

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

2026

№2 **Том**
32

ГЕНИЙ ОРТОПЕДИИ

Научно-теоретический
и практический журнал



16+

ISSN 1028-4427 (Print)

ISSN 2542-131X (Online)

Гений Ортопедии

Orthopaedic Genius

Том 32
№ 2
2026

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. Baidurashvili (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. Ryabikh (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

Курган



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, 2026

Оригинальные статьи

- Сравнительная оценка результатов использования аппарата Илизарова и ортопедического гексапода при лечении пациентов со сгибательными контрактурами коленного сустава 149
Л.Н. Соломин, С.А. Рохоев
- Сравнительная эффективность хирургических методов коррекции синдрома «висящей стопы» при изолированной нейропатии малоберцового нерва 162
А.А. Григорян, В.М. Абу Заалан, Л.Г. Макинян, А.М. Маннанов, Ч. Молдамырзаев, М.А. Иманкулов
- Результаты дифференцированного подхода к открытой декомпрессии срединного нерва при синдроме запястного канала 172
С.Н. Измалков, О.М. Семенкин, А.Н. Братийчук, А.К. Усов, Н.А. Демченко, А.Е. Гусева, К.Ф. Хайруллина
- Факторы, влияющие на стабильность транспедикулярной фиксации при лечении пациентов с застарелыми переломами позвоночника на фоне остеопороза 186
П.Г. Мытыга, С.В. Масевнин, В.С. Мураховский, К.В. Жданович, Н.С. Заборовский
- Сравнительная оценка коммерческих наборов бактериофагов и перспективы их применения для лечения пациентов с ортопедической MRSA-инфекцией 197
Е.М. Гордина, А.Р. Касимова, С.А. Божкова, Л.Н. Смирнова
- Перевод, кросс-культурная адаптация и валидация русскоязычной версии шкалы Karlsson – Peterson Ankle Function Score System (KAFS) 205
Т.Н. Кубрина, Е.П. Сорокин, Е.А. Пашкова, Н.С. Коновальчук, К.А. Демьянова, Ю.П. Фаустова, П.М. Преображенский
- Применение обогащенной тромбоцитами плазмы при возмещении дефектов костной ткани керамическими имплантатами 214
И.П. Антропова, Е.А. Волокитина, К.А. Тимофеев, Р.А. Труфаненко, С.М. Кутепов, Л.Г. Полушина
- Биологическое тестирование *in vivo* титановых сплавов с добавлением редкоземельных элементов для оценки возможности их использования в медицинских изделиях 225
А.С. Анохин, Н.А. Кононович, А.Л. Шастов, Е.Н. Горбач, Е.А. Ермакова, А.А. Кирсанкин, М.С. Чувикина, А.С. Лукьянов, С.С. Стрельникова, И.В. Шипицына, Е.А. Киреева, Н.В. Тушина
- Элюция из различных костных цемента ванкомицина и меропенема при их комбинированном применении 237
М.В. Стогов, А.Л. Шастов, Е.А. Киреева, Н.В. Тушина
- Особенности ремоделирования суставных структур при протезировании смежного сегмента конечности имплантатом с кальций-фосфатным покрытием 244
Т.А. Ступина, А.А. Еманов, В.П. Кузнецов

Новые технологии

- Обеспечение дозированного и адаптивного натяжения в коррекции деформаций ногтя: новая методика на основе стальной проволоки и эластичных компонентов 254
Д.О. Розов

Обзорные статьи

- Роль доступов и видов остеосинтеза локтевого отростка в хирургическом лечении пациентов с переломами дистального отдела плечевой кости 262
Т. Е. Прокопович, А. Е. Медведчиков, Е. А. Анастасиева, И. А. Кирилова

Юбилей

- Член-корреспондент РАН, д.м.н. Назаренко Антон Герасимович 271

Original Articles

Comparative evaluation of the results of using the Ilizarov apparatus and an orthopedic hexapod in the treatment of patients with flexion knee joint contractures	149
<i>L.N. Solomin, S.A. Rokhoyev</i>	
Comparative efficacy of surgical methods in the treatment of foot drop associated with isolated peroneal nerve neuropathy	162
<i>A.A. Grigoryan, V.M. Abu Zaan, L.G. Makinyan, A.M. Mannanov, Ch. Moldamyrzaev, M.A. Imankulov</i>	
Results of a differentiated approach to open decompression of the median nerve in carpal tunnel syndrome	172
<i>S.N. Izmailov, O.M. Semekin, A.N. Bratiychuk, A.K. Usov, N.A. Demchenko, A.E. Guseva, K.F. Khairullina</i>	
Factors affecting the stability of transpedicular fixation in patients with neglected osteoporotic vertebral fractures	186
<i>P.G. Mytyga, S.V. Masevnin, V.S. Murakhovskiy, K.V. Zhdanovich, N.S. Zaborovskii</i>	
Comparative evaluation of commercial bacteriophages and prospects for their application in the treatment of orthopedic MRSA-infection	197
<i>E.M. Gordina, A.R. Kasimova, S.A. Bozhkova, L.N. Smirnova</i>	
Translation, cross-cultural adaptation and validation of the Russian language version of the Karlsson – Peterson Ankle Function Score System (KAFFS)	205
<i>T.N. Kubrina, E.P. Sorokin, E.A. Pashkova, N.S. Konovalchuk, K.A. Demianova, Yu.P. Faustova, P.M. Preobrazhenskiy</i>	
Application of platelet-rich plasma in compensating bone defects with ceramic Implants	214
<i>I.P. Antropova, E.A. Volokitina, K.A. Timofeev, R.A. Trufanenko, S.M. Kutepov, L.G. Polushina</i>	
<i>In vivo</i> biological testing of titanium alloys with added rare earth elements to assess their possible use in medical products	225
<i>A.S. Anokhin, N.A. Kononovich, A.L. Shastov, E.N. Gorbach, E.A. Ermakova, A.A. Kirsankin, M.S. Chuvikina, A.S. Lukyanov, S.S. Strelnikova, I.V. Shipitsyna, E.A. Kireeva, N.V. Tushina</i>	
Elution of vancomycin and meropenem and their combinations from various bone cement materials	237
<i>M.V. Stogov, A.L. Shastov, E.A. Kireeva, N.V. Tushina</i>	
Features of adjacent joint structures remodeling after prosthetic application of a tibial calcium-phosphate coated implant	244
<i>T.A. Stupina, A.A. Emanov, V.P. Kuznetsov</i>	
New technologies	
Gradual correction of nail deformity with adjustable tension: a new technique using steel wire and elastic components	254
<i>D.O. Rozov</i>	
Review Articles	
Role of olecranon osteosynthesis types and approaches in surgical treatment of patients with distal humerus fractures: a systematic review	262
<i>T.E. Prokopovich, A.E. Medvedchikov, E.A. Anastasieva, I.A. Kyrilova</i>	
Anniversary	
Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences Anton Gerasimovich Nazarenko	271

Научная статья

УДК 616.728.2-009.12-089.227.84:004.9]-089.168

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2026-32-2-149-161>

Сравнительная оценка результатов использования аппарата Илизарова и ортопедического гексапода при лечении пациентов со сгибательными контрактурами коленного сустава

Л.Н. Соломин¹, С.А. Рохоев²✉

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

² Национальный медицинский исследовательский центр детской травматологии и ортопедии им. Г.И. Турнера, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Сайгидула Абдурахманович Рохоев, 09saga@mail.ru

Аннотация

Введение. В лечении пациентов со стойкими сгибательными контрактурами коленного сустава при недостаточной неэффективности мягкотканного релиза используют чрескостный остеосинтез, — аппарат Илизарова с одноосевым шарниром и ортопедические гексаподы.

Цель работы — провести сравнительный анализ эффективности клинического использования ортопедического гексапода и аппарата Илизарова с одноосевым типом шарнира при лечении пациентов со сгибательными контрактурами коленного сустава.

Материалы и методы. Проанализировано 67 случаев лечения сгибательных контрактур коленного сустава на фоне спастического пареза. Всем пациентам выполнена операция заднего релиза с последующей установкой аппарата внешней фиксации (АВФ). В основной группе ($n = 35$) использовали ортопедический гексапод «Орто-СУВ», в группе сравнения ($n = 32$) — аппарат Илизарова с одноосевым шарниром. Также пациенты разделены на две подгруппы в зависимости от наличия предоперационно диагностированного подвывиха голени кзади. Оценивали длительность этапов лечения, амплитуду движений в коленном суставе и функциональные исходы по шкалам KSS, Lysholm и LEFS через два дня, шесть и 12 месяцев после демонтажа аппарата.

Результаты. Выявлены: значимо меньшая продолжительность периода разгибания в основной группе, сопоставимые показатели средней продолжительности периода фиксации и общей длительности использования АВФ в обеих группах. При оценке амплитуды движений коленного сустава после демонтажа АВФ отмечены сопоставимые показатели снижения величины максимального сгибания в обеих группах. В обеих группах улучшились средние балльные значения функции сустава и конечности по сравнению с дооперационными функциональными показателями по всем шкалам KSS, Lysholm и LEFS.

Обсуждение. К факторам, повлиявшим на функциональный исход, отнесены наличие подвывиха голени и соблюдение пациентом послеоперационных рекомендаций. Специфическим фактором, влияющим на функциональный исход при использовании аппарата Илизарова, является точное позиционирование шарнира на оси сгибания-разгибания во избежание ятрогенной нестабильности коленного сустава. Общая длительность применения АВФ и общая функция нижней конечности в сравниваемых группах не имели статистически значимых отличий, что свидетельствует об отсутствии существенных преимуществ использования одного типа аппарата перед другим.

Заключение. При использовании ортопедического гексапода длительность периода разгибания значимо меньше по сравнению с аппаратом Илизарова, однако общая длительность использования АВФ в обеих группах не имела существенных различий. По основным функциональным показателям, амплитуде движений (сгибание и разгибание) и LEFS, статистически значимых различий между группами на всех этапах наблюдения не обнаружено. На основании шкал KSS и Lysholm, пациенты основной группы через 12 месяцев показали достоверно лучшие результаты. Частота осложнений в обеих группах была сопоставимой.

Ключевые слова: контрактура, коленный сустав, сгибательная контрактура, аппараты внешней фиксации, аппарат Илизарова, ортопедические гексаподы

Для цитирования: Соломин Л.Н., Рохоев С.А. Сравнительная оценка результатов использования аппарата Илизарова и ортопедического гексапода при лечении пациентов со сгибательными контрактурами коленного сустава. *Гений ортопедии*. 2026;32(2):149-161. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-2-149-161.



Comparative evaluation of the results of using the Ilizarov apparatus and an orthopedic hexapod in the treatment of patients with flexion knee joint contractures

L.N. Solomin¹, S.A. Rokhovev²✉

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

² Turner National Medical Research Center for Children's Orthopedics and Trauma Surgery, St. Petersburg, Russian Federation

Corresponding author: Saigidula A. Rokhovev, 09saga@mail.ru

Abstract

Relevance When soft tissue release is ineffective in the treatment of persistent flexion contractures of the knee joint, external fixation devices are used. Orthopedic hexapods can be used as an alternative to the traditional Ilizarov frame with a uniaxial hinge.

Purpose To conduct a comparative analysis of the effectiveness of the clinical use of an orthopedic hexapod and the Ilizarov fixator with a uniaxial hinge in the treatment of patients with flexion contractures of the knee joint.

Materials and methods A total of 67 cases of flexion contracture of the knee joint due to spastic paresis were analyzed. All patients underwent posterior release surgery followed by the application of an external fixation device (EFD). Patients were divided into two groups: the study group ($n = 35$) treated using the "Orto-SUV" orthopedic hexapod, and the comparison group ($n = 32$) treated using the Ilizarov fixator with a uniaxial hinge. Patients were also subdivided based on the presence or absence of a preoperatively diagnosed posterior tibial subluxation. The duration of treatment stages, range of motion in the knee joint and functional outcomes (assessed with KSS, Lysholm, and LEFS systems) were evaluated at 2 days, 6 months, and 12 months after frame removal.

Results The use of the orthopedic hexapod significantly reduced the duration of the extension stage compared to the Ilizarov fixator. However, the overall duration of external fixation in both groups did not differ significantly. No statistically significant differences were found between the groups at any follow-up time-point for the main functional indicators: range of motion (flexion and extension) and overall lower extremity function (LEFS score). However, according to specialized knee joint assessment scales (KSS and Lysholm), patients in the study group demonstrated significantly better results at 12 months. The complication rate in both groups was comparable.

Discussion Factors affecting functional outcomes in both groups included preoperative tibial subluxation and patient compliance with postoperative recommendations. A specific factor affecting functional outcomes for a uniaxial external fixator is the precise positioning of the hinge on the flexion-extension axis to avoid iatrogenic knee instability. The total duration of external fixation and overall lower extremity function (LEFS) in the compared groups did not differ statistically, indicating no significant advantage of using one type of device over the other.

Conclusion With the orthopedic hexapod, the extension stage was significantly shorter than with the Ilizarov fixator; however, the total duration of external fixation in both groups did not differ significantly. No statistically significant differences were found between the groups at any follow-up point in terms of the main functional indicators, range of motion (flexion and extension), and LEFS. Based on the KSS and Lysholm scales, patients in the study group demonstrated significantly better results at 12 months. Complication rates were comparable in both groups.

Keywords: contracture, knee joint, flexion contracture, external fixation, Ilizarov apparatus, orthopedic hexapods

For citation: Solomin LN, Rokhovev SA. Comparative evaluation of the results of using the Ilizarov apparatus and an orthopedic hexapod in the treatment of patients with flexion knee joint contractures. *Genij Ortopedii*. 2026;32(2):149-161. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-2-149-161.

ВВЕДЕНИЕ

Сгибательные контрактуры коленного сустава наиболее часто возникают при заболеваниях, сопровождающихся синдромом спастичности, и в значительной степени ухудшают качество жизни пациента, лишая его возможности передвигаться без дополнительных средств опоры [1–4]. При длительном существовании контрактуры формируются вторичные изменения в мягких тканях, что делает консервативное лечение безуспешным [5, 6]. Для устранения стойкой сгибательной контрактуры коленного сустава выполняют «задний релиз», включающий невролиз малоберцового нерва, миолиз, тенолиз, удлинение и пересадку сгибателей голени, а также заднюю капсулотомию коленного сустава [7–11]. Вне зависимости от качества выполненного заднего релиза, максимально возможное одномоментное устранение может быть ограничено из-за выраженной патологической ретракции мышечно-сухожильного комплекса и сосудисто-нервного пучка. Поэтому во избежание их тракционного повреждения «мягкотканная» операция может быть дополнена применением «шарнирного» аппарата внешней фиксации, чаще всего аппарата Илизарова [12–15].

Проведенные исследования показали, что традиционно используемые для разработки движений аппарата с одноосевым типом шарнира не соответствуют кинематике коленного сустава [16, 17]. Для соответствия ей аппарат внешней фиксации (АВФ) должен обеспечивать движения на основе виртуального шарнира [18]. Этому требованию соответствуют ортопедические гексаподы, эффективность применения которых уже доказана при лечении пациентов со стойкими разгибательными контрактурами коленного сустава [19]. Однако сравнение эффективности клинического применения ортопедического гексапода и аппарата с одноосевым типом шарнира при стойких сгибательных контрактурах коленного сустава до настоящего времени не проводили.

Цель работы — провести сравнительный анализ эффективности клинического использования ортопедического гексапода и аппарата Илизарова с одноосевым типом шарнира при лечении пациентов со сгибательными контрактурами коленного сустава.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования — ретро-проспективное нерандомизированное когортное исследование. Основой публикации является диссертационная работа С.А. Рохоева «Обоснование применения ортопедического гексапода при лечении пациентов с контрактурами коленного сустава» (Санкт-Петербург, 2022).

Пациенты

Исследование проведено на базе НМИЦ ТО им. Р.Р. Вредена. В исследование включены пациенты, проходившие лечение в период с 2005 г. по 2021 г. Проанализировано 67 случаев комбинированного (задний релиз + АВФ) лечения сгибательных контрактур коленного сустава, возникших вследствие спастического пареза. Причинами возникновения спастического пареза являлись черепно-мозговые травмы (ЧМТ), последствия детского церебрального паралича (ДЦП) и острые нарушения мозгового кровообращения (ОНМК).

В основную группу, где в дополнение к заднему релизу использовали ортопедический гексапод Орто-СУВ, включены 35 пациентов, из них 14 пациентов проанализированы проспективно и 21 — ретроспективно.

В группе сравнения, где задний релиз комбинировали с использованием аппарата Илизарова с одноосевым типом шарнира, включены 32 пациента.

Гендерно-возрастные и этиологические характеристики пациентов обеих групп представлены в таблице 1. Обе группы были сопоставимы по этиологии, гендеру, возрасту, длительности существования контрактуры, а также сопутствующему заднему подвывиху голени ($p > 0,05$).

Таблица 1

Распределение пациентов обеих подгрупп по основным характеристикам, $n/\%$, Ме [Q1; Q3]

Группа	Основная группа (ортопедический гексапод)		Группа сравнения (одноосевой аппарат)		
Количество пациентов	35		32		
Возраст	32 [27;43]		28 [26;37]		
Гендер	абс.	%	абс.	%	
Мужчины	21	60	19	59,4	
Женщины	14	40	13	40,6	
Этиология	ДЦП	17	48,5	18	56,2
	ЧМТ	10	28,5	8	25,0
	ОНМК	8	22,8	6	18,7

Таблица 1 (продолжение)

Распределение пациентов обеих подгрупп по основным характеристикам, n/%, Me [Q1; Q3]

Группа		Основная группа (ортопедический гексапод)		Группа сравнения (одноосевой аппарат)	
Давность	3–5 лет	14	40	9	28,1
	6–10 лет	4	11,4	5	15,6
	↑10 лет	17	48,5	18	56,2
Сопутствующий подвывих голени		Подгруппа 1		Подгруппа 2	
		абс.	%	абс.	%
Количество пациентов		12	34,3	8	25

В обеих группах имелись пациенты с предоперационно диагностированными подвывихами голени кзади. Соответственно, эти пациенты были выделены в подгруппу 1 и подгруппу 2.

Оперативная техника

Всем пациентам первым этапом выполняли операцию заднего релиза из двух доступов (медиального и латерального) в параартикулярной области на уровне нижней трети бедра. Латеральный доступ использовали для ревизии и невролиза общего малоберцового нерва (рис. 1, а) от нижней трети бедра до места его входа в межмышечную перегородку. После этого в зависимости от степени натяжения, выполняли либо дистальное фракционное удлинение двуглавой мышцы ($n = 26, 38\%$), либо Z-образное удлинение ее дистального сухожилия ($n = 41, 62\%$). Этот же доступ использовали для визуализации и защиты подколенного сосудисто-нервного пучка (СНП).

Медиальный доступ применяли для выделения портняжной, полусухожильной, полуперепончатой и тонкой мышц. Полуперепончатую и портняжную мышцы при их натяжении удлинляли фракционно. Сухожилие тонкой мышцы отсекали дистально у места перехода мышечной в сухожильную часть, сухожилие полусухожильной мышцы — в наиболее дистальной части (рис. 1, в). При выявлении натяжения головок икроножных мышц тупо отслаивали их в месте прикрепления к бедренной кости. Аналогичным образом при выявлении натяжения подошвенной мышцы выполняли ее «слайдинг». На завершающем этапе осуществляли заднюю капсулотомию коленного сустава (рис. 1, г), при выраженном натяжении — фракционное удлинение тыльного листка фасции. После этого разгибали голень до возникновения натяжения СНП. Проксимальный конец полусухожильной и дистальный конец сухожилия тонкой мышц сшивали по типу «бок в бок» с сохранением умеренного тонуса.

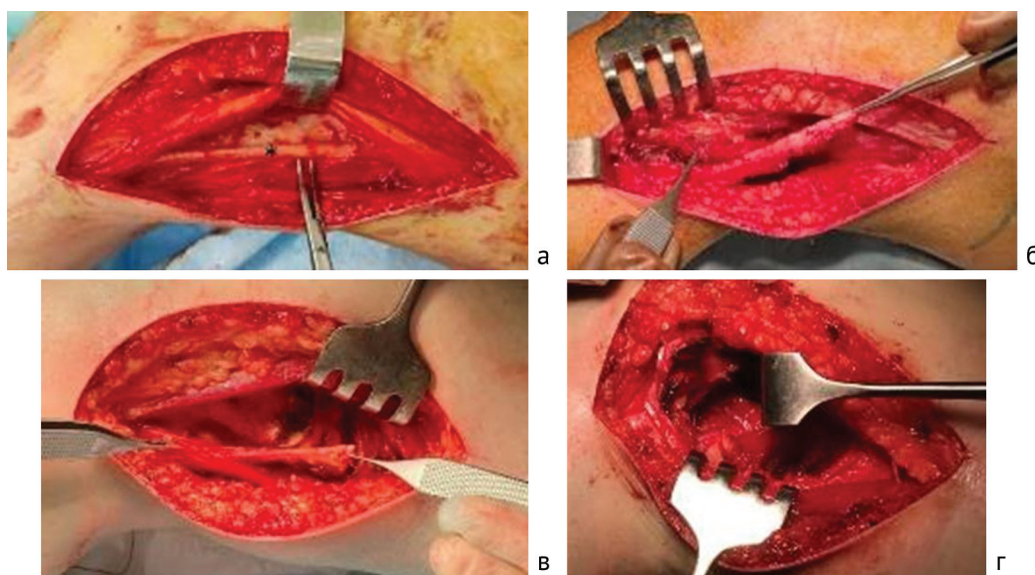


Рис. 1. Этапы заднего релиза: а — невролиз малоберцового нерва; б — удлинение дистального сухожилия двуглавой мышцы; в — фракционное удлинение полуперепончатой мышцы, отсечение тонкой мышцы у места перехода мышечной в сухожильную часть, полусухожильной мышцы в ее наиболее дистальной части; г — задняя капсулотомия

Во всех анализируемых случаях вследствие невозможности одномоментного полного разгибания голени из-за натяжения СНП операцию дополняли установкой АВФ «бедро – голень». Для исключения тракционной невропатии сустав фиксировали в положении $+10^\circ$ сгибания от угла, при котором происходило натяжение СНП.

