. *Clin Orthop Relat Res*. 1998;(356):144-153. doi: 10.1097/00003086-199811000-00021.
4. Matsuda S, Miura H, Nagamine R, et al. Effect of femoral and tibial component position on patellar tracking following total knee arthroplasty: 10-year follow-up of Miller-Galante I knees. *Am J Knee Surg*. 2001;14(3):152-156.
5. Akagi M, Matsue Y, Mata T, et al. Effect of rotational alignment on patellar tracking in total knee arthroplasty. *Clin Orthop Relat Res*. 1999;(366):155-163. doi: 10.1097/00003086-199909000-00019.
6. Anouchi YS, Whiteside LA, Kaiser AD, Milliano MT. The effects of axial rotational alignment of the femoral component on knee stability and patellar tracking in total knee arthroplasty demonstrated on autopsy specimens. *Clin Orthop Relat Res*. 1993;(287):170-177.
7. Onggo JR, Onggo JD, De Steiger R, Hau R. Robotic-assisted total knee arthroplasty is comparable to conventional total knee arthroplasty: a meta-analysis and systematic review. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2020;140(10):1533-1549. doi: 10.1007/s00402-020-03512-5.
8. Kaneko T, Igarashi T, Takada K, et al. Robotic-assisted total knee arthroplasty improves the outlier of rotational alignment of the tibial prosthesis using 3DCT measurements. *Knee*. 2021;31:64-76. doi: 10.1016/j.knee.2021.05.009.
9. Thilak J, Babu BC, Thadi M, et al. Accuracy in the Execution of Pre-operative Plan for Limb Alignment and Implant Positioning in Robotic-arm Assisted Total Knee Arthroplasty and Manual Total Knee Arthroplasty: A Prospective Observational Study. *Indian J Orthop*. 2021;55(4):953-960. doi: 10.1007/s43465-020-00324-y.
10. Ueyama H, Kanemoto N, Minoda Y, et al. Comparison of postoperative knee flexion and patient satisfaction between newly and conventionally designed medial pivot total knee arthroplasty: a 5-year follow-up matched cohort study. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2022;142(8):2057-2064. doi: 10.1007/s00402-021-04121-6.
11. Филь А.С., Тараканов В.Н., Куляба Т.А., Корнилов Н.Н. Тренды в первичной артропластике коленного сустава в Национальном медицинском исследовательском центре травматологии и ортопедии им. Р.Р. Вредена и их сравнительный анализ с данными международных национальных регистров: схож ли наш путь? *Гений ортопедии*. 2020;26(4):476-483. doi: 10.18019/1028-4427-2020-26-4-476-483.
12. Герасименко М.А., Жук Е.В., Лознухо П.И. и др. Использование системы компьютерной навигации при тотальном эндопротезировании коленного сустава. *Военная медицина*. 2018;(2):135-139.
13. Лычагин А.В., Грицюк А.А., Рукин Я.А., Елизаров М.П. История развития робототехники в хирургии и ортопедии (обзор литературы). *Кафедра травматологии и ортопедии*. 2020;(1):13-19. doi: 10.17238/issn2226-2016.2020.1.13-19.