В обеих группах использовали схожие компоновки, включающие базовую опору, установленную на уровне нижней трети бедра, и мобильную опору, установленную на уровне средней трети или границе средней трети и верхней трети голени. В основной группе во избежание контакта страт с кожей при установке мобильной опоры на уровне средней трети голени добавляли «свободную» опору секторного типа (рис. 2, а). Во фронтальной плоскости опоры ориентировали перпендикулярно общей механической оси конечности, а в сагиттальной каждый из модулей — перпендикулярно анатомических осей бедренной и большеберцовой костей.

В основной группе базовую и мобильную опоры соединяли шестью стратами ортопедического гексапода [20]. В первые сутки после операции выполняли рентген-контроль коленного сустава в двух проекциях. Контрольные рентгенограммы открывали в программе ортопедического гексапода (SUV-Software v.7.2). При проведении расчета на начальном этапе задавали distraction 5–7 мм. Далее при помощи опции многоэтапной коррекции выполняли этапные (каждые 10°) расчеты разгибания голени. Учитывая возможность возникновения феномена «рикошета» (рецидива контрактуры вследствие ретракции мягких тканей), при расчете в программе добавляли «переразгибание» голени в пределах $5\text{--}7^\circ$ (рис. 2, б). Начальный темп разгибания составлял $2,5^\circ$ в сутки за четыре приема. Distraction начинали на вторые–четвертые сутки после операции, затем переходили к разгибанию голени. Первоначальный темп разгибания в зависимости от выраженности болевого синдрома мог быть ускорен или замедлен. По завершении периода разгибания страты ортопедического гексапода демонтировали, а базовую и мобильную опоры соединяли фиксационными шарнирами.

Основой для вышеуказанных параметров явились работы J.E. Herzenberg et. al., H.I. Balci et al., в которых отмечено возникновение феномена рикошета, а также приведены рекомендации для профилактики данного осложнения [14, 21]. В работе М.В. Волкова и О.В. Оганесяна приведены рекомендации темпа разгибания голени в АВФ по $2\text{--}6^\circ$ в сутки [22]. В нашем исследовании при использовании компьютерной программы ортопедического гексапода этапный расчет разгибания, равный 10° , мы предполагали выполнить за четыре дня. Формула выглядела следующим образом $10^\circ/4 \text{ дня} = 2,5^\circ$ в сутки, что близко к минимальным значениям, рекомендованным авторами, и, на наш взгляд, является оптимальным для начального темпа.

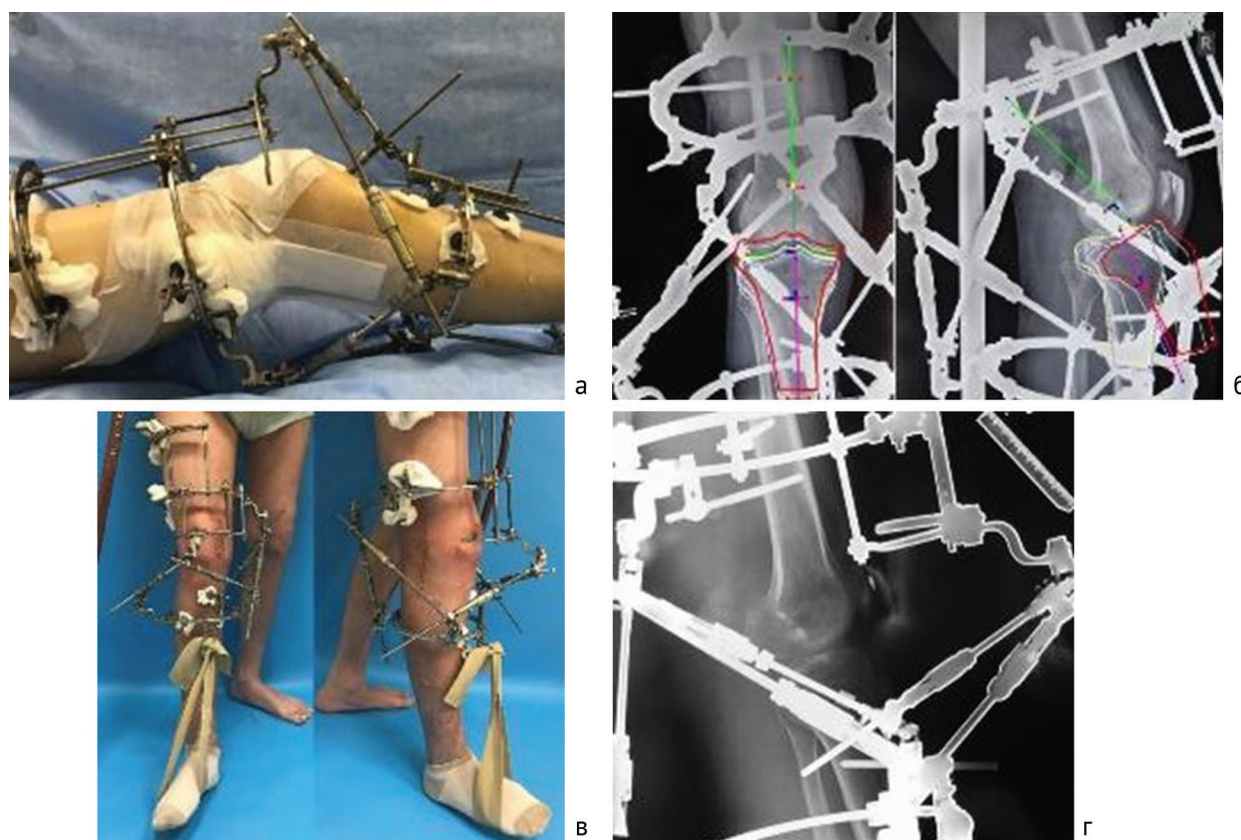


Рис. 2. Использование ортопедического гексапода: а — внешний вид после монтажа ортопедического гексапода; б — расчет разгибания голени в компьютерной программе; в, г — фотография и рентгенограмма в боковой проекции после завершения этапа разгибания голени

В группе сравнения базовую и мобильную опоры соединяли осевыми шарнирами, позиционированными под ЭОП-контролем в проекции оси сгибания – разгибания коленного сустава [23]. Пассивные движения выполняли при помощи поворотных шарниров (рис. 3). Первоначальный темп дистракции составлял 8 мм (в среднем 2–2,5° в сутки) за четыре приема, его также, как у пациентов основной группы, корректировали в зависимости от болевого синдрома [22].

В обеих группах по окончании периода разгибания коленный сустав в положении гиперэкстензии фиксировали в АВФ на шесть недель. По окончании периода фиксации аппарат демонтировали, а коленный сустав фиксировали еще на три недели гипсовым лонгетом или ортезом. В целом протокол послеоперационного ведения и реабилитации пациентов обеих групп был схожим. В обеих группах с момента демонтажа АВФ пациентам рекомендовали проведение курсов реабилитационного лечения, включающего занятия с врачом ЛФК, механотерапию, электромиостимуляцию четырехглавой мышцы, лечебный массаж.

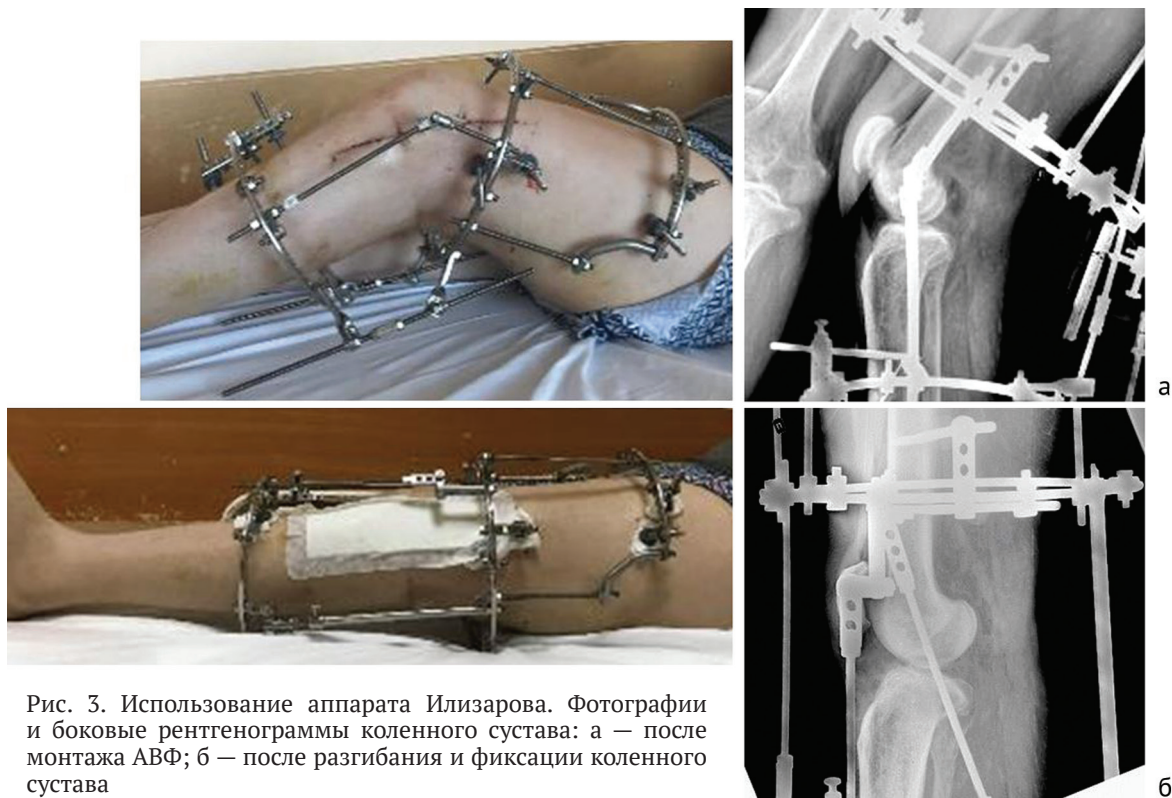


Рис. 3. Использование аппарата Илизарова. Фотографии и боковые рентгенограммы коленного сустава: а — после монтажа АВФ; б — после разгибания и фиксации коленного сустава

Некоторые отличия имелись у пациентов, включенных в подгруппы с наличием подвывиха голени кзади. У 12 (34 %) пациентов из подгруппы 1 после расчета разгибания дополнительно при помощи программной опции «многоэтапной коррекции» проводили расчет устранения подвывиха. У восьми (25 %) пациентов из подгруппы 2 задний подвывих голени устраняли после разгибания сустава путем перемещения мобильной опоры кпереди. Протокол послеоперационной реабилитации и ведения после демонтажа АВФ в целом не отличался от приведенного выше. Но, учитывая сопутствующий предоперационный подвывих, пациентам обеих подгрупп рекомендовали фиксировать коленный сустав в АВФ не на шесть, а на восемь недель.

Сравнение результатов

Для сравнения анализировали длительность различных этапов лечения (рис. 4), амплитуды движений и, в особенности, дефицит разгибания после демонтажа АВФ по критериям J. Herzenberg et. al. [21]. Согласно предложенным критериям отличным результатом считали дефицит разгибания < 5°, хорошим — 6–15°, удовлетворительным — 16–29°, неудовлетворительным — > 30°. Оценку осложнений проводимого лечения выполняли в соответствии с классификацией J. Caton [24]. Оценку функции коленного сустава и нижней конечности в целом проводили с использованием шкал-опросников Lysholm, KSS (англ.: Knee Society Score, шкала оценки состояния коленного сустава) и LEFS (англ.: Lower Extremity Functional Scale, функциональная шкала нижних конечностей) [25–27]. Перечисленные параметры оценивали до операции, на вторые сутки после демонтажа АВФ, через шесть и 12 месяцев с момента демонтажа АВФ. Проспективно наблюдаемым пациентам из основной группы ($n = 14$) параметры были дополнительно оценены на сроке три и девять месяцев после демонтажа АВФ.

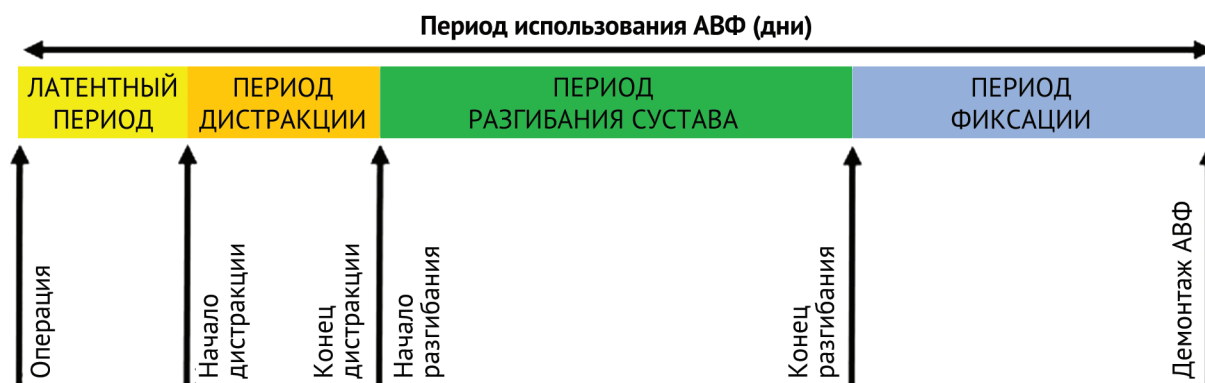


Рис. 4. Этапы лечения пациентов со сгибательными контрактурами коленного сустава

Статистический анализ

Запись полученных данных производили в электронных таблицах Microsoft Excel. Статистический анализ проводили с использованием компьютерных программ Statistica v.10 и jamovi 2.6.17. Нормальность распределения определяли с использованием критерия Шапиро – Уилка. Из-за неправильного распределения большинства анализируемых числовых переменных применяли непараметрические методы статистической обработки. Оценку количественных параметров в двух независимых группах проводили с использованием U-критерия Манна – Уитни. Учитывая применение непараметрических методов, количественные данные представляли в виде медиан (Med), нижних и верхних квартилей (Q1:Q3). Статистическую обработку и анализ номинальных данных проводили при помощи критерия Хи-квадрат (с поправкой Йетса для малых групп) и критерий Фишера. Для анализа зависимых выборок в одной и той же группе и изучения показателей в динамике после оперативного лечения применяли критерии Вилкоксона и Фридмана.

Пациенты подписали информированное согласие на проведение обследования, лечение, сбор, хранение и анализ данных медицинской документации в научных и образовательных целях, а также их публикацию.

РЕЗУЛЬТАТЫ

С момента выполнения операции заднего релиза полное разгибание (с 35° до гиперэкстензии 5°) в коленном суставе в основной группе достигнуто в среднем за 22 [18;27] дня, а в группе сравнения (с 30° до гиперэкстензии 5°) — за 24,5 [21;31] дня (табл. 2, 3).

Таблица 2

Сравнительная характеристика этапов лечения

Этапы лечения	Длительность этапа, дни, Med [Q1; Q3]		
	Основная группа	Группа сравнения	Значение <i>p</i>
Латентный период	3,0 [2;4]	3,0 [2;5]	> 0,05
Период дистракции	3,0 [2;3]	3,0 [2;3]	> 0,05
Период разгибания	22,0 [18;27]	24,5 [21;31]	< 0,05
Период фиксации	46,0 [43;54]	45,0 [43;50]	> 0,05
Период использования АВФ	78,0 [68;86]	76,5 [71;89]	> 0,05

Таблица 3

Данные гониометрического исследования коленного сустава

Срок наблюдения	Гониометрические показатели, градусы, Med [Q1; Q3]			
	Основная группа		Группа сравнения	
	Максимальное сгибание	Дефицит разгибания	Максимальное сгибание	Дефицит разгибания
До операции	130 [130;135]	65 [55;70]	122 [120;135]	67 [55;72]
После релиза	130 [130;135]	35 [30;45]	122 [120;135]	30 [20;40]
На вторые сутки после демонтажа	30 [25;35]	0 [0;0]	33 [24;35]	0 [0;0]
По прошествии шести месяцев	80 [65;85]	0 [0;0]	79 [58;84]	0 [0;0]
По прошествии 12 месяцев	110 [97;120]	0 [0;0]	104 [95;108]	0 [0;0]

При сравнительном анализе значимо меньшая продолжительность периода разгибания отмечена в основной группе ($p < 0,05$). При сравнении средней продолжительности периода фиксации выявлены сопоставимые показатели ($p > 0,05$), — 46 дней в основной группе и 45 дней в группе сравнения (табл. 2). Общая длительность использования АВФ в обеих группах также не имела значимых различий ($p < 0,05$), — 78 дней в основной группе и 76,5 дней в группе сравнения (табл. 2).

При оценке амплитуды движений (максимального сгибания и разгибания) коленного сустава после демонтажа АВФ отмечены сопоставимые ($p < 0,05$) показатели снижения величины максимального сгибания в обеих группах: в среднем со 130° до 30° в основной группе и со 122° до 33° в группе сравнения, при этом достигнутое полное разгибание сохраняется (табл. 3).

При оценке средней величины сгибания в коленном суставе зарегистрировано сопоставимое ($p < 0,05$) увеличение с 30° до 80° в основной группе и с 33° до 79° в группе сравнения спустя шесть месяцев после демонтажа, увеличение с 80° до 110° в основной группе и с 79° до 104° в группе сравнения при оценке спустя 12 месяцев.

При оценке дефицита разгибания на сроке шесть месяцев с момента демонтажа АВФ в основной группе выявлен один случай дефицита разгибания величиной 7° , который увеличился при повторном наблюдении на сроке 12 месяцев с момента демонтажа АВФ. В группе сравнения на сроке шесть месяцев с момента демонтажа АВФ дефицит разгибания отмечен у трех пациентов, — по 7° у двух (6,25 %) и 5° у одного (3,1 %). По прошествии 12 месяцев у двух (6,25 %) пациентов дефицит разгибания также был равен 7° , а у третьего пациента увеличился на 3° (до 8°). При этом средний показатель дефицита разгибания, отмеченный спустя шесть и 12 месяцев с момента демонтажа АВФ, в обеих группах был равен 0° ($p < 0,05$). В соответствии с критериями оценки дефицита разгибания J. Herzenberg et. al. [23], спустя 12 месяцев с момента демонтажа АВФ в основной группе отличные результаты отмечены в 34 (97,14 %) случаях, хороший — в одном случае (2,86 %). В группе сравнения отличный результат зарегистрирован в 29 (82,85 %) случаях, хороший — в трех (9,37 %) случаях.

Данные оценки функции сустава и конечности в целом по специализированным шкалам KSS, Lysholm и LEFS представлены в таблице 4. В обеих группах данного исследования выявлено улучшение средних балльных значений по сравнению с дооперационными функциональными показателями по всем трем шкалам.

Таблица 4

Результаты функциональной оценки сустава по шкалам на разных этапах наблюдения

Срок наблюдения	Функциональная оценка сустава по шкалам, баллы, Med [Q1; Q3]					
	KSS		Lysholm		LEFS	
	Орто-СУВ	Аппарат Илизарова	Орто-СУВ	Аппарат Илизарова	Орто-СУВ	Аппарат Илизарова
До операции	43,0 [41;45]	43,0 [43;45]	57,0 [55;60]	55,0 [53;60]	15,0 [11;19]	16,0 [14;18]
	$p > 0,05$		$p > 0,05$		$p > 0,05$	
На вторые сутки после демонтажа	55,0 [53;55]	53,0 [51;55]	59,0 [55;61]	5,5 [51;59]	23,0 [22;25]	24,5 [23;26]
	$p < 0,05$		$p < 0,05$		$p > 0,05$	
Спустя шесть месяцев	80,0 [75;81]	77,0 [69;81]	85,0 [83;85]	81,0 [71;83]	64,0 [60;67]	62,5 [59;66]
	$p < 0,05$		$p < 0,05$		$p > 0,05$	
Спустя 12 месяцев	102,0 [94;103]	100,0 [92;101]	99,0 [93;100]	95,0 [88;99]	74,0 [72;76]	73,5 [70;76]
	$p < 0,05$		$p < 0,05$		$p > 0,05$	

Спустя год после демонтажа АВФ все пациенты основной группы (100 %) имели отличные показатели функции сустава по шкале KSS. В группе сравнения отличные результаты функции сустава по шкале KSS зарегистрированы у 27 (77,14 %) пациентов, а хорошие — у пяти (15,6 %).

Спустя год после снятия АВФ у 32 (91,42 %) пациентов основной группы функция сустава по шкале Lysholm оценена как отличная, у трех (8,58 %) — как хорошая. В группе сравнения 23 (71,87 %) пациента достигли отличной функции сустава по шкале Lysholm, тогда как у остальных девяти (28,12 %) пациентов результаты оценены как хорошие.

Через 12 месяцев после демонтажа АВФ оценка по шкале LEFS показала незначительное ограничение функции нижней конечности у всех пациентов (100 %) в обеих исследуемых группах.

При сравнительном анализе данных шкалы KSS и Lysholm, зарегистрированных после демонтажа АВФ, спустя шесть и 12 месяцев, значимо лучшая функция коленного сустава отмечена в основной группе ($p < 0,05$). При оценке функции нижней конечности по шкале LEFS полученные средние балльные значения сопоставимы ($p < 0,05$) на всех сроках наблюдения.

Динамика изменения максимального сгибания, дефицита разгибания и средних балльных значений по функциональным шкалам у проспективных пациентов основной группы отражены в таблице 5. После демонтажа АВФ зафиксировано четырехкратное уменьшение максимального угла сгибания по сравнению с дооперационными измерениями. При этом от момента демонтажа АВФ отмечали постепенное улучшение, — угол сгибания коленного сустава увеличивался, достигая хороших показателей к девяти месяцам и отличных к 12-ти месяцам. Отличные функциональные результаты по шкале KSS фиксировали на девятый месяц после демонтажа АВФ, в то время как по шкале Lysholm — только на 12-ый месяц. Согласно шкале LEFS, через шесть месяцев после демонтажа АВФ у пациентов наблюдали лишь незначительное ограничение функции нижней конечности.

Таблица 5

Динамика изменения функциональных показателей по данным гониометрического исследования и оценочных шкал

Срок наблюдения	Функциональные показатели гониометрического исследования и оценочных шкал, Med [Q1; Q3]				
	Максимальное сгибание, °	Дефицит разгибания, °	KSS, баллы	Lysholm, баллы	LEFS, баллы
До операции	130 [130;135]	62,5 [55;65]	41 [39;44]	58,5 [57;60]	15,5 [11;19]
После релиза	130 [130;135]	30 [25;35]	–	–	–
После демонтажа АВФ	30 [25;35]	0 [0;0]	55 [52;58]	59 [55;61]	25 [23;27]
По прошествии трех месяцев	55 [50;65]	0 [0;0]	65 [61;67]	74 [71;76]	49 [47;53]
По прошествии шести месяцев	85 [70;85]	0 [0;0]	81 [75;81]	85 [83;85]	66 [62;67]
По прошествии девяти месяцев	101 [85;110]	0 [0;0]	100,5 [87;103]	94 [90;99]	72 [71;74]
По прошествии 12 месяцев	115 [100;120]	0 [0;0]	103 [94;103]	99 [93;100]	74 [72;76]

При сравнительном анализе выявлено, что у пациентов с наличием предоперационного подвывиха голени кзади достоверно увеличивается длительность использования АВФ ($p < 0,05$) как за счет длительности разгибания, так и за счет фиксации (табл. 6). У пациентов с диагностированным до операции задним подвывихом голени отмечено статистически значимое ($p < 0,05$) ухудшение показателей величины максимального сгибания, а также функционального состояния по всем трем шкалам на сроке 12 месяцев с момента демонтажа АВФ по сравнению с теми пациентами, у которых вывих диагностирован не был (табл. 6).

Таблица 6

Сравнение результатов оценки различных показателей

Показатель	Оценка показателей, Med [Q1; Q3]			
	Основная группа		Группа сравнения	
	Без подвывиха (n = 23)	С подвывихом (n = 12)	Без подвывиха (n = 23)	С подвывихом (n = 8)
Период разгибания, дн.	19 [16;25]	25 [22;28]	22 [20;25]	32,5 [31;36]
Период фиксации, дн.	44 [42;43]	55 [53;55]	44 [42;46]	54,5 [54;55]
Период использования АВФ, дн.	44 [42;46]	86 [83;89]	92 [89;97]	74 [70;78]
Амплитуда движений (максимальное сгибание, °)				
После демонтажа	35 [32;37]	22 [20;25]	34 [30;35]	21 [20;22]
Через 6 мес.	85 [81;87]	61 [55;65]	80 [78;85]	56 [55;57]
Через 12 мес.	115 [110;120]	95 [93;100]	105 [90;95]	94 [100;112]
Амплитуда движений (дефицит разгибания, °)				
После демонтажа	0	0	0	0
Через 6 мес.	0	0	0	0 [0;5]
Через 12 мес.	0	0	0	0 [0;7]
Оценка по шкалам через 12 мес., баллы				
KSS	103 [102;103]	93 [92;94]	100 [94;102]	90 [90;92]
LYS	99 [99;100]	93 [92;95]	95 [94;99]	85 [85;87]
LEFS	75 [74;76]	71 [69;72]	74 [73;76]	69 [67;70]

Частота осложнений в основной группе составила 34,28 % (12 случаев), включая девять эпизодов (25,7 %) поверхностного воспаления мягких тканей вокруг чрескостных элементов (1 категория) без потери их стабильности. Воспалительный процесс купирован применением хлорамфениколовой

мази и пероральной антибактериальной терапией. В одном случае (2,85 %) у пациента диагностирован перелом в нижней трети бедра, из-за чего разгибание было временно приостановлено для выполнения перемонтажа АВФ и стабилизации перелома (2 категория). Нестабильность проксимальной опоры выявлена у одного (2,85 %) пациента, что потребовало проведения дополнительных чрескостных элементов для ее стабилизации (2 категория), после чего разгибание было продолжено. Инфицирование гематомы в области вмешательства зарегистрировано у одного (2,85 %) пациента, из-за чего также разгибание было временно приостановлено для выполнения ревизии, санации и дренирования инфекционного очага с последующим бактериологическим исследованием содержимого гематомы и подбором специфической антибиотикотерапии. После купирования гнойно-воспалительного процесса разгибание было продолжено (2 категория).

В сравнительной группе осложнения отмечены у 31,42 % пациентов (11 случаев): в 18,75 % (шесть случаев) зафиксировано воспаление мягких тканей вокруг чрескостных элементов (1 категория), купированное консервативно; в 15,63 % (пять случаев) отмечен незначительный задний подвывих голени при разгибании (2 категория), скорректированный перемещением мобильной опоры после завершения этапа разгибания. Статистически значимых различий в частоте осложнений между группами не выявлено ($p > 0,05$).

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ продолжительности различных этапов лечения в АВФ (табл. 3) выявил статистически значимое сокращение периода разгибания на 2,5 дня (9,8 %) в основной группе ($p < 0,05$). Данное различие, вероятно, обусловлено тем, что в основной группе коррекцию подвывиха ($n = 12$) проводили синхронно с разгибанием, в отличие от группы сравнения ($n = 8$), где коррекцию выполняли поэтапно, — сначала разгибание, затем устранение подвывиха путем изменения положения мобильной опоры по Илизарову. Данный факт также подтверждается тем, что при использовании ортопедического гексапода период разгибания у пациентов с подвывихом в среднем на семь дней меньше, чем у аналогичных пациентов в подгруппе сравнения (табл. 6).

Еще одним из возможных факторов может быть более быстрый темп разгибания вследствие менее выраженного болевого синдрома у пациентов, которым разгибание сустава выполняли при помощи ортопедического гексапода. К сожалению, точно подтвердить данный факт мы не можем, так как оценку по визуальной аналоговой шкале в данном исследовании мы не проводили. Но даже несмотря на то что период разгибания в основной группе был на 2,5 дня меньше, общая длительность применения АВФ в сравниваемых группах не имела статистически значимых отличий. Это свидетельствует об отсутствии весомых преимуществ использования одного типа аппарата перед другим по длительности лечения пациента.

После демонтажа АВФ было зарегистрировано снижение величины максимального сгибания на 76 % в основной и на 72 % в контрольной группе в сравнении с исходными значениями. Данный факт может быть обусловлен тем, что продолжительная фиксация, направленная на поддержание полного разгибания коленного сустава, способствует развитию иммобилизационной разгибательной контрактуры. Согласно данным И.Л. Крупко, ограничение движений до 10 недель классифицируется как фаза нестойкой контрактуры [28]. Это объясняет возможность успешного консервативного лечения, о чем свидетельствуют данные динамического наблюдения, демонстрирующие постепенное улучшение функции сустава в ходе реабилитационных мероприятий (табл. 2, 4, 5).

Анализ показателей максимального сгибания не выявил достоверных межгрупповых различий на всех этапах исследования. Однако у всех пациентов с сопутствующим предоперационным подвывихом голени отмечены более низкие показатели функции. Вероятно, причиной этому является более длительная фиксация коленного сустава у данных пациентов, что непосредственно отразилось на функции сустава.

Анализ дефицита разгибания не выявил достоверных различий между группами. Полученные данные свидетельствуют о сопоставимой эффективности разгибания сустава при использовании ортопедического гексапода и аппарата Илизарова. Тем не менее, у одного пациента основной группы (до 10°) и трех пациентов в группе сравнения (у двоих 7° и у одного 8°) зафиксированы случаи рецидива. У этих пациентов контрактура сопровождалась задним подвывихом голени. Из данных анамнеза известно, что ни один из этих трех пациентов с сопутствующим предоперационным подвывихом после демонтажа АВФ не соблюдал должным образом предписанный трехнедельный период гипсовой иммобилизации. Можно предположить, что именно пренебрежение иммобилизацией на раннем этапе после демонтажа АВФ способствовало возникновению феномена «рикошета». Однако точно определить причину затруднительно из-за ретроспективной оценки незначительного рецидива контрактуры у указанных пациентов на сроке спустя шесть месяцев с момента демонтажа АВФ.

Анализ показал достоверно более высокие средние баллы по шкалам KSS и Lysholm через шесть и 12 месяцев после демонтажа АВФ в основной группе. В шкалах-опросниках KSS и Lysholm одним из оценочных критериев является стабильность коленного сустава. Сравнительный анализ анкет шкалы KSS (заполненных пациентами и врачом) выявил, что снижение суммарных баллов в контрольной группе преимущественно связано именно с симптомами нестабильности коленного сустава. Пять пациентов в графе «наличие стабильности сустава» опросника Lysholm отметили, что испытывают затруднения при интенсивных физических нагрузках, связанные с нестабильностью сустава. Проанализировав истории болезни и данные лучевых методов исследования, мы пришли к выводу, что нестабильность была обусловлена перерастяжением капсульно-связочных структур из-за неточного позиционирования осевого шарнира относительно оси сгибания – разгибания. У этих пяти пациентов из группы сравнения мы наблюдали незначительный подвывих голени после завершения этапа разгибания. Несмотря на то что подвывих голени этим пациентам был устранен еще на этапе пребывания в стационаре, избежать симптомов нестабильности вследствие неправильного позиционирования осевых шарниров все же не удалось. При этом общая функция нижней конечности, оцененная по шкале LEFS, не продемонстрировала значимых межгрупповых различий на всех этапах наблюдений.

Данные систематического обзора, посвященного использованию АВФ при контрактурах коленного сустава, демонстрируют, что наиболее часто используемым аппаратом является аппарат Илизарова с одноосевым типом шарнира [18]. В подавляющем большинстве работ (семь из восьми) упоминается о применении АВФ именно при сгибательных контрактурах коленного сустава [18]. Также следует отметить, что не всем пациентам перед установкой АВФ выполняли процедуру мягкотканного релиза. Согласно исследованию J.E. Herzenberg et al., при исходной сгибательной контрактуре около 60° задний релиз был проведен лишь у восьми из 14 пациентов [21]. Авторы не представили детали техники выполнения релиза и величины разгибания, достигнутые после его выполнения. Средняя продолжительность фиксации АВФ составила 3,5 месяца (диапазон – 1,25–8,5 месяцев), что превышает показатели в наших группах и, возможно, связано с отсутствием релиза. Среди восьми пациентов, перенесших релиз, результаты распределились следующим образом: отличные (дефицит разгибания < 5°) – два случая, хорошие (6–15°) – два случая, удовлетворительные (16–29°) – два случая, неудовлетворительные (> 30°) – два случая. Средний остаточный дефицит разгибания (16°) превышал дефицит разгибания, отмеченный в обеих группах данного исследования. Среди осложнений, упомянутых авторами, встречаются случаи воспаления мягких тканей около чрескостных элементов (1 категория) без уточнения количества случаев.

В исследовании H. Valci et al. описаны результаты комбинированного лечения сгибательных контрактур коленного сустава с использованием аппарата Илизарова и заднего релиза (шесть из шести случаев) [14]. Техника релиза включала Z-образное удлинение сухожилий медиальной группы сгибателей, удлинение сухожилия двуглавой мышцы бедра (без уточнения методики), релиз головок икроножных мышц и суставной капсулы (без детализации). Авторы не указали величину достигнутого разгибания непосредственно после релиза. Средний срок наблюдения составил восемь лет (5,5–10), а продолжительность фиксации АВФ – 4,4 месяца (2,5–10), что превышает наши показатели. Исходный дефицит разгибания в среднем составлял 45° (30–75°), через восемь лет наблюдения – 10° (5–15°), что также выше, чем в нашем исследовании. Осложнения включали воспаление мягких тканей вокруг чрескостных элементов (1 категория) – один случай (16,6%), послеоперационный подвывих голени (2 категория) – один случай (16,6%). Сравнение частоты осложнений с нашими данными не проводилось ввиду малой выборки ($n = 6$) в указанном исследовании.

Среди анализируемых зарубежных публикаций только в исследовании E. Vulcano et al. описано применение ортопедического гексапода (Taylor Spatial Frame), однако авторы не предоставили ни фотодокументации использования конструкции, ни данных о работе с компьютерной программой [29]. Согласно данным исследования, задний релиз был выполнен у 19 из 21 пациента (90,5%) до монтажа АВФ, однако технические детали процедуры не описаны. Период наблюдения в среднем составил 13 месяцев (10–18 месяцев). Исходный дефицит разгибания в среднем равнялся 44° (диапазон – 10–120°), при завершающем осмотре – 10° (0–50°), что превышает аналогичные показатели в обеих наших группах. Средний период применения АВФ достигал трех месяцев. Среди зарегистрированных осложнений авторы отметили воспаление в области проведения чрескостных элементов у 15 (71%) пациентов (1 категория), перелом бедра у одного пациента (4,8%) и полный рецидив контрактуры у двух (9,5%) пациентов (40° у одного и 45° у второго) из-за отсутствия медикаментозного контроля спастичности. В обеих группах нашего исследования наблюдается существенно меньшая частота осложнений.

В исследовании J.P. Damsin et al., где задний релиз выполнили лишь у трех из 13 пациентов, и S. Huang, где релиз проводили у двух из 10 пациентов, мы рассматривали исключительно осложнения, возникшие в процессе разгибания в АВФ [30, 31]. Так, J.P. Damsin et al. зафиксировали: один случай (7,6%) невропатии малоберцового нерва, три случая (23%) импрессионного перелома, три случая (23%) подвывиха голени. S. Huang отметил два случая (20%) подвывиха голени, один случай (10%) нестабильно-

сти коленного сустава. В нашем исследовании незначительный подвывих голени был у пяти пациентов (15,6 %) в группе с аппаратом Илизарова, что в процентном соотношении меньше, чем в работах J.P. Damsin и S. Huang. Однако из-за различий в численности групп мы полагаем, что сравнительный анализ частоты осложнений не может считаться полностью достоверным.

В исследовании J. Zhai et al. отсутствовали данные как о выполнении мягкотканного релиза, так и о возможных осложнениях при разгибании в АВФ, в связи с чем мы не осуществляли сравнения с данной работой [32].

По сравнению с результатами приведённых выше исследований, в обеих наших группах общая продолжительность использования АВФ оказалась значительно (в 1,4 раза, в среднем на 28 дней) меньше. При анализе функциональных исходов зарубежные авторы также отмечают более низкие показатели. Данное отличие можно связать с применением в нашем исследовании более эффективной методики заднего релиза. В ходе мягкотканного этапа мы достигали максимально возможного разгибания коленного сустава, ограниченного лишь натяжением сосудисто-нервного пучка. Таким образом, в основной группе после проведения мягкотканного этапа среднее достигнутое разгибание коленного сустава составило 45 % (41–50 %) от исходного значения, тогда как в группе сравнения после выполнения заднего релиза данный показатель равнялся 53 % (38–60 %). Что касается осложнений, наблюдавшихся у пациентов обеих подгрупп нашего исследования, их частота в целом не превышает показатели, описанные в литературных источниках, а в сравнении с отдельными авторами даже оказывается существенно ниже.

В своей работе мы придерживались классификации осложнений J. Caton, где основополагающей целью является оценка влияния возникшего осложнения на конечный результат [24]. Используя данную классификацию нам было важно указать не тяжесть возникшего осложнения, а его категорию, чтобы определить, повлияло ли осложнение на конечный результат. И по влиянию на конечный результат значимых различий в данном исследовании мы не обнаружили.

Исходя из полученных результатов исследования, безусловно, оба типа аппарата являются эффективным дополнением к операции заднего релиза при лечении стойких сгибательных контрактур коленного сустава. При разгибательных контрактурах коленного сустава доказано, что использование ортопедического гексапода позволяет достичь более высоких функциональных показателей при меньшей длительности использования АВФ [20]. В случае сгибательных контрактур при соблюдении правильной техники операции и правильном позиционировании шарнира на оси сгибания-разгибания, применение ортопедического гексапода не имеет явных преимуществ перед аппаратом Илизарова.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При сравнении амплитуды движений коленного сустава в обеих группах на всех сроках наблюдения отмечены сопоставимые показатели. Функция коленного сустава, оцененная по специализированным шкалам, была лучше в основной группе, при этом результаты общей функции нижней конечности в обеих группах не отличались на всех сроках наблюдения. Использование ортопедического гексапода позволяет более быстро достичь разгибания сустава, однако сравнительный анализ общего периода использования АВФ (от момента монтажа до демонтажа) доказал отсутствие преимуществ одного типа аппарата над другим. Полученные результаты позволяют заключить, что применение обоих типов АВФ эффективно при лечении пациентов со сгибательными контрактурами коленного сустава. При сгибательных контрактурах коленного сустава, сопряженных с подвывихом голени, более предпочтительным является использование ортопедического гексапода из-за возможности обеспечения одновременного разгибания и устранения подвывиха голени и, как следствие, меньшей длительности периода разгибания.

Конфликт интересов. Л.Н. Соломин — директор ООО «Орто-СУВ», в котором был разработан ортопедический гексапод «Орто-СУВ».

Источник финансирования. Исследование выполнено без спонсорской поддержки.

Информированное согласие получено авторами на проведение обследования, лечение, сбор, хранение и анализ данных медицинской документации с использованием в научных и образовательных целях, а также их публикацию. Авторы подтверждают отсутствие в статье данных, не подлежащих публикации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Richards C, Higginson JS. Knee contact force in subjects with symmetrical OA grades: differences between OA severities. *J Biomech.* 2010;43(13):2595-2600. doi: 10.1016/j.jbiomech.2010.05.006.
2. Attias M, Chevalley O, Bonnefoy-Mazure A, et al. Effects of contracture on gait kinematics: A systematic review. *Clin Biomech (Bristol)*. 2016;33:103-110. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2016.02.017.
3. Sendroy-Terrill M, Whiteneck GG, Brooks CA. Aging with traumatic brain injury: cross-sectional follow-up of people receiving inpatient rehabilitation over more than 3 decades. *Arch Phys Med Rehabil.* 2010;91(3):489-497. doi: 10.1016/j.apmr.2009.11.011.
4. Wissel J, Verrier M, Simpson DM, et al. Post-stroke spasticity: predictors of early development and considerations for therapeutic intervention. *PM R.* 2015;7(1):60-67. doi: 10.1016/j.pmrj.2014.08.946.