14. Лычагин А.В., Грицюк А.А., Рукин Я.А., Елизаров М.П. Первый опыт роботизированного эндопротезирования коленного сустава. *Кафедра травматологии и ортопедии*. 2019;(4):27-33. doi: 10.17238/issn2226-2016.2019.4.27-33.
15. Bellemans J, Colyn W, Vandenuecker H, Victor J. The Chitranjan Ranawat award: is neutral mechanical alignment normal for all patients? The concept of constitutional varus. *Clin Orthop Relat Res*. 2012;470(1):45-53. doi: 10.1007/s11999-011-1936-5.
16. Ritter MA, Faris PM, Keating EM, Meding JB. Postoperative alignment of total knee replacement. Its effect on survival. *Clin Orthop Relat Res*. 1994 Feb;(299):153-156.
17. Bensa A, Sangiorgio A, Deabate L, et al. Robotic-assisted mechanically aligned total knee arthroplasty does not lead to better clinical and radiological outcomes when compared to conventional TKA: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2023;31(11):4680-4691. doi: 10.1007/s00167-023-07458-0.
18. Almaawi AM, Hutt JRB, Masse V, et al. The Impact of Mechanical and Restricted Kinematic Alignment on Knee Anatomy in Total Knee Arthroplasty. *J Arthroplasty*. 2017;32(7):2133-2140. doi: 10.1016/j.arth.2017.02.028.
19. Moser LB, Hess S, Amsler F, et al. Native non-osteoarthritic knees have a highly variable coronal alignment: a systematic review. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2019;27(5):1359-1367. doi: 10.1007/s00167-019-05417-2.
20. Naranje S, Lendway L, Mehle S, Gioe TJ. Does operative time affect infection rate in primary total knee arthroplasty? *Clin Orthop Relat Res*. 2015;473(1):64-69. doi: 10.1007/s11999-014-3628-4.
21. Nogalo C, Meena A, Abermann E, Fink C. Complications and downsides of the robotic total knee arthroplasty: a systematic review. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2023;31(3):736-750. doi: 10.1007/s00167-022-07031-1.
22. Xu J, Li L, Fu J, et al. Early Clinical and Radiographic Outcomes of Robot-Assisted Versus Conventional Manual Total Knee Arthroplasty: A Randomized Controlled Study. *Orthop Surg*. 2022;14(9):1972-1980. doi: 10.1111/os.13323.
23. Evans JT, Walker RW, Evans JP, et al. How long does a knee replacement last? A systematic review and meta-analysis of case series and national registry reports with more than 15 years of follow-up. *Lancet*. 2019;393(10172):655-663. doi: 10.1016/S0140-6736(18)32531-5.
24. Ren Y, Cao S, Wu J, et al. Efficacy and reliability of active robotic-assisted total knee arthroplasty compared with conventional total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis. *Postgrad Med J*. 2019;95(1121):125-133. doi: 10.1136/postgradmedj-2018-136190.
25. Singh JA, Yu S, Chen L, Cleveland JD. Rates of Total Joint Replacement in the United States: Future Projections to 2020-2040 Using the National Inpatient Sample. *J Rheumatol*. 2019;46(9):1134-1140. doi: 10.3899/jrheum.170990.
26. Saber AY, Marappa-Ganeshan R, Mabrouk A. Robotic-Assisted Total Knee Arthroplasty. 2023. In: *StatPearls [Internet]*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025.
27. Song IS, Sun DH, Chon JG, et al. Results of revision surgery and causes of unstable total knee arthroplasty. *Clin Orthop Surg*. 2014;6(2):165-172. doi: 10.4055/cios.2014.6.2.165.
28. Von Keudell A, Sodha S, Collins J, et al. Patient satisfaction after primary total and unicompartmental knee arthroplasty: an age-dependent analysis. *Knee*. 2014;21(1):180-184. doi: 10.1016/j.knee.2013.08.004.
29. Marchand RC, Sodhi N, Bhowmik-Stoker M, et al. Does the Robotic Arm and Preoperative CT Planning Help with 3D Intraoperative Total Knee Arthroplasty Planning? *J Knee Surg*. 2019;32(8):742-749. doi: 10.1055/s-0038-1668122.
30. Vaidya NV, Deshpande AN, Panjwani T, et al. Robotic-assisted TKA leads to a better prosthesis alignment and a better joint line restoration as compared to conventional TKA: a prospective randomized controlled trial. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2022;30(2):621-626. doi: 10.1007/s00167-020-06353-2.
31. Kim YH, Yoon SH, Park JW. Does Robotic-assisted TKA Result in Better Outcome Scores or Long-Term Survivorship Than Conventional TKA? A Randomized, Controlled Trial. *Clin Orthop Relat Res*. 2020;478(2):266-275. doi: 10.1097/CORR.0000000000000916.
32. Вагапова В.Ш. Функциональная морфология коленного сустава. Медицинский вестник Башкортостана. 2007;2(5):69-74.
33. Хоминец В.В., Гайворонский И.В., Кудяшев А.Л. и др. Экспериментальное обоснование оптимальной техники выбора ротации бедренного компонента эндопротеза коленного сустава. *Вестник Российской Военно-медицинской академии*. 2021;23(1):129-134. doi: 10.17816/brmma26008.
34. Петухов А.И., Корнилов Н.Н., Куляба Т.А. и др. Осложнения при использовании компьютерной навигации во время тотальной артропластики коленного сустава. *Травматология и ортопедия России*. 2009;(3):161-163. doi: 10.17816/2311-2905-1969.
35. Blyth MJ, Smith JR, Anthony IC, et al. Electromagnetic navigation in total knee arthroplasty-a single center, randomized, single-blind study comparing the results with conventional techniques. *J Arthroplasty*. 2015;30(2):199-205. doi: 10.1016/j.arth.2014.09.008.
36. Matassi F, Cozzi Lepri A, Innocenti M, et al. Total Knee Arthroplasty in Patients With Extra-Articular Deformity: Restoration of Mechanical Alignment Using Accelerometer-Based Navigation System. *J Arthroplasty*. 2019;34(4):676-681. doi: 10.1016/j.arth.2018.12.042.
37. Nam CH, Lee SC, Kim JH, et al. Robot-assisted total knee arthroplasty improves mechanical alignment and accuracy of component positioning compared to the conventional technique. *J Exp Orthop*. 2022;9(1):108. doi: 10.1186/s40634-022-00546-z.
38. Лычагин А.В., Грицюк А.А., Рукин Я.А. и др. Клиническая эффективность и точность выравнивания механической оси при роботизированном тотальном эндопротезировании коленного сустава. *Гений ортопедии*. 2023;29(5):487-494. doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-5-487-494.
39. Айрапетов Г.А., Яблонский П.К., Сердобинцев М.С. и др. Робот-ассистированное эндопротезирование коленного сустава. Первый опыт (проспективное рандомизированное исследование). *Гений ортопедии*. 2023;29(5):475-480. doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-5-475-480.
40. Лычагин А.В., Грицюк А.А., Калинин Е.Б. и др. Кинематическое выравнивание при роботизированном тотальном эндопротезировании коленного сустава. *Гений ортопедии*. 2024;30(6):845-854. doi: 10.18019/1028-4427-2024-30-6-845-854.
41. Chandrashekar P, Babu KA, Nagaraja HS, et al. Intra-operative Safety of an Autonomous Robotic System for Total Knee Replacement: A Review of 500 Cases in India. *Indian J Orthop*. 2023;57(11):1800-1808. doi: 10.1007/s43465-023-00970-y.