5. Огородова И.И., Загороднева В.И., Огородов И.А./, Белая Н.Н. Морфологические изменения мышечного аппарата детей, страдающих спастическими формами ДЦП, при различных подходах к лечению. *Детская и подростковая реабилитация*. 2014;(1):24-30.
6. Зиновьева ОЕ, Головачева ВА. Вопросы патогенеза и лечения постинсультной спастичности. *Медицинский совет*. 2016;(8):63-67. doi: 10.21518/2079-701X-2016-8-63-67.
7. Vahedi H, Khlopas A, Szymczuk VL, et al. Treatment with posterior capsular release, botulinum toxin injection, hamstring tenotomy, and peroneal nerve decompression improves flexion contracture after total knee arthroplasty: minimum 2-year follow-up. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2020;28(8):2706-2714. doi: 10.1007/s00167-020-05939-0.
8. Chung CY, Kwon SS, Park MS, et al. Surgical outcomes after single event multilevel surgery in cerebral palsy patients with mid-stance knee hyperextension. *Gait Posture*. 2020;77:1-5. doi: 10.1016/j.gaitpost.2020.01.005.
9. Bozinovski Z, Popovski N. Operative treatment of the knee contractures in cerebral palsy patients. *Med Arch*. 2014;68(3):182-183. doi: 10.5455/medarh.2014.68.182-183.
10. Jones S, Al Hussainy HA, Ali F, et al. Davies AG. Distal hamstring lengthening in cerebral palsy: the influence of the proximal aponeurotic band of the semimembranosus. *J Pediatr Orthop B*. 2006;15(2):104-108. doi: 10.1097/01.bpb.0000179272.61726.a0.
11. Sung KH, Lee J, Chung CY, et al. Factors influencing outcomes after medial hamstring lengthening with semitendinosus transfer in patients with cerebral palsy. *J Neuroeng Rehabil*. 2017;14(1):83. doi: 10.1186/s12984-017-0296-0.
12. Karol LA, Chambers C, Popejoy D, Birch JG. Nerve palsy after hamstring lengthening in patients with cerebral palsy. *J Pediatr Orthop*. 2008;28(7):773-776. doi: 10.1097/BPO.0b013e318186bdbb.
13. Gaurav K, Vilas J. A new approach to the management of fixed flexion deformity of the knee using Ilizarov's principle of distraction histogenesis: a preliminary communication. *Int J Low Extrem Wounds*. 2010;9(2):70-73. doi: 10.1177/1534734610371559.
14. Balci HI, Kocaoglu M, Eralp L, Bilen FE. Knee flexion contracture in haemophilia: treatment with circular external fixator. *Haemophilia*. 2014;20(6):879-883. doi: 10.1111/hae.12478.
15. Yadhkar S, Grover R, Kaur P, et al. Soft-tissue origin joint contractures treated with the Ilizarov fixation method. *Genij Ortopedii*. 2024;30(2):255-262. doi:10.18019/1028-4427-2024-30-2-255-262.
16. Sommers MB, Fitzpatrick DC, Kahn KM, et al. Hinged external fixation of the knee: intrinsic factors influencing passive joint motion. *J Orthop Trauma*. 2004;18(3):163-169. doi: 10.1097/00005131-200403000-00007.
17. Рохоев С.А., Соломин Л.Н., Старчик Д.А. Разработка шаблона мгновенных центров вращения коленного сустава (экспериментальное исследование). *Гений ортопедии*. 2022;28(4):554-558. doi: 10.18019/1028-4427-2022-28-4-554-558.
18. Рохоев С.А., Соломин Л.Н. Использование метода чрескостного остеосинтеза при лечении контрактур коленного сустава у взрослых пациентов: обзор литературы. *Травматология и ортопедия России*. 2021;27(1):185-197. doi: 10.21823/2311-2905-2021-27-1-185-197.
19. Рохоев С.А., Чугаев Д.В., Соломин Л.Н. Сравнительная оценка результатов использования аппарата Илизарова и ортопедического гексапода Орто-СУВ при лечении разгибательных контрактур коленного сустава. *Травматология и ортопедия России*. 2022;28(2):7-19. doi: 10.17816/2311-2905-1756.
20. Соломин Л.Н., Щепкина Е.А., Виленский В.А. и др. Коррекция деформаций бедренной кости по Илизарову и основанным на компьютерной навигации аппаратом «Орто-СУВ». *Травматология и ортопедия России*. 2011;17(3):32-39. doi: 10.21823/2311-2905-2011-0-3-32-39.
21. Herzenberg JE, Davis JR, Paley D, Bhave A. Mechanical distraction for treatment of severe knee flexion contractures. *Clin Orthop Relat Res*. 1994;(301):80-88.
22. Волков М.В., Оганесян О.В. *Восстановление формы и функции суставов и костей (аппаратами авторов)*. Москва: Медицина; 1986:256.
23. Hollister AM, Jatana S, Singh AK, et al. The axes of rotation of the knee. *Clin Orthop Relat Res*. 1993;290:259-268.
24. Caton J. Treatment of leg length discrepancies and short stature in children and adolescents. *Rev Chir Orthop*. 1991;77 (Suppl. I):31-80. (In Franc.)
25. Kettelkamp DB, Chao EY. A method for quantitative analysis of medial and lateral compression forces at the knee during standing. *Clin Orthop Relat Res*. 1972;83:202-213. doi: 10.1097/00003086-197203000-00037.
26. Tegner Y, Lysholm J. Rating systems in the evaluation of knee ligament injuries. *Clin Orthop Relat Res*. 1985;(198):43-49.
27. Dingemans SA, Kleipool SC, Mulders MAM, et al. Normative data for the lower extremity functional scale (LEFS). *Acta Orthop*. 2017;88(4):422-426. doi: 10.1080/17453674.2017.1309886.
28. Кручко И.Л. *Руководство по травматологии и ортопедии. Кн. 2. Ортопедия*. Ленинград: Медицина; 1975:270.
29. Vulcano E, Markowitz JS, Fragomen AT, Rozbruch SR. Gradual correction of knee flexion contracture using external fixation. *J Limb Lengthen Reconstr*. 2016;2(2):102-107. doi: 10.4103/2455-3719.190712.
30. Damsin JP, Ghanem I. Treatment of severe flexion deformity of the knee in children and adolescents using the Ilizarov technique. *J Bone Joint Surg Br*. 1996;78(1):140-144.
31. Huang SC. Soft tissue contractures of the knee or ankle treated by the Ilizarov technique. High recurrence rate in 26 patients followed for 3-6 years. *Acta Orthop Scand*. 1996;67(5):443-449. doi: 10.3109/17453679608996665.
32. Zhai J, Weng X, Zhang B, et al. Management of knee flexion contracture in haemophilia with the Ilizarov technique. *Knee*. 2019;26(1):201-206. doi: 10.1016/j.knee.2018.08.006.

Статья поступила 16.09.2025; одобрена после рецензирования 23.12.2025; принята к публикации 09.02.2026.

The article was submitted 16.09.2025; approved after reviewing 23.12.2025; accepted for publication 09.02.2026.

Информация об авторах:

Леонид Николаевич Соломин — доктор медицинских наук, профессор, ведущий научный сотрудник, solomin.leonid@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3705-3280>;

Сайгидула Абдурахманович Рохоев — врач — травматолог-ортопед, 09saga@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4369-9619>.

Information about the authors:

Leonid N. Solomin — Doctor of Medical Sciences, Professor, Leading Researcher, solomin.leonid@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3705-3280>;

Saigidula A. Rokhoviev — orthopaedic surgeon, 09saga@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4369-9619>.

Вклад авторов:

Соломин Л.Н. — вклад в разработку концепции и дизайна исследования, работа над окончательным вариантом рукописи.

Рохоев С.А. — сбор, анализ и интерпретация данных, написание рукописи.



Сравнительная эффективность хирургических методов коррекции синдрома «висящей стопы» при изолированной нейропатии малоберцового нерва

А.А. Григорян¹, В.М. Абу Заалан^{2✉}, Л.Г. Макинян^{1,2}, А.М. Маннанов², Ч. Молдамырзаев¹, М.А. Иманкулов¹

¹ Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия

² Городская клиническая больница им. В.П. Демикова, Москва, Россия

Автор, ответственный за корреспонденцию: Вессам Мусса Абу Заалан, wsameeexx@gmail.com

Аннотация

Введение. Синдром «висящей стопы» при изолированной нейропатии малоберцового нерва существенно ограничивает двигательную активность пациентов и снижает качество жизни. Необходимы объективные данные о сравнительной эффективности хирургических методик при длительной денервации мышц, когда прямые нервные вмешательства теряют эффективность.

Цель работы — определение оптимальной хирургической тактики восстановления функции тыльного сгибания стопы при изолированном поражении малоберцового нерва путем сравнительного анализа результатов тенодеза длинного разгибателя пальцев и транспозиции задней большеберцовой мышцы.

Материалы и методы. Проведен проспективный анализ лечения 84 пациентов с изолированной нейропатией малоберцового нерва, подтвержденной методом электронейромиографии, длительностью более 12 месяцев. В первую группу включены 42 пациента, которым выполняли тенодез сухожилия длинного разгибателя пальцев к переднему краю большеберцовой кости по модифицированной методике Ламбринуди. Вторую группу составили 42 человека, перенесших транспозицию задней большеберцовой мышцы через межкостную мембрану с фиксацией к латеральной клиновидной кости по технике Bridle. Функциональную оценку осуществляли с использованием шкалы AOFAS, гониометрии амплитуды тыльного сгибания, динамометрии силы тыльных сгибателей и стабилметрического анализа параметров походки на контрольных точках три, шесть, 12 и 24 месяца после операции. Статистическую обработку проводили с применением параметрических и непараметрических критериев при уровне значимости $< 0,05$.

Результаты. Межгрупповое сравнение выявило статистически значимое преимущество транспозиции как по шкале AOFAS ($p = 0,003$), так и по амплитуде движений ($p = 0,001$). Динамометрия показала восстановление силы тыльного сгибания до 62,4 % от контралатеральной конечности в первой группе и до 78,9 % во второй группе ($p < 0,001$). Стабилметрический анализ зарегистрировал сокращение длины траектории центра давления на 34,8 % при тенодезе и на 51,6 % при транспозиции относительно дооперационных значений. Частота осложнений составила 14,3 % после тенодеза и 9,5 % после транспозиции ($p = 0,386$).

Обсуждение. Превосходство транспозиции задней большеберцовой мышцы объясняется созданием активной мышечной тяги в отличие от пассивной стабилизации при тенодезе, что обеспечивает более физиологичное восстановление двигательной функции. Достигнутое восстановление силы и стабилметрических показателей коррелирует с международными данными о высокой эффективности активных мышечных транспозиций при длительной денервации. Комплексная послеоперационная реабилитация с применением современных технологий биологической обратной связи способствует оптимизации функциональных результатов обеих методик.

Заключение. Транспозиция задней большеберцовой мышцы демонстрирует статистически значимое и клинически существенное преимущество над тенодезом длинного разгибателя пальцев в восстановлении функции тыльного сгибания стопы при изолированной нейропатии малоберцового нерва длительностью более 12 месяцев. Необходимость интеграции хирургического лечения с персонализированными реабилитационными программами подтверждается различиями в восстановлении не только локальной функции голеностопного сустава, но и общих биомеханических параметров походки.

Ключевые слова: синдром висящей стопы, нейропатия малоберцового нерва, транспозиция задней большеберцовой мышцы, тенодез длинного разгибателя пальцев

Для цитирования: Григорян А.А., Абу Заалан В.М., Макинян Л.Г., Маннанов А.М., Молдамырзаев Ч., Иманкулов М.А. Сравнительная эффективность хирургических методов коррекции синдрома «висящей стопы» при изолированной нейропатии малоберцового нерва. *Гений ортопедии*. 2026;32(2):162-171. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-2-162-171.



Comparative efficacy of surgical methods in the treatment of foot drop associated with isolated peroneal nerve neuropathy

A.A. Grigoryan¹, V.M. Abu Zaalan^{2✉}, L.G. Makinyan^{1,2}, A.M. Mannanov², Ch. Moldamyrzaev¹, M.A. Imankulov¹

¹ Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russian Federation

² City Clinical Hospital named after V.P. Demikhov, Moscow, Russian Federation

Corresponding author: Abu Zaalan Vessam Moussa, wsameeexx@gmail.com

Abstract

Introduction Footdrop secondary to isolated peroneal nerve neuropathy is associated with limited mobility affecting the quality of life. Objective data on comparative efficacy of surgical techniques are needed for long-term muscle denervation with nerve interventions being ineffective.

The **objective** was to determine the optimal surgical strategy for restoring dorsiflexion of the foot in case of isolated injury to the peroneal nerve through comparative analysis of the results of tenodesis of the extensor digitorum longus and posterior tibial muscle transfer.

Material and methods Outcomes of 84 patients with isolated peroneal nerve neuropathy confirmed by electroneuromyography and lasting more than 12 months were prospectively analyzed. The first group included 42 patients treated with tenodesis of the extensor digitorum longus tendon to the anterior border of the tibia using a modified Lambrinudi technique. The second group consisted of 42 patients who underwent transfer of the posterior tibial muscle through the interosseous membrane with fixation to the lateral cuneiform bone using the Bridle technique. Functional assessment was produced using the AOFAS score, measuring dorsiflexion amplitude with goniometry, ankle dorsiflexor strength with dynamometer and stabilometric analysis of gait parameters at checkpoints of three, six, 12, and 24 months after surgery. Statistical processing was performed using parametric and nonparametric criteria at a significance level of < 0.05 .

Results Between-the-group comparison revealed a statistically significant advantage of the muscle transfer evaluated with AOFAS ($p = 0.003$) and range of motion measurements ($p = 0.001$). Dynamometry showed dorsiflexion strength restored to 62.4 % of the contralateral limb in the first group and to 78.9 % in the second group ($p < 0.001$). Stabilometric analysis recorded a reduction in the center-of-pressure total trajectory length by 34.8 % with tenodesis and by 51.6 % with muscle transposition relative to preoperative values. The complication rate was 14.3% after tenodesis and 9.5 % after transfer ($p = 0.386$).

Discussion The superiority of the posterior tibial transfer can be explained by active muscle traction, as opposed to passive stabilization with tenodesis, which ensures a more physiological restoration of motor function. The strength and stabilometric parameters restored correlates with international data on the high effectiveness of active muscle transpositions during long-term denervation. Comprehensive postoperative rehabilitation using modern biofeedback technologies helps optimize the functional results of both techniques.

Conclusion Tibialis posterior muscle transfer demonstrated a statistically and clinically significant advantage over tenodesis of the extensor digitorum longus in restoration of the dorsiflexion function in patients with isolated peroneal nerve neuropathy lasting more than 12 months. The need to integrate personalized rehabilitation programs into the surgical treatment was supported by differences in the recovered ankle function and biomechanical gait parameters.

Keywords: drop foot, common peroneal nerve neuropathy, posterior tibial muscle transfer, tenodesis of the extensor digitorum longus, tendon transfer, functional recovery, stabilometry, comparative study

For citation: Grigoryan AA, Abu Zaalan VM, Makinyan LG, Mannanov AM, Moldamyrzaev Ch, Imankulov MA. Comparative efficacy of surgical methods in the treatment of foot drop associated with isolated peroneal nerve neuropathy. *Genij Ortopedii*. 2026;32(2):162-171. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-2-162-171.

ВВЕДЕНИЕ

Нейропатия малоберцового нерва с развитием синдрома «висящей стопы» представляет актуальную проблему современной ортопедии, существенно ограничивая функциональные возможности пациентов и значительно снижая качество их жизни [1]. Анатомические особенности расположения малоберцового нерва в области головки малоберцовой кости обуславливают его высокую уязвимость к компрессионным воздействиям различной этиологии, что подтверждается данными эпидемиологических исследований о частоте поражения в данной локализации [2].

Современные исследования демонстрируют, что при длительности денервации более 12 месяцев эффективность прямых нейрореконструктивных вмешательств значительно снижается вследствие развития необратимых структурных изменений в мышечной ткани и фиброзных процессов в денервированных мышцах [3]. В таких случаях сухожильные транспозиции становятся методом выбора для восстановления функции тыльного сгибания стопы.

Современные хирургические подходы включают различные варианты сухожильных транспозиций, среди которых наиболее распространены тенodes длинного разгибателя пальцев и транспозиция задней большеберцовой мышцы через межкостную мембрану [4]. Однако опубликованные исследования демонстрируют противоречивые данные относительно сравнительной эффективности этих методик, что обусловлено преимущественно ретроспективным характером работ, небольшими размерами выборок и отсутствием стандартизированных критериев оценки функциональных результатов [5]. Недостаток прямых сравнительных исследований с использованием объективных методов функциональной оценки затрудняет формирование доказательных клинических рекомендаций.

Проведения настоящего исследования обусловлено потребностью в получении объективных данных о сравнительной эффективности двух наиболее распространенных методик сухожильной коррекции синдрома «висящей стопы». Комплексная оценка функциональных результатов с использованием валидированных шкал, инструментальных методов измерения силы и амплитуды движений, а также современных стабилметрических технологий позволяет получить многостороннюю характеристику эффективности хирургического лечения. Анализ не только непосредственных результатов операций, но и отдаленных исходов на протяжении двухлетнего периода наблюдения обеспечивает оценку стабильности достигнутого улучшения и выявление потенциальных отсроченных осложнений.

Цель работы — определение оптимальной хирургической тактики восстановления функции тыльного сгибания стопы при изолированном поражении малоберцового нерва путем сравнительного анализа результатов тенодеза длинного разгибателя пальцев и транспозиции задней большеберцовой мышцы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводили на базе отделения реконструктивной хирургии в период с января 2018 г. по декабрь 2023 г.

Критерии включения: возраст от 18 до 65 лет; длительность нейропатии более 12 месяцев; изолированная нейропатия малоберцового нерва, подтвержденная методом электронейромиографии; отсутствие эффекта от консервативной терапии в течение минимум шести месяцев, информированное согласие на участие в исследовании.

Критерии невключения: множественные повреждения нервов нижней конечности; сопутствующие ортопедические заболевания стопы и голеностопного сустава; системные нейромышечные заболевания; тяжелая соматическая патология в стадии декомпенсации; психические расстройства, препятствующие участию в исследовании; отказ от участия или нарушение протокола наблюдения.

Способ формирования выборки осуществляли методом сплошного отбора среди пациентов, соответствующих критериям включения. Дизайн исследования представлял собой проспективное сравнительное когортное исследование с параллельными группами.

В исследование включено 84 пациента, средний возраст — $(41,3 \pm 7,8)$ года, соотношение мужчин и женщин — 1,4:1. Первую группу составили 42 пациента, которым выполняли тенodes сухожилия длинного разгибателя пальцев к переднему краю большеберцовой кости по модифицированной методике Ламбринуди. Во вторую группу включены 42 пациента, перенесших транспозицию задней большеберцовой мышцы через межкостную мембрану с фиксацией к латеральной клиновидной кости по технике Bridle.

Функциональная оценка проведена с использованием шкалы AOFAS для голеностопного сустава и заднего отдела стопы, которая оценивает болевой синдром, функциональные возможности и выравнивание стопы по 100-балльной шкале. Измерения амплитуды тыльного сгибания прово-

дили стандартным гониометром в положении пациента лежа на спине с фиксированной голенью, при этом измеряли максимальный угол между продольной осью стопы и передней поверхностью голени.

Динамометрию силы тыльных сгибателей выполняли на аппарате MicroFET2 (Hoggan Health Industries) с измерением силы в кг при максимальном изометрическом сокращении в положении сидя с согнутой под прямым углом голенью, результаты выражали в % от силы контралатеральной конечности.

Стабилометрическое исследование проводили на платформе Стабилан-01-2 (ОКБ «Ритм») в статическом режиме с регистрацией колебаний центра давления при стоянии с открытыми глазами в течение 30 сек. Анализировали длину траектории центра давления в мм, площадь статокинезиограммы в мм², средние квадратические отклонения во фронтальной и сагиттальной плоскостях, коэффициент Ромберга. Контрольные точки наблюдения установлены через три, шесть, 12 и 24 месяца после операции.

Статистическую обработку данных производили с помощью пакета анализа данных IBM SPSS Statistics версии 26.0. Проверку нормальности распределения осуществляли с использованием критерия Шапиро – Уилка при объеме выборки менее 50 наблюдений и критерия Колмогорова – Смирнова при большем объеме выборки. При нормальном распределении данных применяли параметрический t-критерий Стьюдента для независимых выборок, при отклонении от нормального распределения использовали непараметрический критерий Манна – Уитни. Количественные характеристики показателей в выборочных совокупностях представляли в виде среднего арифметического и стандартного отклонения при нормальном распределении или медианы и интерквартильного размаха при распределении, отличном от нормального. Для оценки однородности групп рассчитывали коэффициент вариации как отношение стандартного отклонения к среднему арифметическому, выраженное в процентах. Уровень статистической значимости принят за $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Дооперационные показатели в группах статистически не различались, что обеспечивало корректность последующего сравнительного анализа. Средний балл AOFAS составлял ($52,4 \pm 6,1$) в первой группе и ($51,8 \pm 5,9$) во второй группе при $p = 0,614$. Амплитуда активного тыльного сгибания находилась в пределах минус ($12,3 \pm 3,4$)° и минус ($11,9 \pm 3,7$)° соответственно (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение дооперационных показателей между группами

Показатель	Группа тенодеза ($n = 42$)	Группа транспозиции ($n = 42$)	p
Балл AOFAS	$52,4 \pm 6,1$	$51,8 \pm 5,9$	0,614
Амплитуда тыльного сгибания (°)	$-12,3 \pm 3,4$	$-11,9 \pm 3,7$	0,738
Сила тыльного сгибания (% от контралатеральной)	$32,1 \pm 8,7$	$33,4 \pm 9,2$	0,523
Длина траектории центра давления (мм)	524 ± 87	518 ± 92	0,756
Площадь статокинезиограммы (мм ²)	272 ± 61	268 ± 58	0,782
СКО во фронтальной плоскости (мм)	$4,8 \pm 1,2$	$4,9 \pm 1,3$	0,698
СКО в сагиттальной плоскости (мм)	$5,1 \pm 1,4$	$5,2 \pm 1,5$	0,724

Примечание: балл AOFAS – низкая вариабельность ($CV \approx 11-12\%$ в обеих группах); амплитуда тыльного сгибания – умеренная вариабельность ($CV \approx 28-31\%$); стабилометрические показатели – умеренная вариабельность ($CV \approx 15-20\%$).

Через 12 месяцев в группе тенодеза отмечено увеличение балла AOFAS до ($78,6 \pm 8,2$), что на 26,2 балла превысило исходный уровень при $p < 0,001$. Амплитуда тыльного сгибания достигла ($8,4 \pm 4,1$)°, демонстрируя прирост 20,7°. Во второй группе функциональный результат оказался более выраженным: балл AOFAS составил ($86,3 \pm 6,7$) с приростом 34,5 балла при $p < 0,001$, а амплитуда движений увеличилась до ($14,8 \pm 3,9$)° с общим улучшением на 26,7°.

Межгрупповое сравнение выявило статистически значимое преимущество транспозиции задней большеберцовой мышцы как по шкале AOFAS при $p = 0,003$, так и по амплитуде движений при $p = 0,001$. Динамометрия показала восстановление силы тыльного сгибания до ($62,4 \pm 11,3$) % от контралатеральной конечности в первой группе и до ($78,9 \pm 9,6$) % во второй группе при $p < 0,001$ (табл. 2).

При стабилометрическом исследовании зарегистрировано статистически значимое улучшение показателей контроля баланса в обеих группах. Длина траектории центра давления сократилась на 34,8 % при тенодезе и на 51,6 % при транспозиции относительно дооперационных значений. Площадь статокинезиограммы уменьшилась на 28,3 % в первой группе и на 42,7 % во второй группе. Средние квадратические отклонения во фронтальной плоскости снизились с ($4,8 \pm 1,2$) мм до ($3,2 \pm 0,9$) мм в группе тенодеза и с ($4,9 \pm 1,3$) мм до ($2,6 \pm 0,8$) мм в группе транспозиции.

Функциональные результаты через 12 месяцев

Показатель	Группа тенодеза (n = 42)	Группа транспозиции (n = 42)	p
АOFAS (баллы)	78,6 ± 8,2	86,3 ± 6,7	0,003
Прирост АOFAS (баллы)	26,2	34,5	< 0,001
Амплитуда тыльного сгибания (°)	8,4 ± 4,1	14,8 ± 3,9	0,001
Сила тыльного сгибания (% от контралатеральной)	62,4 ± 11,3	78,9 ± 9,6	< 0,001
Длина траектории центра давления (мм)	342 ± 67	251 ± 48	< 0,001
Площадь статокинезиограммы (мм ²)	195 ± 44	154 ± 32	< 0,001
СКО во фронтальной плоскости (мм)	3,2 ± 0,9	2,6 ± 0,8	0,003
СКО в сагиттальной плоскости (мм)	3,6 ± 1,1	2,9 ± 0,7	0,002

Примечание: балл АOFAS — умеренная вариабельность (CV ≈ 10 % в группе тенодеза, CV ≈ 8 % в группе транспозиции); амплитуда тыльного сгибания — высокая вариабельность (CV ≈ 49 % в группе тенодеза, CV ≈ 26 % в группе транспозиции); сила тыльного сгибания — умеренная вариабельность (CV ≈ 18 % и 12 % соответственно); стабилометрические показатели — низкая вариабельность (CV ≈ 12–20 %).

Через 24 месяца наблюдения результаты в обеих группах стабилизировались с незначительным дополнительным улучшением. В группе транспозиции балл АOFAS достиг (88,1 ± 5,9), амплитуда тыльного сгибания составила (15,6 ± 3,2)°. В группе тенодеза соответствующие показатели составили (79,8 ± 7,8) балла и (9,1 ± 3,8)°. Отличные и хорошие результаты по критериям АOFAS получены у 73,8 % пациентов первой группы и у 88,1 % второй группы при $p = 0,047$.

Стабилометрические показатели через 24 месяца подтвердили превосходство активной мышечной транспозиции. Длина траектории центра давления в группе транспозиции составила (267 ± 45) мм против (324 ± 58) мм в группе тенодеза при $p < 0,001$. Площадь статокинезиограммы равнялась (118 ± 28) мм² против (156 ± 41) мм² соответственно при $p = 0,002$ (табл. 3).

Таблица 3

Отдаленные результаты через 24 месяца

Показатель	Группа тенодеза (n = 42)	Группа транспозиции (n = 42)	p
АOFAS (баллы)	79,8 ± 7,8	88,1 ± 5,9	< 0,001
Амплитуда тыльного сгибания (°)	9,1 ± 3,8	15,6 ± 3,2	< 0,001
Сила тыльного сгибания (% от контралатеральной)	64,7 ± 10,9	81,2 ± 8,4	< 0,001
Длина траектории центра давления (мм)	324 ± 58	267 ± 45	< 0,001
Площадь статокинезиограммы (мм ²)	156 ± 41	118 ± 28	0,002
СКО во фронтальной плоскости (мм)	3,1 ± 0,8	2,4 ± 0,6	< 0,001
СКО в сагиттальной плоскости (мм)	3,4 ± 1,0	2,7 ± 0,5	0,001
Отличные и хорошие результаты (%)	73,8	88,1	0,047

Примечание: балл АOFAS — умеренная вариабельность (CV ≈ 10 % в группе тенодеза, CV ≈ 7 % в группе транспозиции); амплитуда тыльного сгибания — высокая вариабельность (CV ≈ 42 % в группе тенодеза, CV ≈ 21 % в группе транспозиции); стабилометрические показатели демонстрируют низкую вариабельность (CV ≈ 15–18 % в группе тенодеза, CV ≈ 12–17 % в группе транспозиции).

Осложнения развились у шести пациентов после тенодеза, что составило 14,3 %, включая три случая недостаточной коррекции, потребовавших ревизионного вмешательства, два случая формирования болезненных рубцов и один случай инфицирования раны. В группе транспозиции зарегистрировано четыре осложнения, составивших 9,5 %: два случая транзиторной слабости подошвенного сгибания, один случай туннельного синдрома переднего отдела голени и один случай гипертрофического рубца. Различия по частоте осложнений статистически незначимы при $p = 0,386$.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты убедительно демонстрируют преимущество транспозиции задней большеберцовой мышцы над тенодезом длинного разгибателя пальцев при коррекции синдрома висящей стопы, обусловленного изолированной нейропатией малоберцового нерва. Разница в функциональном восстановлении между двумя методиками объясняется фундаментальным различием в механизме их действия, — транспозиция создает активную мышечную тягу, тогда как тенодез обеспечивает лишь пассивную стабилизацию стопы. Эти данные согласуются с наблюдениями, продемонстрировавшими значительное улучшение дорсифлексии и походки после применения процедуры Bridle при травматическом повреждении малоберцового нерва, причем все пациенты достигли функционального восстановления без использования дополнительных ортопедических приспособлений [1, 6].

Достигнутое в нашем исследовании восстановление силы тыльного сгибания до 78,9 % от контралатеральной конечности в группе транспозиции коррелирует с международными данными, представленными различными исследовательскими группами. N. Eisenstein et al. подчеркивали важность тщательного планирования и соблюдения показаний к сухожильным транспозициям, что находит подтверждение в наших результатах [2]. А.М. Мацакян с соавт. при использовании миниинвазивного метода транспозиции сухожилия задней большеберцовой мышцы получили хороший результат у 12 из 16 пациентов, что демонстрирует воспроизводимость данной техники в различных клинических условиях [3]. Важно отметить, что модификация A. Medina процедуры пересадки сухожилия для коррекции обширного некроза мышц передней группы голени открывает возможности индивидуализации хирургических подходов в зависимости от степени поражения мышечных структур [4].

Меньшее восстановление силы при тенодезе, составившее 62,4 % от контралатеральной конечности, объясняется отсутствием активного мышечного компонента и зависимостью эффекта от натяжения фиксированного сухожилия. Это наблюдение согласуется с выводами L. Wareham et al. о важности комплексного подхода к лечению пациентов с нейродегенеративными процессами, однако наш анализ выявил существенные различия в долгосрочных функциональных исходах между различными методиками сухожильных транспозиций [5]. K.L. McCormick подчеркивал важность определения этиологии паралича малоберцового нерва для выбора оптимальной хирургической тактики, учитывая вариабельность спектра деформаций и слабости в голеностопном суставе, что находит отражение в различной эффективности применяемых нами методик [7].

Стабилометрические показатели продемонстрировали объективное улучшение контроля баланса и качества походки, причем сокращение длины траектории центра давления составило 51,6 % при транспозиции против 34,8 % при тенодезе относительно дооперационных значений. Эти данные коррелируют с выводами Ю.Б. Голубевой с соавт., установившими при ретроспективном анализе данных 375 пациентов, что при синдроме висающей стопы отмечается нарушение опорности, устойчивости, симметричности и ритмичности ходьбы, что значительно ухудшает качество жизни [8]. G. Chen продемонстрировал, что функциональное электростимулирование способно восстанавливать физиологический паттерн активации мышц дорсифлексоров и улучшать биомеханические показатели походки у пациентов с имплантированными нейростимуляторами, что открывает перспективы комбинированного лечения [9].

Достигнутая разница в 7,7 балла по шкале AOFAS и 6,5° амплитуды движений через 24 месяца имеет не только статистическое, но и клиническое значение для повседневной активности пациентов. I. Wiszomirska подтвердила важность комплексного подхода к коррекции биомеханических нарушений, что согласуется с нашими наблюдениями о многофакторности функционального восстановления [10]. Е.И. Аксенова установила высокую эффективность комплексных реабилитационных программ с биологической обратной связью в послеоперационном восстановлении функции стопы, что подчеркивает необходимость интеграции хирургического лечения с современными реабилитационными технологиями [11].

Частота осложнений в наших группах оказалась сопоставимой и составила 14,3 % после тенодеза против 9,5 % после транспозиции, что согласуется с данными М.Г. Башлячева с соавт., наблюдавшими 80 пациентов с компрессионной невропатией общего малоберцового нерва и выполнивших 84 операции декомпрессии [12]. Характер осложнений существенно различался между группами: недостаточная коррекция при тенодезе связана с техническими аспектами определения оптимального натяжения сухожилия, что требует значительного хирургического опыта. М.М. Сомова и В.Л. Доманский разработали технологию интраоперационного визуального нейромониторинга для операций реконструктивной нейропластики, создав специальный электростимулятор ЭСВМ-1, который может потенциально снизить частоту подобных осложнений за счет объективизации контроля натяжения [13].

Транзиторная слабость подошвенного сгибания после транспозиции является ожидаемым явлением и регрессирует в процессе нейромышечной адаптации в течение трех-четырех месяцев. Это согласуется с наблюдениями А.В. Новикова и В.А. Антоновой, проанализировавшими результаты лечения 254 пациентов после эндопротезирования коленного сустава и установившими, что комплексное интенсивное восстановительное лечение, проводимое с перерывами на протяжении не менее шести месяцев, в 75 % случаев позволило восстановить функцию пораженного нерва [14]. F.M. Leclère в исследованиях по невротизированному переносу мышц подчеркивал значимость медикаментозной поддержки процессов реиннервации, что корреспондирует с необходимостью комплексного подхода к профилактике и лечению послеоперационных осложнений [15].

Временной фактор играет критическую роль в определении показаний к различным хирургическим методикам. Z. Pang et al. в ретроспективном исследовании 45 пациентов с повреждениями общего малоберцового нерва установили, что оптимальный временной интервал для достижения восстановления тыльного сгибания стопы до уровня М3 составляет 9,5 месяцев с площадью под ROC-кривой 0,871,

а для восстановления до уровня М4 оптимальный срок составил 5,5 месяцев [16]. Наш критерий включения пациентов с длительностью нейропатии более 12 месяцев обосновывает выбор сухожильных транспозиций при неэффективности нервной реконструкции. В. Bao et al. продемонстрировали появление новых электрических потенциалов в передней большеберцовой мышце и длинных разгибателях у семи из восьми пациентов через 10–15 месяцев после прямой пересадки мышечной ветви камбаловидной мышцы большеберцового нерва к глубокому малоберцовому нерву, что подчеркивает важность ранних нейрореконструктивных вмешательств [17].

Критический анализ электрофизиологических показателей как предикторов успешности хирургического лечения представляет важный аспект нашего подхода. В отличие от работы С.С. Никитина с соавт., сосредоточенной на феноменологии блока проведения, наше исследование установило, что при длительности денервации более 12 месяцев целесообразность прямой нервной реконструкции существенно снижается [18]. А.А. Фоминых с соавт. исследовали эффективность неврוליза при компрессионной нейропатии малоберцового нерва в фибулярном канале у 29 пациентов и получили отличные результаты лечения в 89,7 % случаев, что подтверждает эффективность декомпрессионных вмешательств в ранние сроки заболевания [19].

А.П. Власов с соавт. отметили, что закрытые повреждения малоберцового нерва самопроизвольно восстанавливаются примерно у трети пациентов, но у оставшихся двух третей может потребоваться хирургическое вмешательство, причем отдаленные результаты хирургического лечения по восстановлению нерва или неврוליза малоберцового нерва не всегда удовлетворительные [20]. Это наблюдение обосновывает необходимость разработки альтернативных хирургических стратегий для пациентов с длительной денервацией. Z. Liu et al. в ретроспективном когортном исследовании 387 пациентов, перенесших хирургическую ревизию поврежденного общего малоберцового нерва, установили, что высокая предоперационная мышечная сила снижает риск неблагоприятного исхода с относительным риском 0,18, что подчеркивает важность раннего хирургического вмешательства до развития выраженной мышечной атрофии [21].

Анатомические исследования В. Lezak предоставили фундаментальную основу для понимания особенностей малоберцового нерва и его ветвей, подчеркивая важность точной локализации зоны компрессии для определения объема неврוליза и прогнозирования функциональных результатов операции [22]. М. Војовић разработал систематический подход к диагностике туннельных синдромов, включающий детальную клиническую оценку, дифференциальную диагностику и интеграцию результатов дополнительных методов исследования, что находит отражение в нашем комплексном предоперационном обследовании [23]. М. Fakiћ продемонстрировал важность тщательного клинического интервьюирования и фокусированного физикального обследования для локализации нейропатии, что особенно актуально при атипичных причинах компрессии [24].

Специфические клинические ситуации требуют особого диагностического подхода с учетом патофизиологических механизмов. U. Yadav et al. представили детальный анализ ятрогенного синдрома висящей стопы после реконструкции передней крестообразной связки, при хирургической ревизии которого была обнаружена интраневральная гематома с контузией нервного ствола, потребовавшая проведения неврוליза с последующим восстановлением функции через три месяца [25]. А. Lale исследовал частоту и причины развития синдрома висящей стопы после бариатрических вмешательств, установив связь между потерей жировой прослойки вокруг головки малоберцовой кости и развитием компрессионной нейропатии, что расширяет понимание разнообразия этиологических факторов [26].

М. Jiménez описала случай 13-летнего пациента с прогрессирующим парезом малоберцового нерва, вызванным интраневральной ганглиозной кистой атипичной удлиненной формы, что затруднило своевременную диагностику и лечение [27]. В.Р. Peters установил существование четырех клинических подтипов нейропатии общего малоберцового нерва, включая случаи с нормальными электрофизиологическими показателями, что расширяет диагностический спектр заболевания и подчеркивает необходимость хирургической декомпрессии даже при отсутствии конвенциональных симптомов [28]. С. Strother проанализировала демографические характеристики и исходы хирургического лечения травматических повреждений малоберцового нерва, подчеркнув важность правильного консультирования пациентов относительно сложности лечения и вариабельности результатов [29].

Патофизиологические механизмы развития синдрома висящей стопы представляют собой сложный каскад структурных и функциональных нарушений нервной проводимости. С. Oosterbos продемонстрировал в рандомизированном контролируемом исследовании FOOTDROP эффективность хирургической декомпрессии малоберцового нерва по сравнению с консервативной терапией при длительном наблюдении пациентов в течение восемнадцати месяцев [30]. П.К. Мирошникова установила перспек-

тивность применения мезенхимальных стволовых клеток для стимуляции регенеративных процессов в поврежденных нервных волокнах при экспериментальном моделировании нейропатии, что открывает перспективы медикаментозной поддержки хирургического лечения [31].

Мультидисциплинарный подход с участием невролога, нейрохирурга и специалиста по реабилитации обеспечивает комплексную оценку и разработку индивидуального плана лечения. Интраоперационная оценка жизнеспособности нервных волокон с использованием электростимуляции позволяет уточнить показания к невролизу во время операции, что представляет важное техническое нововведение. R. Mens и B. Naviv показали важность профилактических мероприятий при ятрогенных повреждениях нерва, что дополняет понимание этиологической структуры синдрома висящей стопы [32].

Необходимость комплексного подхода к послеоперационной реабилитации, включающего современные технологии биологической обратной связи и стабилметрического контроля, подтверждается различиями в восстановлении не только локальной функции голеностопного сустава, но и общих биомеханических показателей походки. Интеграция хирургического лечения с персонализированными реабилитационными программами представляет перспективное направление дальнейшего совершенствования результатов лечения пациентов с синдромом «висящей стопы». Дальнейшие исследования должны быть направлены на изучение возможностей минимально инвазивных техник сухожильной транспозиции и применения биологических факторов, стимулирующих процессы нейромышечной адаптации в послеоперационном периоде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Транспозиция задней большеберцовой мышцы демонстрирует статистически значимое и клинически существенное преимущество над тенодезом длинного разгибателя пальцев в восстановлении функции тыльного сгибания стопы при изолированной нейропатии малоберцового нерва длительностью более 12 месяцев. Фундаментальное различие в механизме действия, создание активной мышечной тяги при транспозиции против пассивной стабилизации при тенодезе обеспечивает более физиологичное восстановление двигательной функции.

Достижение силы тыльного сгибания до 78,9 % от контралатеральной конечности при транспозиции против 62,4 % при тенодезе подтверждает функциональное превосходство метода. Сопоставимая частота осложнений при значительном преимуществе в восстановлении двигательной функции обосновывает применение транспозиции задней большеберцовой мышцы в качестве метода выбора при данной патологии.

Сопоставимая частота осложнений между группами при лучших функциональных результатах транспозиции обосновывает ее применение в качестве метода выбора при изолированной нейропатии малоберцового нерва с длительной денервацией. Транзиторная слабость подошвенного сгибания после транспозиции, регрессирующая в процессе нейромышечной адаптации, не должна рассматриваться как препятствие к выполнению операции, учитывая значительное превосходство метода в восстановлении тыльного сгибания. Напротив, недостаточная коррекция при тенодезе представляет более серьезную проблему, требующую ревизионных вмешательств и связанную с техническими сложностями определения оптимального натяжения сухожилия.

Полученные данные позволяют рекомендовать транспозицию задней большеберцовой мышцы в качестве предпочтительной хирургической методики для пациентов с изолированной нейропатией малоберцового нерва при длительности денервации более двенадцати месяцев и отсутствии эффекта от консервативной терапии или нейрореконструктивных вмешательств. Тенодез длинного разгибателя пальцев может рассматриваться как альтернативная методика при наличии противопоказаний к транспозиции или технических ограничений, однако пациенты должны быть информированы о меньшей эффективности этого метода в восстановлении силы и амплитуды тыльного сгибания.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование не имело финансовой поддержки.

Информированное согласие. Участники исследования подписали добровольное информированное согласие на публикацию результатов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Febriana A, Subawa IW, Aryana IG, Sanjaya E. Revolutionizing Recovery: Tendon Transfer (Bridle Procedure) for Foot Drop in Traumatic Peroneal Nerve Injuries - A Case Series. *IJRR*. 2025;12(5):62-68. doi: 10.52403/ijrr.20250508.
2. Eisenstein N, Fischer B, Nayagam S. Tibialis Posterior Tendon Transfer for the Management of Foot Drop. *Strategies Trauma Limb Reconstr*. 2023;18(1):56-62. doi: 10.5005/jp-journals-10080-1583.
3. Мацакян А.М., Ширмазанян А.Г., Гороховацкий А.В. Операции на сухожилии задней большеберцовой мышцы при лечении статической плоско-вальгусной деформации. *Вестник Смоленской государственной медицинской академии*. 2017;16(4):168-177.

4. Medina A. Modified bridle tendon transfer procedure following a complete musculature loss of the anterior leg compartment: Case report and literature review. *Trauma Case Rep.* 2019;24:100262. doi: 10.1016/j.tcr.2019.100262.
5. Wareham LK, Liddel SA, Temple S, et al. Solving neurodegeneration: common mechanisms and strategies for new treatments. *Mol Neurodegener.* 2022;17(1):23. doi: 10.1186/s13024-022-00524-0.
6. Григорян А.А., Макинян Л.Г., Маннанов А.М. и др. Эффективность метода Bridle при хирургическом лечении пациентов с синдромом «висящей стопы», вызванным нейропатией малоберцового нерва. *Гений ортопедии.* 2025;31(6):737-743. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-6-737-743.
7. McCormick KL, Patel D, Chien BY, et al. Surgical Management of Foot Drop. *Orthop Rev (Pavia).* 2024;16:120047. doi: 10.52965/001c.120047.
8. Голубева Ю.Б., Андриевская А.О., Горелова И.К. и др. Ортопедическое обеспечение как инструмент медицинской реабилитации пациентов с синдромом отвисающей стопы. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова.* 2020;120(10):91-99. doi: 10.17116/jnevro202012010191.
9. Chen G, Ma L, Song R, et al. Speed-adaptive control of functional electrical stimulation for dropfoot correction. *J Neuroeng Rehabil.* 2018;15(1):98. doi: 10.1186/s12984-018-0448-x.
10. Wiszomirska I, Błażkiewicz M, Kaczmarczyk K, et al. Effect of Drop Foot on Spatiotemporal, Kinematic, and Kinetic Parameters during Gait. *Appl Bionics Biomech.* 2017;2017:3595461. doi: 10.1155/2017/3595461.
11. Аксенова Е.И., Горбатов С.Ю., Маклакова Ю.А. *Экспертный обзор: Индустрия реабилитационных технологий в России и мире.* М.: ГБУ «НИООЗММ ДЗМ»; 2020:64.
12. Башлачев М.Г. *Клиника, диагностика и хирургическое лечение компрессионной невропатии общего малоберцового нерва на уровне головки малоберцовой кости: дис. ... канд. мед. наук.* М.; 2022:126. Доступно по: <https://www.dissercat.com/content/klinika-diagnostika-i-khirurgicheskoe-lechenie-kompressionnoi-nevropatii-malobertsovogo-nerv>. Ссылка активна на 19.11.2025.
13. Сомова М.М., Доманский В.Л. Технология интраоперационного нейромониторинга методом полипрограммной электро-стимуляции при операциях реконструктивной нейропластики. *Клиническая практика.* 2019;10(4):46-52. doi: 10.17816/clinpract18812.
14. Новиков А.В., Антонова В.А. Невропатия малоберцового нерва как осложнение после тотального эндопротезирования коленного сустава: особенности реабилитации. *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова.* 2020;27(4):41-45. doi: 10.17816/vto57137.
15. Leclère FM, Badur N, Mathys L, Vögelin E. Neurotized lateral gastrocnemius muscle transfer for persistent traumatic peroneal nerve palsy: Surgical technique. *Neurochirurgie.* 2015;61(4):292-297. doi: 10.1016/j.neuchi.2014.08.001.
16. Pang Z, Zhu S, Shen YD, et al. Functional outcomes of different surgical treatments for common peroneal nerve injuries: a retrospective comparative study. *BMC Surg.* 2024;24(1):64. doi: 10.1186/s12893-024-02354-x.
17. Bao B, Wei H, Zhu H, Zheng X. Transfer of Soleus Muscular Branch of Tibial Nerve to Deep Fibular Nerve to Repair Foot Drop After Common Peroneal Nerve Injury: A Retrospective Study. *Front Neurol.* 2022;13:745746. doi: 10.3389/fneur.2022.745746.
18. Никитин С.С., Муртазина А.Ф., Дружинин Д.С. Блок проведения возбуждения по периферическому нерву как электрофизиологический феномен: обзор литературы. *Нервно-мышечные болезни.* 2019;9(1):12-23. doi: 10.17650/2222-8721-2019-9-1-12-23.
19. Фоминых А.А., Котов Н.Б., Бессарабова А.О. и др. Компрессионная нейропатия малоберцового нерва в фибулярном канале. *Вопросы реконструктивной и пластической хирургии.* 2022;25(4):44-52. doi: 10.52581/1814-1471/83/05.
20. Власов А.П., Лазарев М.П., Кисель Д.А. и др. Наш опыт сухожильно-мышечных транспозиций при лечении застарелых поврежденных малоберцового нерва. *Инновации в травматологии, ортопедии и реабилитологии: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции.* Чита: РИЦ ЧГМА; 2024:31-33.
21. Liu Z, Yushan M, Liu Y, Yusufu A. Prognostic factors in patients who underwent surgery for common peroneal nerve injury: a nest case-control study. *BMC Surg.* 2021;21(1):11. doi: 10.1186/s12893-020-01033-x.
22. Lezak B, Massel DH, Varacallo MA. Peroneal Nerve Injury. In: *StatPearls [Internet].* Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK549859/>.
23. Vojovic M, Dimitrijevic S, Olory BCR, et al. Overview of nerve entrapment syndromes in the foot and ankle. *Int Orthop.* 2025;49(4):853-862. doi: 10.1007/s00264-025-06469-5.
24. Fakh M, Alhojailan K, Volesky M. Knee intra-articular loose body causing a compression common peroneal nerve neuropathy with foot drop. *BMJ Case Rep.* 2025;18(1):e262880. doi: 10.1136/bcr-2024-262880.
25. Yadav U, Nemani M, Devgun A, et al. Iatrogenic Foot Drop After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction With Peroneus Longus Tendon Autograft: Report of a Rare Case. *Cureus.* 2022;14(6):e26476. doi: 10.7759/cureus.26476.
26. Lale A, Kirkil C, Ozturk S, et al. The results of surgical decompression in the treatment of foot drop due to peroneal nerve entrapment after bariatric surgery. *Surg Obes Relat Dis.* 2020;16(11):1684-1691. doi: 10.1016/j.soard.2020.06.054.
27. Jiménez Siebert M, Kaiser N, Ziebarth K. Complete foot drop due to atypical peroneal ganglion in a 13 ½ year old boy. *Neurochirurgie.* 2025;71(1):101606. doi: 10.1016/j.neuchi.2024.101606.
28. Peters BR, Pripotnev S, Chi D, Mackinnon SE. Complete Foot Drop With Normal Electrodiagnostic Studies: Sunderland "Zero" Ischemic Conduction Block of the Common Peroneal Nerve. *Ann Plast Surg.* 2022;88(4):425-428. doi: 10.1097/SAP.0000000000003053.
29. Carlson Strother C, Dittman LE, Spinner RJ, et al. Surgical management of peroneal nerve injuries. *Acta Neurochir (Wien).* 2023;165(9):2573-2580. doi: 10.1007/s00701-023-05727-y.
30. Oosterbos C, Rummens S, Bogaerts K, et al. Conservative versus surgical treatment of foot drop in peroneal nerve entrapment: rationale and design of a prospective, multi-centre, randomized parallel-group controlled trial. *Trials.* 2022;23(1):1065. doi: 10.1186/s13063-022-07009-x.
31. Мирошникова П.К., Лындуп А.В., Бацаленко Н.П. и др. Перспективные нервные кондуиты для стимуляции регенерации поврежденных периферических нервов. *Вестник РАМН.* 2018;73(6):388-400. doi: 10.15690/vramn1063.
32. Mens R, van Houten A, Brokelman RBG, Hoogeslag R. Iatrogenic common peroneal nerve injury during harvesting of semitendinosus tendon for anterior cruciate ligament reconstruction. *BMJ Case Rep.* 2021;14(4):e240736. doi: 10.1136/bcr-2020-240736.