42. Blum CL, Lepkowski E, Hussein A, et al. Patient expectations and satisfaction in robotic-assisted total knee arthroplasty: a prospective two-year outcome study. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2021;141(12):2155-2164. doi: 10.1007/s00402-021-04067-9.
43. Vanlommel L, Neven E, Anderson MB, et al. The initial learning curve for the ROSA® Knee System can be achieved in 6-11 cases for operative time and has similar 90-day complication rates with improved implant alignment compared to manual instrumentation in total knee arthroplasty. *J Exp Orthop.* 2021;8(1):119. doi: 10.1186/s40634-021-00438-8.
44. Maciag BM, Wilk B, Nawrocki M, et al. Establishing femoral component rotation using a dynamic tensioner does not improve patellar position after total knee replacement with use of anatomic implants: A case-control study. *Knee.* 2024;48:217-225. doi: 10.1016/j.knee.2024.04.001.

Статья поступила 23.04.2025; одобрена после рецензирования 28.04.2025; принята к публикации 05.06.2025.

The article was submitted 23.04.2025; approved after reviewing 28.04.2025; accepted for publication 05.06.2025.

Информация об авторах:

Роман Андреевич Зубавленко — младший научный сотрудник, sarniiton@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8225-1150>;

Дмитрий Александрович Марков — кандидат медицинских наук, начальник отдела, m-makar@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1323-5592>;

Владимир Владимирович Островский — доктор медицинских наук, директор, sarniito@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8602-2715>.

Information about authors:

Roman A. Zubavlenko — Junior Researcher, sarniiton@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8225-1150>;

Dmitriy A. Markov — Candidate of Medical Sciences, Head of the Department, m-makar@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1323-5592>;

Vladimir V. Ostrovskij — Doctor of Medical Sciences, Director, sarniito@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8602-2715>.

Главный редактор А.В. Бурцев

Компьютерная верстка М.А. Беяева

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 15.08.2025. Дата выхода 25.08.2025

Формат 60 × 84 1/8. Усл. печ. л. 16,74

Тираж 75 экз. Заказ № 16264. Свободная цена

Адрес издателя, редакции журнала «Гений ортопедии»
640014, Россия, г. Курган, ул. М. Ульяновой, 6
<https://ilizarov-journal.com>

Отпечатано в Типографии «Эталон». 198097, г. Санкт-Петербург, ул. Трефолева, 2 литера БН, помещение 3-Н, офис 1

ilizarov-journal.com