Статья поступила 21.10.2025; одобрена после рецензирования 10.11.2025; принята к публикации 09.02.2026.

The article was submitted 21.10.2025; approved after reviewing 10.11.2025; accepted for publication 09.02.2026.

Информация об авторах:

Арцрун Андраникович Григорян — аспирант, Artsrun3204@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0677-2960>;

Вессам Мусса Абу Заалан — аспирант, врач — травматолог-ортопед, wsameeexx@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3922-3052>.

Левон Гагикович Макинян — кандидат медицинских наук, доцент кафедры, заведующий отделением, dr.makinyan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8813-143X>;

Альберт Маратович Маннанов — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, albertmannanov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4456-8218>;

Чынгис Молдамырзаев — аспирант, moldamirzayev@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-8501-0680>;

Михаил Александрович Иманкулов — аспирант, Mikhail.Imankulov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4398-1801>.

Information about the authors:

Artsrun A. Grigoryan — post-graduate student, Artsrun3204@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0677-2960>;

Wessam Mussa Abu Zaalán — post-graduate student, orthopaedic surgeon, wsameeexx@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3922-3052>.

Levon G. Makinyan — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor of the Department, Head of Department, dr.makinyan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8813-143X>;

Albert M. Mannanov — Candidate of Medical Sciences, orthopaedic surgeon, albertmannanov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4456-8218>;

Chyngis Moldamyrzayev — post-graduate student, moldamirzayev@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-8501-0680>;

Mikhail A. Imankulov — post-graduate student, Mikhail.imankulov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4398-1801>.

Научная статья

УДК 617.575:616.833.35-001.35-089.168

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2026-32-2-172-185>



Результаты дифференцированного подхода к открытой декомпрессии срединного нерва при синдроме запястного канала

С.Н. Измалков¹, О.М. Семенкин^{1,2}, А.Н. Братийчук^{1✉}, А.К.Усов^{2,3}, Н.А. Демченко¹, А.Е. Гусева⁴, К.Ф. Хайруллина⁵

¹ Самарский государственный медицинский университет, Самара, Россия

² Клинический госпиталь ИДК, Самара, Россия

³ Самарская областная клиническая больница им. В.Д. Середавина, Самара, Россия

⁴ МедГард, Самара, Россия

⁵ Медицинский центр «Самарская школа ультразвука», Самара, Россия

Автор, ответственный за переписку: Александр Николаевич Братийчук, brat59@bk.ru

Аннотация

Введение. Открытая декомпрессия срединного нерва — наиболее частая операция, выполняемая при синдроме запястного канала (СЗК). Однако рассечение поперечной связки запястья (ПСЗ) отрицательно сказывается на биомеханике кисти, способствует снижению силы захвата, особенно когда из-за анатомических особенностей вместе со связкой пересекают мышцы тенара.

Цель работы — провести сравнительный анализ ближайших и отдаленных результатов оперативного лечения пациентов с СЗК после открытой декомпрессии в трех вариантах: без восстановления ПСЗ, с рефиксацией мышц тенара и с пластикой ПСЗ.

Материалы и методы. Проанализированы данные о 80 пациентах с идиопатическим СЗК, которым выполнили 92 операции. В первой группе (38 пациентов, 39 операций) после декомпрессии срединного нерва ПСЗ не восстанавливали. Во второй группе (31 пациент, 40 операций) отсепааровывали, а в последующем рефиксировали находившиеся в месте рассечения ПСЗ мышцы тенара. В третьей (11 пациентов, 13 операций) после декомпрессии производили пластику ПСЗ.

Результаты. У всех пациентов констатировали положительную динамику, однако более значимое функциональное восстановление кисти было достигнуто после открытой декомпрессии срединного нерва с рефиксацией мышц тенара и с пластикой ПСЗ, что начало проявляться через три месяца и приобрело стойкий характер через шесть месяцев после операции.

Обсуждение. Достижение результата мы объясняем дифференцированным подходом к лечению, обеспечившем через шесть месяцев повышение амплитуды М-ответа короткой мышцы, отводящей большой палец, на 15,9 % в первой, на 34,3 % во второй и на 30,5 % в третьей группе, а также увеличение скорости импульса по моторным волокнам срединного нерва соответственно на 6,6 %, 13,2 % и 10,9 %. Не столь выраженное улучшение электрофизиологических параметров у пациентов первой группы связываем с более совершенной техникой оперативных вмешательств во второй и третьей группах.

Заключение. Сравнительный анализ ближайших и отдаленных результатов оперативного лечения пациентов с СЗК показал, что клинически значимое улучшение было характерным для каждого из вариантов. Однако наиболее полноценное восстановление функции кисти происходило на основе разработанных нами двух способов, — во второй и третьей группах.

Ключевые слова: синдром запястного канала, поперечная связка запястья, оперативное лечение

Для цитирования: Измалков С.Н., Семенкин О.М., Братийчук А.Н., Усов А.К., Демченко Н.А., Гусева А.Е., Хайруллина К.Ф. Результаты дифференцированного подхода к открытой декомпрессии срединного нерва при синдроме запястного канала. *Гений ортопедии*. 2026;32(2):172-185. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-2-172-185.

Original article

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2026-32-2-172-185>



Results of a differentiated approach to open decompression of the median nerve in carpal tunnel syndrome

S.N. Izmalkov¹, O.M. Semenkin^{1,2}, A.N. Bratiychuk¹✉, A.K. Usov^{2,3}, N.A. Demchenko¹, A.E. Guseva⁴, K.F. Khairullina⁵

¹ Samara State Medical University, Samara, Russian Federation

² Clinical Hospital, Samara, Russian Federation

³ Samara Regional Clinical Hospital named after V.D. Seredavin, Samara, Russian Federation

⁴ MedGard, Samara, Russian Federation

⁵ Medical Center Samara School of Ultrasound, Samara, Russian Federation

Corresponding author: Alexander N. Bratiychuk, brat59@bk.ru

Abstract

Introduction Open decompression of the median nerve is a common surgery performed for carpal tunnel syndrome (CTS). Transection of the transverse carpal ligament (TCL) results in impaired hand biomechanics and decreased grip strength when specific anatomy necessitate transection of the thenar muscles along with the ligament.

The **objective** was to compare short-term and long-term surgical results of CTS patients treated with open decompression in three different settings: without thenar muscle reconstruction, with thenar muscle reattachment and with reconstruction of the thenar muscles.

Material and methods A total of 80 patients with idiopathic CTS treated with 92 surgical procedures were included in the study. They were divided into three groups. The first group included 38 patients (39 surgeries) treated with open decompression without reconstruction of the TCL. Forty surgical procedures were produced for 31 patients of the second group including dissection and reattachment of the thenar muscles located at the site of the median nerve dissection. Median nerve decompression followed by TCL reconstruction were performed for 11 patients of the third group treated with 13 surgical procedures.

Results All patients demonstrated positive dynamics with more significant recovery of the hand function achieved after open decompression of the median nerve and reattachment of the thenar muscles and reconstruction of the spinal nerve with the outcome improved at three months and stabilized at six months of the surgery.

Discussion A differentiated approach to treatment ensured the amplitude of the M-response of the brevis muscle abducting the pollicis increased by 15.9 % in the first group, by 34.3 % in the second group, and by 30.5 % in the third group; the impulse velocity along the motor fibers of the median nerve increased by 6.6 %, 13.2 %, and 10.9 %, respectively, at six months. Less improvement in electrophysiological parameters in patients of the first group could be associated with a more advanced surgical technique employed for the patients of the second and third groups.

Conclusion A comparative analysis of the short-term and long-term surgical outcomes of CTS patients revealed clinically significant improvement with both options. However, the hand function recovery was more accomplished in the second and third groups with use of the two methods we developed.

Keywords: carpal tunnel syndrome, transverse carpal ligament, surgical treatment.

For citation: Izmalkov SN, Semenkin OM, Bratiychuk AN, Usov AK, Demchenko NA, Guseva AE, Khairullina KF. Results of a differentiated approach to open decompression of the median nerve in carpal tunnel syndrome. *Genij Ortopedii*. 2026;32(2):172-185. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-2-172-185.

ВВЕДЕНИЕ

Синдром запястного канала (СЗК) — это мононейропатия срединного нерва, обусловленная его компрессией окружающими тканями. Распространённость СЗК составляет 150–276 человек на 100 тыс. населения. Течение — прогрессирующее, резистентное к консервативной терапии, склонное к рецидивированию, что предопределяет необходимость оперативного лечения, являющегося эффективным в 70–90 % клинических наблюдений [1].

Одна из клинических форм СЗК — идиопатическая, без явных причин (острой травмы, посттравматических деформаций кисти и лучезапястного сустава, эндокринных, метаболических или хронических системных заболеваний, внутриневральных опухолей). Считается, что заболеванию способствуют многократная нагрузка на кисть при сгибании в запястье, длительное ее нахождение в одном положении, игра на вибрирующих инструментах. Высокий риск развития заболевания имеют монтажники, упаковщики, сборщики, художники, ювелиры, делопроизводители, пианисты [1].

Открытая декомпрессия срединного нерва — наиболее частая операция при СЗК, позволяющая в короткие сроки не только купировать изматывающую боль и усилить чувствительность на пальцах кисти, но и достигнуть стойкого клинического улучшения. Однако рассечение поперечной связки запястья (ПСЗ) оказывает негативное влияние на биомеханику кисти и является предпосылкой для возникновения нежелательных состояний, таких как снижение силы захвата кисти и появление «опорной боли» (англ.: pillar pain) [2, 3, 4, 5, 6].

Для профилактики неблагоприятных последствий рассечения ПСЗ кистевыми хирургами предложен ряд способов ее восстановления [7, 4]. При этом авторы принимали во внимание то обстоятельство, что ПСЗ является не только передней границей запястного канала, но и местом прикрепления мышц тенара и гипотенара [3].

Известно, что примерно половину площади передней поверхности связки с лучевой стороны занимают мышцы возвышения большого пальца (*m. flexor pollicis brevis, abductor pollicis brevis*) [8]. Кроме того, в 55 % клинических наблюдений эти мышцы прикрепляются на локтевой стороне, в проекции места предполагаемого рассечения связки [9]. В таких ситуациях мышцы либо пересекают, либо отслаивают в лучевую сторону, что позволяет рассечь ПЗК в локтевой части запястного канала, избежав повреждения срединного нерва и его моторной ветви, и проведя при этом их полноценную ревизию [10].

Отрицательным последствием такого вмешательства является то, что после отслоения или пересечения мышцы тенара теряют точку прикрепления, что в последующем вызывает их гипо- или атрофию и неблагоприятно сказывается на восстановлении функции кисти в целом [11].

С целью профилактики подобных осложнений мы разработали способ рефиксации мышц возвышения большого пальца после открытой декомпрессии запястного канала [12].

Цель работы — провести сравнительный анализ ближайших и отдаленных результатов оперативного лечения пациентов с СЗК после открытой декомпрессии в трех вариантах: без восстановления ПСЗ, с рефиксацией мышц тенара и с пластикой ПСЗ.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объект исследования — 80 пациентов с идиопатическим СЗК, которым с 01.01.2024 по 01.06.2025 выполнили открытую декомпрессию срединного нерва: 67 женщин и 13 мужчин среднего возраста 58 лет (36–86 лет). У 12 человек операции провели на обеих кистях с интервалом не менее трех месяцев. Операцию на одной кисти считали одним клиническим наблюдением. Всего выполнили 92 хирургических вмешательства. Операции на правой кисти провели в 61 (66 %), а на левой — в 31 (34 %) клиническом наблюдении.

Характеристика работы — нерандомизированное, проспективное, одноцентровое, продольное, контролируемое в параллельных группах клиническое исследование. Критерий включения — диагностированный до операции и подтвержденный в ее ходе СЗК. Критерии невключения — наличие у пациентов сопутствующих системных, метаболических и эндокринных заболеваний, последствий перелома костей кисти и предплечья, синдрома кубитального канала, рецидива СЗК. Никто из пациентов из исследования исключен не был.

Первичная конечная точка исследования — оценка эффективности оперативного лечения пациентов с СЗК путем открытой декомпрессии срединного нерва с рефиксацией мышц возвышения большого пальца и открытой декомпрессии срединного нерва с реконструкцией поперечной связки запястья, а также выработка рекомендаций по дифференцированному оперативному лечению в зависимости от анатомических особенностей запястья и паталогических изменений, выявленных в этой области.

Вторичные конечные точки исследования — анализ клинических показателей (силовой захват кисти, повседневная активность, тяжесть симптомов и функциональных нарушений), ЭНМГ-показателей (амплитуда М-ответа короткой мышцы, отводящей большой палец, дистальная латентность моторных волокон срединного нерва, скорость проведения импульса по моторным волокнам срединного нерва, скорость проведения импульса по сенсорным волокнам срединного нерва).

В зависимости от способа оперативного вмешательства все клинические наблюдения разделили на три группы (табл. 1). В первую группу вошли 38 пациентов (39 операций), которым после декомпрессии срединного нерва ПСЗ не восстанавливали. Вторая группа включала 31 пациента (40 операций), у которых мышцы возвышения большого пальца кисти (*m. flexor pollicis brevis* и *m. abductor pollicis brevis*) перекрывали линию предполагаемого рассечения ПСЗ. Место прикрепления мышц аккуратно отсепаровывали с подлежащей поверхностной частью связки и после декомпрессии запястного канала производили их рефиксацию, не прибегая к пластике ПЗК. Эту операцию осуществляли в соответствии с разработанным нами способом [11]. Третью группу составили 11 пациентов (13 операций), которым после декомпрессии срединного нерва производили пластику ПСЗ в соответствии с иным, ранее предложенным также нами способом [13].

Клинические группы (табл. 2) являлись сопоставимыми по возрасту, срокам выполнения операции от начала заболевания, степени выраженности СЗК, которую определяли в соответствии с классификацией J. Beck [14].

Таблица 1

Характеристика групп исследования

Группы исследования	Способ оперативного вмешательства	Число пациентов (n = 80)		Число операций (n = 92)	
		абс.	%	абс.	%
Первая	Открытая декомпрессия срединного нерва	38	47,50	39	42,5
Вторая	Открытая декомпрессия срединного нерва с рефиксацией мышц тенара	31	38,75	40	43,5
Третья	Открытая декомпрессия срединного нерва с пластикой поперечной связки запястья	11	13,75	13	14,0

Таблица 2

Характеристика пациентов в группах исследования

Характеристики		Клинические группы						$p^{1-2},$ $p^{1-3},$ p^{2-3}
		Первая (n = 39)		Вторая (n = 40)		Третья (n = 13)		
		абс.	%	абс.	%	абс.	%	
Возраст	< 50 лет	9	23,7	11	27,5	4	30,7	> 0,05
	51–60 лет	16	41,1	17	42,5	6	46,1	> 0,05
	> 60 лет	14	35,2	12	30,0	3	23,2	> 0,05
Сроки операции от начала заболевания	< 6 мес	27	69,2	28	70,0	9	69,2	> 0,05
	6 < 12 мес	8	20,5	7	17,5	2	15,4	> 0,05
	≥ 12 мес	4	10,3	5	12,5	2	15,4	> 0,05
Степень выраженности СЗК	Легкая	10	25,6	12	30,0	4	30,8	> 0,05
	Умеренная	13	33,3	13	32,5	4	30,8	> 0,05
	Выраженная	16	41,1	15	37,5	5	38,4	> 0,05

При постановке диагноза СЗК учитывали жалобы пациентов на боль в кисти, преимущественно в ночные и утренние часы, чувство онемения в зоне иннервации срединным нервом, длительность заболевания и безуспешность консервативного лечения, наличие положительных клинических симптомов Фалена, Тинеля, теста «стряхивания кисти» (*англ.*: flick maneuver), «теста на царапины» (*англ.*: scratch collapse test), а также результаты ЭНМГ и УЗИ.

Показаниями к операции считали установленный кистевым хирургом диагноз СЗК, подтвержденный данными ЭНМГ и УЗИ, отсутствие клинического улучшения после консервативного лечения как минимум в течение трех месяцев, отрицательную динамику ЭНМГ-показателей.

Выбор способа оперативного лечения осуществляли, с одной стороны, опираясь на данные предоперационного инструментального обследования (ЭНМГ, УЗИ), а с другой — основываясь на сведениях, полученных в ходе интраоперационной визуализации патологических изменений в области операции. Окончательное решение о способе операции принимали непосредственно в ходе хирургического вмешательства.

Так, если интраоперационно выявляли выраженный теносиновит сгибателей, препятствующий полноценному восстановлению ПСЗ, то предпочтение отдавали изолированной декомпрессии срединного нерва без пластики ПЗК (первая группа). Если при УЗИ запястного канала или интраоперационно обнаруживали, что в месте предполагаемого рассечения ПСЗ находятся мышцы тенара, то их отсепа- ровывали вместе с поверхностной частью подлежащей связки, а после ее рассечения единым блоком рефиксировали (вторая группа). Если пациентами являлись люди, профессиональная деятельность которых была связана с постоянными движениями кисти под нагрузкой, то выполняли открытую деком- прессию запястного канала с истинной пластикой ПЗК (третья группа).

Эффективность хирургического лечения оценивали по восьми критериям, из них четыре являлись клиническими (величины силового захвата кисти, повседневной активности, тяжести клинических симптомов и функционального дефицита) и четыре — электронейромиографическими (амплитуда М-ответа короткой мышцы, отводящей большой палец, дистальная латентность моторных волокон срединного нерва, скорость проведения импульса по моторным и сенсорным волокнам срединного нерва). Все эти показатели изучили в динамике: перед операцией, через три и шесть месяцев после опе- рации.

Величину силового захвата кисти определяли с использованием ручного пружинного динамометра ДК-50 (ЗАО «Нижнетагильский медико-инструментальный завод», Россия). Исследование на каждой руке проводили дважды с интервалом в одну минуту, после чего вычисляли средний показатель.

Выраженность повседневной активности пациентов определяли по опроснику DASH [15, 16, 18].

Для оценки результатов лечения применяли опросник VSTQ [17, 18, 19].

Функциональный статус периферических моторных и сенсорных волокон срединного нерва изучали на обеих руках, используя стандартные программы электромиографа Лайтбокс (Нейрософт, Россия), два кабеля подключения одноразовых электродов с коннектором типа «аллигатор», «защищенным от прикосновения» (англ.: touch-proof), черного и красного цвета, заземляющий электрод, одноразо- вый накожный электрод 22 × 34 мм. Обследование выполняли по стандартным методикам [20].

Ультразвуковое исследование проводили на обеих верхних конечностях с помощью аппарата Samsung Medison HS 40, используя линейный датчик с частотой 3–16 МГц. В ходе сканирования идентифици- ровали срединный нерв, его размеры, структуру, места сдавления нерва на запястье и в верхней трети предплечья, расположение мышц тенара в зоне запястного канала, состояние окружающих тканей, мышц и сухожилий.

Статистический анализ данных выполняли в среде SPSS 25 (IBM SPSS Statistics, США, лицензия № 5725-A54). Соответствие величин количественных признаков нормальному закону распределения проверяли с помощью критерия Шапиро – Уилка и Колмогорова – Смирнова, с поправкой Лилифорса. Описательную статистику представляли в виде среднего и стандартного отклонения ($M \pm SD$). Сравне- ние групп осуществляли с помощью рангового дисперсионного анализа Краскела – Уоллиса, критериев Манна – Уитни, парного критерия Вилкоксона, χ^2 Пирсона (для номинальных признаков).

Для визуализации полученных данных использовали графики типа «усатый ящик» (англ.: boxplot), отражающие медиану, квартили, минимум и максимум. Критическое значение уровня значимости принимали равным 0,05 во всех случаях, кроме межгрупповых сравнений в дисперсионном анализе, где применяли поправку Бонферрони с критическим значением $p = 0,017$.

Хирургическая техника

Общие, одинаковые для всех условия операции, характер хирургического доступа и этапы операции у пациентов первой группы соответствовал принципам, отраженным нами ранее [19].

У пациентов второй группы производили аналогичный первой группе разрез кожи и апоневроза. ПСЗ рассекали по ее локтевой стороне. Продвигаясь проксимально до места пересечения с мышцами тенара (рис. 1, а), разрезом, огибающим вершину прикрепления мышц, отсекали поверхностный ли- сток связки вместе с мышцами. Отводили их кнаружи. Затем полностью рассекали поперечную связку запястья, а также глубокую фасцию предплечья (рис. 1, б). Ревизировали срединный нерв. Отсеченные мышцы вместе с участком связки рефиксировали (подшивали на прежнее место или кнаружи до 3 мм), используя П-образный шов с двумя блокирующими петлями с каждой стороны (рис. 1, в). После этого тремя–четырьмя отдельными швами сшивали ладонный апоневроз, что позволяло сместить мышцы тенара кнутри, уменьшив напряжение на точке их фиксации. На кожу накладывали швы по Донати.

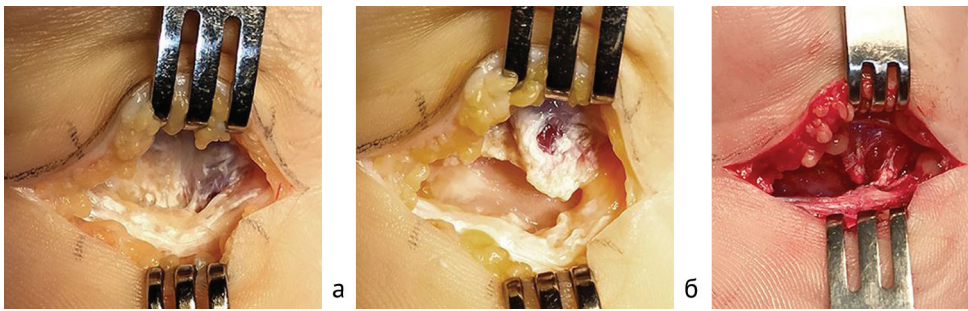


Рис. 1. Расположение мышц тенара в проекции линии пересечения ПСЗ (а); отсеченные и отведенные мышцы тенара (б); вид операционной раны после рефлексии мышц тенара (в)

У пациентов третьей группы разрезы кожи и апоневроза были такими же, как в первой и второй группах. ПСЗ рассекали, формируя два трапециевидных лоскута: лучевой (проксимальный) и локтевой (дистальный). После ревизии, мобилизации и эпинеуротомии срединного нерва лоскуты связки сопоставляли малыми основаниями и соединяли друг с другом. Ладонный апоневроз и кожу сшивали отдельными швами.

Таким образом, первоначальный этап операции, предусматривавший выполнение разрезов кожи и ладонного апоневроза, во всех клинических наблюдениях был однотипным. Последующие этапы различались в зависимости от выявленных анатомических особенностей запястного канала и патологических изменений в морфологических структурах, входящих в его состав. Заключительный этап (наложение швов на апоневроз и кожу) был также одинаковым.

В послеоперационный период всех пациентов вели в соответствии с принципами, описанными нами ранее [19].

Все пациенты до начала лечения подписывали информированное согласие на участие в исследовании и публикацию данных в открытом доступе. Работа одобрена Комитетом по биоэтике при Самарском государственном медицинском университете (протокол № 312 от 25 ноября 2025 г.) и проведена в соответствии с Хельсинкской декларацией 1975 г. (пересмотр 2008 г.). Информацию о персональных данных пациентов не отражали.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При внутригрупповом сравнении динамика клинико-функциональных показателей у пациентов всех трех групп в целом была положительной, что в наибольшей степени проявилось через шесть месяцев после операции. Однако в каждой группе выявлены свои особенности.

Так, в первой группе (табл. 3) величина силового захвата кисти через три месяца уменьшилась на 35,0 % ($p^{0-3} < 0,001$), а через шесть месяцев возросла, но не достигла исходного уровня. Показатель повседневной активности конечности по анкете DASH через три месяца улучшился на 31,9 % ($p^{0-3} = 0,002$), но особо значимо изменился через шесть месяцев, — на 61,1 % ($p^{0-6} < 0,001$). Аналогичную тенденцию наблюдали при оценке выраженности клинических симптомов и функциональных нарушений. Так, показатель ВСТОQs через шесть месяцев изменился в положительную сторону на 52,8 % ($p^{0-6} < 0,001$), а показатель ВСТОQf — на 37,7 % ($p^{0-6} < 0,001$). Из параметров ЭНМГ заслуживало внимания укорочение через шесть месяцев величины дистальной моторной латентности на 35,6 % ($p^{0-6} < 0,001$) и увеличение сенсорной скорости на 72,2 % ($p^{0-6} < 0,001$), что объективно подтверждало клиническую эффективность декомпрессии срединного нерва.

Таблица 3

Изменения клинико-функциональных показателей в первой группе (внутригрупповое сравнение)

Показатели	Норма	Сроки исследования			% изменений		p	
		До операции	Через 3 мес.	Через 6 мес.	Через 3 мес.	Через 6 мес.	p^{0-3} М–У*	p^{0-6} М–У*
Сила, daN	–	20,32 ± 4,37	13,20 ± 4,52	19,72 ± 3,98	–35,0 %	–2,9 %	< 0,001	0,511
DASH**, баллы	< 25	38,01 ± 9,99	25,86 ± 17,26	14,80 ± 7,38	–31,9 %	–61,1 %	0,002	< 0,001
ВСТОQs***, баллы	1,0	3,32 ± 0,66	2,02 ± 0,73	1,57 ± 0,45	–39,1 %	–52,8 %	< 0,001	< 0,001
ВСТОQf****, баллы	1,0	3,10 ± 0,63	2,37 ± 0,92	1,93 ± 0,48	–23,5 %	–37,7 %	0,013	< 0,001
Амплитуда, мВ	> 6,0	4,92 ± 2,89	4,55 ± 2,91	5,71 ± 2,53	–7,5 %	15,9 %	0,597	0,423
Латентность, мс	< 4,2	6,62 ± 2,21	4,55 ± 0,65	4,26 ± 0,83	–31,2 %	–35,6 %	0,001	< 0,001
Скорость моторная, м/с	> 50	45,57 ± 17,64	48,03 ± 15,49	48,61 ± 16,36	5,4 %	6,6 %	0,351	0,200
Скорость сенсорная, м/с	57–71	21,18 ± 15,40	33,22 ± 16,01	36,47 ± 12,09	56,8 %	72,2 %	0,006	< 0,001

Примечание: * — сравнение по критерию Манна – Уитни; ** — опросник для оценки функциональных нарушений верхней конечности; *** — шкала тяжести клинических симптомов; **** — шкала выраженности функционального дефицита.

Динамика показателей у пациентов второй группы (табл. 4) несколько отличалась от первой группы. В частности, мы не наблюдали существенного снижения силы захвата кисти через три месяца после операции. Уменьшение составило всего лишь 9,6 % от исходного уровня ($p^{0-3} = 0,035$). Но далее, через шесть месяцев, сила захвата по сравнению с дооперационной величиной увеличилась на 15,2 % ($p^{0-6} = 0,025$). Данные клинических тестов планомерно улучшались на всех сроках наблюдения, демонстрируя значимое увеличение также через шесть месяцев: повседневная активность конечности по анкете DASH улучшилась на 70,5 % ($p^{0-6} < 0,01$), ВСТQs — на 56,3 % ($p^{0-6} < 0,01$) и ВСТQf — на 47 % ($p^{0-6} < 0,001$). Аналогичную тенденцию прослеживали и при анализе показателей ЭНМГ. Амплитуда М-ответа короткой мышцы, отводящей большой палец, возросла на 34,3 % ($p^{0-6} = 0,008$), дистальная моторная латентность изменилась в положительную сторону на 31,7 % ($p^{0-6} < 0,001$), а сенсорная скорость — на 72,4 % ($p^{0-6} < 0,001$).

Таблица 4

Изменения клиничко-функциональных показателей во второй группе (внутригрупповое сравнение)

Показатели	Норма	Сроки исследования			% изменений		p	
		До операции	Через 3 мес.	Через 6 мес.	Через 3 мес.	Через 6 мес.	p^{0-3} М-У*	p^{0-6} М-У*
Сила, daN	–	20,53 ± 6,58	18,56 ± 4,49	23,65 ± 7,47	–9,6 %	15,2 %	0,035	0,025
DASH**, баллы	< 25	34,54 ± 15,48	15,15 ± 9,40	10,17 ± 8,09	–56,2 %	–70,5 %	< 0,001	< 0,001
ВСТQs***, баллы	1,0	3,14 ± 0,81	1,59 ± 0,40	1,37 ± 0,38	–49,2 %	–56,3 %	< 0,001	< 0,001
ВСТQf****, баллы	1,0	2,80 ± 0,83	1,83 ± 0,55	1,49 ± 0,48	–34,7 %	–47,0 %	< 0,001	< 0,001
Амплитуда, мВ	> 6,0	5,51 ± 2,95	6,29 ± 1,79	7,39 ± 2,63	14,3 %	34,3 %	0,277	0,008
Латентность, мс	< 4,2	6,12 ± 1,84	4,09 ± 0,56	4,18 ± 0,57	–33,1 %	–31,7 %	< 0,001	< 0,001
Скорость моторная, м/с	> 50	47,46 ± 12,55	51,56 ± 9,16	53,74 ± 5,35	8,6 %	13,2 %	0,026	0,005
Скорость сенсорная, м/с	57–71	24,54 ± 14,56	42,21 ± 7,15	42,30 ± 7,49	72,0 %	72,4 %	< 0,001	< 0,001

Примечание: * — сравнение по критерию Манна – Уитни; ** — опросник для оценки функциональных нарушений верхней конечности; *** — шкала тяжести клинических симптомов; **** — шкала выраженности функционального дефицита.

Пациенты третьей группы (табл. 5) демонстрировали еще меньшую, чем в первой и во второй группах, потерю силы захвата кисти через три месяца после операции, — всего лишь на 2 % ($p^{0-3} = 0,935$), и наибольший ее прирост через шесть месяцев, — на 24 % ($p^{0-6} = 0,05$). Значимым было увеличение функциональной активности конечности по шкале DASH, прирост которой через шесть месяцев составил 76,9 % ($p^{0-6} < 0,001$). Также у пациентов третьей группы через шесть месяцев наибольшим было улучшение по анкете ВСТQs, согласно которой прирост положительной динамики был равен 61,8 % ($p^{0-6} < 0,001$), а по анкете ВСТQf — 51,2 % ($p^{0-6} < 0,001$).

Таблица 5

Изменения клиничко-функциональных показателей в третьей группе (внутригрупповое сравнение)

Показатели	Норма	Сроки исследования			% изменений		p	
		До операции	Через 3 мес.	Через 6 мес.	Через 3 мес.	Через 6 мес.	p^{0-3} М-У*	p^{0-6} М-У*
Сила, daN	–	22,08 ± 6,05	21,63 ± 5,47	27,38 ± 5,61	–2,0 %	24,0 %	0,935	0,05
DASH**, баллы	< 25	34,93 ± 19,48	18,67 ± 3,46	8,07 ± 5,83	–46,6 %	–76,9 %	0,065	< 0,001
ВСТQs***, баллы	1,0	2,86 ± 0,81	1,51 ± 0,19	1,09 ± 0,13	–47,1 %	–61,8 %	0,004	< 0,001
ВСТQf****, баллы	1,0	2,38 ± 0,70	1,73 ± 0,37	1,16 ± 0,27	–27,3 %	–51,2 %	0,049	< 0,001
Амплитуда, мВ	> 6,0	6,83 ± 2,67	6,94 ± 1,79	8,91 ± 2,28	1,6 %	30,5 %	0,693	0,088
Латентность, мс	< 4,2	5,61 ± 1,15	3,86 ± 0,38	4,10 ± 0,32	–31,2 %	–26,9 %	0,004	0,003
Скорость моторная, м/с	> 50	54,46 ± 4,95	56,15 ± 4,00	60,39 ± 6,09	3,1 %	10,9 %	0,456	0,039
Скорость сенсорная, м/с	57–71	29,64 ± 11,35	44,82 ± 3,03	47,04 ± 2,81	51,2 %	58,7 %	0,003	< 0,001

Примечание: * — сравнение по критерию Манна – Уитни; ** — опросник для оценки функциональных нарушений верхней конечности; *** — шкала тяжести клинических симптомов; **** — шкала выраженности функционального дефицита.

Показатели ЭНМГ имели тенденцию к нормализации, — через шесть месяцев укорочение дистальной моторной латентности составило 26,9 % ($p^{0-6} = 0,004$), а прирост моторной и сенсорной скоростей соответственно — 10,9 % ($p^{0-6} = 0,039$) и 58,7 % ($p^{0-6} < 0,001$). Следует отметить, что величины прироста этих показателей ЭНМГ у пациентов третьей группы были меньше, чем у пациентов первой и второй групп, что, вероятнее всего, связано с более высокими/лучшими их дооперационными величинами.

При сравнении клиничко-функциональных показателей в межгрупповом ракурсе констатировали, что сила захвата кисти через три месяца после операции снизилась у пациентов всех трех групп (рис. 2, а). Но в наибольшей степени она уменьшилась в первой группе (на 35 %), достоверно отличаясь от второй и третьей групп ($p^{1-2, 1-3} < 0,001$). При этом различий между второй и третьей груп-

пами не было. К шестому месяцу средняя величина силового захвата кисти возросла у всех. Однако, если во второй и третьей группах она существенно превысила исходные данные (на 15,2 % и 24 % соответственно), то в первой группе оставалась на 2,9 % меньше, чем до операции, достоверно различаясь со второй ($p^{1-2} = 0,006$) и третьей ($p^{1-3} < 0,001$) группами.

Повседневная активность верхней конечности, оцененная по анкете DASH, улучшалась более равномерно, чем сила захвата кисти (рис. 2б). В первой группе через шесть месяцев верхняя конечность стала более функциональной на 61,1 %, во второй — на 70,5 % и в третьей — на 76,9 %. При этом различия между первой и второй, между первой и третьей группами были статистически значимыми ($p^{1-2} = 0,014$ и $p^{1-3} = 0,005$).

Степень тяжести клинических симптомов по анкете ВСТQs уменьшалась в основном также планомерно (рис. 2, в). Через шесть месяцев у пациентов первой группы она понизилась на 52,8 %, второй — на 56,3 % и третьей — на 61,8 %. При этом, если между первой и второй группами достоверных различий не наблюдали, то между первой и третьей различия были статистически значимыми ($p^{1-3} < 0,001$).

Динамика функциональных нарушений по анкете ВСТQf была также положительной (рис. 2, г). Через шесть месяцев в первой группе она улучшилась на 37,7 %, во второй — на 47,0 % и в третьей — на 51,2 %. Различия между первой и второй группами, равно и как между первой и третьей группами, были статистически достоверными ($p^{1-2, 1-3} \leq 0,001$).

Наряду с клиническими данными показатели ЭНМГ также претерпели ряд существенных изменений, свидетельствующих о равномерном улучшении функционального статуса кисти. Величина амплитуды М-ответа короткой мышцы, отводящей большой палец, во всех группах возрастала (рис. 2, д). Через шесть месяцев в первой группе она улучшилась на 15,9 %, во второй — на 34,3 % и в третьей на 30,5 %. Различия между первой и третьей группами были статистически значимыми ($p^{1-3} = 0,008$).

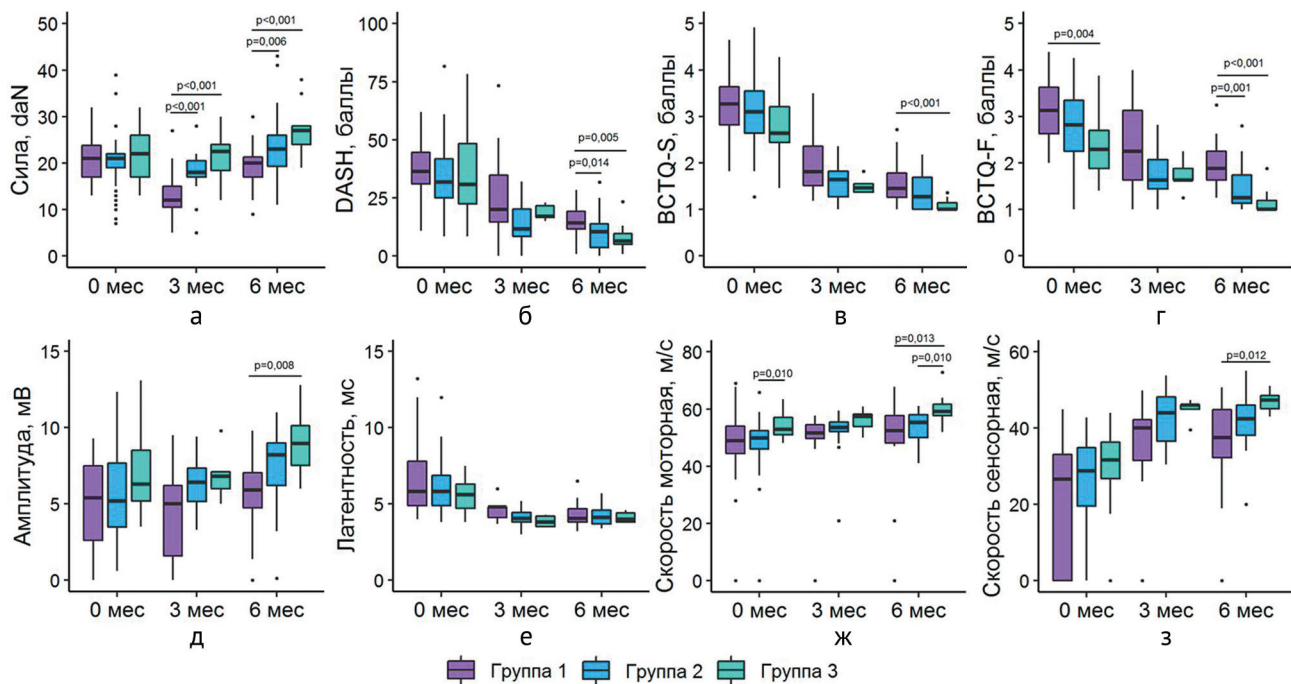


Рис. 2. Динамика показателей: а — величины силового захвата кисти (межгрупповое сравнение), daN; б — повседневной активности пациентов по анкете DASH (межгрупповое сравнение), баллы; в — показателей анкеты ВСТQs (межгрупповое сравнение), баллы; г — показателей анкеты ВСТQf (межгрупповое сравнение), баллы; д — амплитуды М-ответа короткой мышцы, отводящей большой палец (межгрупповое сравнение), мВ; е — дистальной моторной латентности срединного нерва (межгрупповое сравнение), мс; ж — скорости проведения импульса по моторным волокнам срединного нерва (межгрупповое сравнение), м/с; з — скорости проведения импульса по сенсорным волокнам срединного нерва (межгрупповое сравнение), м/с

Показатель дистальной моторной латентности срединного нерва на всех этапах исследования и во всех группах также имел положительную динамику (рис. 2, е). Особо наглядно эта закономерность проявилась через три месяца, улучшив показатель у всех практически на одну треть: на 31,2 % в первой, на 33,1 % во второй и на 31,2 % в третьей группе. Однако через шесть месяцев произошло разобочение этой однонаправленной динамики. Если в первой группе дистальная моторная латентность продолжала прогрессивно сокращаться, достигнув 35,6 % от исходного, то во второй и третьей группах динамика

была не так выражена. Так, по сравнению с исходным уровнем во второй группе улучшение составило 31,7 %, а в третьей — 26,9 %. Несмотря на это, моторная латентности во второй и третьей группах вернулась к нормальным величинам ($< 4,2$ мс).

Скорость проведения импульса по моторным волокнам срединного нерва также постепенно нарастала у всех пациентов (рис. 2, ж). Через шесть месяцев после операции она увеличилась на 6,6 % в первой группе, на 13,2 % — во второй и на 10,9 % — в третьей. При этом различия между первой и второй, между первой и третьей группами были статистически значимыми с величиной достоверности $p^{1-2} = 0,013$ и $p^{1-3} = 0,01$.

Скорость проведения нервного импульса по сенсорным волокнам срединного нерва аналогично предыдущим показателям ЭНМГ также улучшалась (рис. 2, з). Своеобразный ее «скачок» произошел практически у всех пациентов через три месяца после операции: в первой группе она возросла на 56,8 %, во второй — на 72,0 % и третьей — на 51,2 %. Наряду с этим, прирост скорости через шесть месяцев был не столь очевидным. Разница в приросте скорости между группами в различные сроки была незначительна, что свидетельствует о клинической эффективности всех трех оперативных методик.

Осложнения

У двух пациентов первой группы через 1,5 месяца после операции диагностировали *pillar pain*, которая самостоятельно купировалась. У двух пациентов второй и двух пациентов третьей группы через один месяц возникла непродолжительная боль в послеоперационном рубце, что, возможно, было связано с неполным удалением кожных швов в амбулаторных условиях.

Таким образом, после оперативного лечения у пациентов всех трех групп наступило клинически значимое улучшение. Однако по выраженности изменения результатов динамометрии, анкетирования и ЭНМГ можно сделать заключение о более быстром и более полноценном восстановлении функции кисти у пациентов второй и третьей групп, которое начало проявляться через три месяца и приобрело наиболее выраженный и стойкий характер через шесть месяцев после операции.

Приводим **клинический пример** пациентки второй группы, которой выполнили открытую декомпрессию запястного канала с рефиксацией мышц тенара по разработанному нами способу.

Больная 47 лет, юрист, обратилась с жалобами на нарушение чувствительности и боль в I–II–III пальцах правой кисти, усиливающиеся в утренние часы, а также после занятий йогой, что постепенно нарастало в течение трех лет. Умеренно выраженная боль в кисти и чувство онемения в пальцах были преимущественно «ночными», от чего пациентка просыпалась четыре–пять раз. Кроме этого, по утрам появлялся отек кисти, движения пальцами становились затрудненными. Профессиональная, бытовая и спортивная активность существенно снизились. В последние месяцы лечилась консервативно с незначительным улучшением.

При первичном обследовании: Внешний вид правой кисти не изменен. Гипотрофии мышц тенара нет. Объем движений пальцами — полный. Болезненность в проекции запястного канала с иррадиацией в I–II–III пальцы. Тесты Тинеля и Фалена — «положительные». Сила кулачного захвата — 22 daN. Повседневная активность по шкале DASH — 32,5 балла. Результаты по опросникам VCTQs и VCTQf — 2,55 и 2,88 баллов соответственно. При ЭНМГ выявлены изменения, характерные для СЗК: амплитуда М-ответа короткой мышцы, отводящей большой палец, — 7,2 мВ; дистальная латентность моторных волокон срединного нерва — 4,6 мс; скорость проведения импульса по моторным волокнам срединного нерва — 51,3 м/с; скорость проведения импульса по сенсорным волокнам срединного нерва — 34 м/с. Результаты УЗИ: площадь поперечного сечения (ППС) срединного нерва в запястном канале увеличена (16 мм² при норме < 11 мм² [20]).

В сентябре 2024 г. на правой кисти выполнили операцию, в ходе которой выявили, что мышцы тенара занимают более половины площади передней поверхности ПСЗ. Провели открытую декомпрессию срединного нерва с рефиксацией мышц возвышения большого пальца по разработанному нами способу. Невропатическая боль перестала беспокоить на второй день. Пациентка скрупулёзно выполняла все рекомендации. Послеоперационный период прошел без осложнений. Рана зажила первичным натяжением.

При обследовании через шесть месяцев: Жалоб не предъявляет, вернулась к занятиям йогой. Трудоспособность по профессии сохранена. Ощущений онемения и покалывания в кисти нет. Боль в покое и при нагрузке отсутствует. Объем активных движений в пальцах кисти — полный (рис. 3, а). Сила кулачного захвата — 26 daN (рис. 3, б). Функциональный статус конечности и повседневная активность по шкале DASH — 0,83 балла. По шкале VCTQ — положительная динамика: VCTQs — 1,0 балла, а VCTQf — 1,0 балла. Результатами лечения удовлетворена.



Рис. 3. Объем активных движений (разгибание, сгибание) в пальцах кисти через шесть месяцев после операции (а); результаты динамометрии через шесть месяцев после операции: правая кисть — 26 daN, левая кисть — 22 daN (б)

При ЭНМГ выявлено улучшение показателей: амплитуда М-ответа короткой мышцы, отводящей большой палец — 8,6 мВ; дистальная латентность моторных волокон срединного нерва — 3,2 мс; скорость проведения импульса по моторным волокнам срединного нерва — 51,5 м/с; скорость проведения импульса по сенсорным волокнам срединного нерва — 49 м/с (рис. 4).

Результат УЗИ: ППС срединного нерва в запястном канале — 8 мм² (рис. 5).

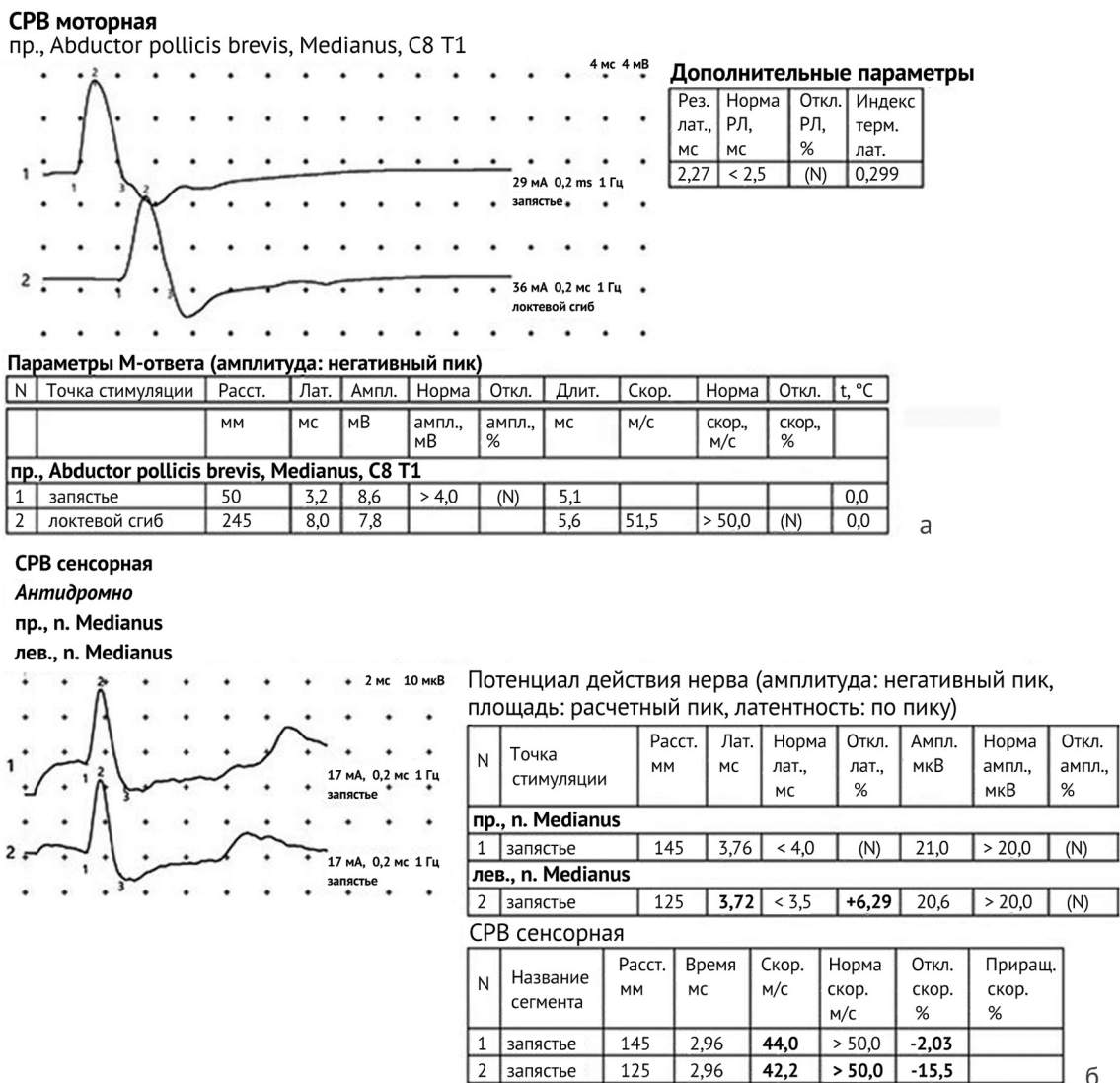


Рис. 4. Показатели ЭНМГ через шесть месяцев после операции: а — М-ответ срединного нерва правой кисти; б — скорость проведения импульса по сенсорным волокнам срединного нерва



Рис. 5. Результат УЗИ правого запястного канала через шесть месяцев после операции

Таким образом, данное клиническое наблюдение иллюстрирует положительный результат своевременного, адекватного оперативного вмешательства по поводу идиопатического СЗК, в результате которого мышцы тенара, занимавшие более половины передней поверхности ПСЗ, фактически были сохранены, — первоначально аккуратно отслоены от связки, а затем заново прикреплены к ней.

ОБСУЖДЕНИЕ

Эффективность хирургической декомпрессии срединного нерва у пациентов с СЗК подтверждена рядом клинических исследований. Так, А.В. Гильвег с соавт. отметили выраженное уменьшение боли и других невропатических расстройств через один месяц после операции, а существенное улучшение функционального состояния кисти — через шесть месяцев [21].

В литературе также описаны нежелательные явления и осложнения после открытой декомпрессии срединного нерва. В частности, Ю.В. Беляков с соавт. выделили основные недостатки этого способа хирургического лечения пациентов с СЗК, — высокую вероятность вовлечения нервного ствола в рубец, ущемление срединного нерва краями рассеченной связки, хроническую его травматизацию у лиц, занятых ручным трудом [22]. G.M. Gartsman et al. обнаружили, что после такой операции увеличение ширины запястной дуги более чем на 20 % коррелирует со снижением силы захвата кисти на 25,8 % [23]. R. Luchetti и P. Amadio констатировали, что пересечение ПСЗ при открытой декомпрессии срединного нерва вызывает снижение силы захвата кисти в 16–25 % клинических наблюдений [24]. По утверждению А. Lluch, M. Castro-Menéndez et al., W.H. Seitz et al. это обосновывает целесообразность реконструкции ПСЗ, способствующей более быстрому и полноценному восстановлению функции кисти за счет увеличения силы захвата и снижения риска возникновения боли в области послеоперационного рубца и pillar pain [4, 7, 25]. D. Netscher et al., измеряя силу захвата кисти, выявили, что у пациентов, которым восстанавливали ПСЗ, максимальная сила грубого и тонкого захватов достигала исходных величин через три месяца после операции, что достоверно превосходило аналогичные показатели у пациентов без пластики [26]. Результаты исследования Г.П. Котельникова с соавт. также подтвердили эффективность реконструкции ПСЗ, что при умеренно выраженном СЗК проявилось увеличением силы хвата кисти, улучшением показателей по опросникам VCTQs и VCTQf, данных ЭНМГ, особенно у пациентов 18–60 лет [27].

T. Mujadzic et al. отметили четырехкратное снижение частоты и длительности проявления pillar pain у пациентов при использовании мини-инвазивного хирургического доступа (7,2 %) по сравнению со стандартным разрезом (32,1 %) [5]. W.H. Seitz et al. обнаружили двукратное уменьшение частоты возникновения pillar pain и увеличение силы захвата кисти у пациентов после реконструкции ПСЗ (19 %), в сравнении с пациентами без ее пластики (8,6 %) [25]. A. Kumar et al. установили статистически значимое уменьшение частоты pillar pain через три–шесть месяцев после минимально инвазивного рассечения ПСЗ ($p = 0,41$). Однако в более отдаленные сроки результаты наблюдений не достигли статистически значимых величин [28].

По утверждению R.A. Bernstein et al., для профилактики pillar pain важно восстановление целостности ладонного апоневроза. Его ушивание после открытой декомпрессии сводит риск ее появления к минимуму [29]. В нашем исследовании ладонный апоневроз ушивали у пациентов всех трех групп. Это позволило сократить сроки возврата силового захвата кисти, предотвратить подвывих сухожилий сгибателей и рубцевание срединного нерва. Кроме этого, такой шаг дал возможность минимизировать частоту pillar pain. В первой группе она развилась только в двух клинических наблюдениях, а во второй и третьей ее не было вовсе.

N. Hollevoet et al. при кадаверном исследовании выявили, что место прикрепления мышц тенара к ПСЗ в ряде клинических наблюдений находилось в проекции локтевой стороны срединного нерва или было значительно смещено кнутри. В некоторых случаях ладонная поверхность ПСЗ была на 85 % покрыта мышцами тенара [9]. F. Alsafar et al. отметили, что 50 % лучевой поверхности связки занимают мышцы возвышения большого пальца (тенара), в ряде случаев лежащие на пути линии ее рассечения [8]. В настоящей работе мы установили, что место прикрепления мышц тенара к ПСЗ в 40 (43,5 %) клинических наблюдениях находилось на ее локтевой части. Все они составили вторую группу, пациентам которой выполнили открытую декомпрессию срединного нерва с рефиксацией этих мышц.

M. Jegal et al. обратили внимание на то, что в клинической практике нередко вся поверхность ПСЗ бывает покрыта мышцами тенара. В таких случаях выполнение релиза запястного канала требует рассечения брюшек этих мышц, что повышает риск повреждения моторной ветви срединного нерва, которая может иметь чрезсвязочный вариант строения. Авторы рекомендовали отслаивать мышцы тенара в лучевую сторону, чтобы можно было пересечь ПСЗ по локтевой части запястного канала, попутно проведя ревизию срединного нерва и его мышечной ветви, избежав их ятрогенного повреждения [10]. D.P. Green и J. Morgan описали случаи расположения мышц тенара на локтевой части ПСЗ, что, по мнению авторов, в 90 % случаев является косвенным признаком аномального отхождения моторной ветви срединного нерва, которую легко повредить при пересечении этих мышц [30]. T.C. Chern et al. констатировали, что при пересечении ПСЗ мышцы тенара теряли точку прикрепления, происходила их атрофия, функция кисти снижалась. Так, укорочение поверхностной головки *m. flexor pollicis brevis* составило 25 % (относительно длины покоя), локтевой части *m. abductor pollicis brevis* — 20 % (opposition and adduction), *m. opponens pollicis* — 20 % и *m. opponens digiti minimi* — 10 % [11]. По мнению F.K. Fuss и T.F. Wagner, это также является одной из причин возникновения *pillar pain* в послеоперационном периоде [2].

Применив на практике разработанный нами способ декомпрессии срединного нерва с рефиксацией мышц тенара и оценивая его ближайшие и отдаленные результаты, мы не наблюдали ни клинических, ни ЭМГ-признаков повреждения моторной ветви срединного нерва. Ни у кого не возникла *pillar pain*. Восстановление точки прикрепления мышц тенара способствовало приросту силы захвата кисти через шесть месяцев после операции на 15,2 %, улучшению показателей опросников DASH на 70,5 %, VSTQ-s — на 56,3 %, VSTQ-f — на 47 %, увеличению амплитуды М-ответа короткой мышцы, отводящей большой палец на 34,3 %, уменьшению дистальной латентности моторных волокон срединного нерва на 31,7 %, увеличению моторной скорости на 13,2 % и сенсорной скорости на 72,4 % по сравнению с величинами этих показателей до операции. Эти данные свидетельствуют о положительном влиянии на конечные результаты примененного нами способа рефиксации мышц тенара в случаях, когда они занимают более половины передней поверхности ПСЗ.

Итак, дифференцированный подход к выбору способа хирургического лечения наших пациентов с СЗК обеспечил достижение высокоуровневого положительного результата у пациентов всех трех групп. Вместе с этим, факт не столь позитивно проявленных и статистически достоверно не отличающихся промежуточных и конечных результатов у пациентов первой группы по сравнению с пациентами второй и третьей групп может быть связан с более совершенной техникой оперативных вмешательств во второй и третьей группах. С другой стороны, это может быть обусловлено более часто встречающейся выраженной степенью тяжести СЗК в первой группе (41,1 % против 37,5 % во второй и 38,4 % в третьей группах), но без статистически достоверных различий (табл. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Открытая декомпрессия срединного нерва при СЗК, выполненная нами у пациентов всех трех групп, позволила через шесть месяцев после операции достигнуть значимого клинического и функционального улучшения во всех клинических наблюдениях.

У большинства пациентов, которым после декомпрессии срединного нерва рефиксировали мышцы тенара (вторая группа) и выполнили пластику ПСЗ (третья группа) по предложенным нами способам, восстановление клинических, функциональных и ЭМГ-показателей начало происходить через три месяца, а значимо улучшилось через шесть месяцев по сравнению с пациентами, которым пластику ПЗК не выполняли (первая группа).

При осуществлении дифференцированного подхода к выбору способа открытой декомпрессии срединного нерва при СЗК необходимо учитывать анатомические особенности запястья, выраженность патологических изменений в этой зоне, возрастные и профессиональные характеристики пациентов.

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

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

Этическая экспертиза. Исследование одобрено Комитетом по биоэтике при Самарском государственном медицинском университете (протокол от 25 ноября 2025 г. № 312).

Информированное согласие. Все пациенты до начала лечения подписали информированное согласие на участие в исследовании и публикацию данных в открытом доступе. Детализирующая информация о персональных данных пациентов отсутствует.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пешин С.Е., Каракулова Ю.В., Няшин Ю.И., Няшин М.М. Синдром запястного канала с точки зрения биомеханики. Обзор литературы. *Российский журнал биомеханики*. 2022;26(2):13-18. doi: 10.15593/RZhBiomeh/2022.2.01.
2. Fuss FK, Wagner TF. Biomechanical alterations in the carpal arch and hand muscles after carpal tunnel release: a further approach toward understanding the function of the flexor retinaculum and the cause of postoperative grip weakness. *Clin Anat*. 1996;9(2):100-108. doi: 10.1002/(SICI)1098-2353(1996)9:2<100::AID-CA2>3.0.CO;2-L.
3. Ludlow KS, Merla JL, Cox JA, Hurst LN. Pillar pain as a postoperative complication of carpal tunnel release: a review of the literature. *J Hand Ther*. 1997;10(4):277-282. doi: 10.1016/s0894-1130(97)80042-7.
4. Lluch A. Reconstruction of the flexor retinaculum. In: Luchetti, R., Amadio, P. (eds) *Carpal Tunnel Syndrome*. Springer, Berlin, Heidelberg.; 2002:226-238. doi: 10.1007/978-3-540-49008-1_32.
5. Mujadzic T, Friedman HI, Mujadzic MM, et al. Modified Carpal Tunnel Release: A New Approach to Minimizing Pillar Pain. *Ann Plast Surg*. 2021;86(6S Suppl 5):S503-S509. doi: 10.1097/SAP.0000000000002885.
6. Morán-Morán J, Mérida-Velasco JR, Del Valle EB, Murillo-González J. A mini-incision carpal tunnel release technique to prevent pillar pain: A technical note. *Acta Orthop Traumatol Turc*. 2021;55(1):73-75. doi: 10.5152/j.aott.2021.20086.
7. Castro-Menéndez M, Pagazaurtundúa-Gómez S, Pena-Paz S, et al. Z-Elongation of the transverse carpal ligament vs. complete resection for the treatment of carpal tunnel syndrome. *Rev Esp Cir Ortop Traumatol*. 2016;60(6):355-365. doi: 10.1016/j.recot.2016.06.007.
8. Alsafar F, Li ZM. Thenar and Hypothenar Muscle Coverage on the Transverse Carpal Ligament. *J Wrist Surg*. 2021;11(2):150-153. doi: 10.1055/s-0041-1735887.
9. Hollevoet N, Barbaix E, D'Herde K, et al. Muscle fibres crossing the line of incision used in carpal tunnel decompression. *J Hand Surg Eur Vol*. 2010;35(2):115-119. doi: 10.1177/1753193409102465.
10. Jegal M, Woo SJ, Lee HI, et al. Anatomical Relationships between Muscles Overlying Distal Transverse Carpal Ligament and Thenar Motor Branch of the Median Nerve. *Clin Orthop Surg*. 2018;10(1):89-93. doi: 10.4055/cios.2018.10.1.89.
11. Chern TC, Jou IM, Chen WC, et al. An ultrasonographic and anatomical study of carpal tunnel, with special emphasis on the safe zones in percutaneous release. *J Hand Surg Eur Vol*. 2009;34(1):66-71. doi: 10.1177/1753193408097322.
12. Измалков С.Н., Семенкин О.М., Братийчук А.Н., Демченко Н.А. Способ рефлексии мышц возвышения большого пальца кисти при открытой декомпрессии срединного нерва у пациентов с синдромом запястного канала. Патент РФ на изобретение № 2828980. 21.10.2024. Бюл. № 30. Доступно по: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2828980&TypeFile=html. Ссылка активна на 02.02.2026.
13. Котельников Г.П., Ларцев Ю.В., Измалков С.Н. и др. Способ хирургического лечения пациентов с синдромом запястного канала. Патент РФ на изобретение № 2734176. 13.10.2020. Бюл. № 29. Доступно по: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2734176&TypeFile=html. Ссылка активна на 02.02.2026.
14. Beck JD, Wingert NC, Rutter MR, et al. Clinical outcomes of endoscopic carpal tunnel release in patients 65 and over. *J Hand Surg Am*. 2013;38(8):1524-1529. doi: 10.1016/j.jhsa.2013.05.016.
15. Hudak PL, Amadio PC, Bombardier C. Development of an upper extremity outcome measure: the DASH (disabilities of the arm, shoulder and hand) [corrected]. The Upper Extremity Collaborative Group (UECG). *Am J Ind Med*. 1996;29(6):602-608. doi: 10.1002/(SICI)1097-0274(199606)29:6<602::AID-AJIM4>3.0.CO;2-L.
16. Розов А.В., Лиля А.М., Бялик Е.И. и др. Результаты сухожильных трансферов для стабилизации суставов запястья у пациентов с ревматоидным артритом. *Наука и инновации в медицине*. 2024;9(4):311-316. doi: 10.35693/SIM633628.
17. Levine DW, Simmons BP, Koris MJ, et al. A self-administered questionnaire for the assessment of severity of symptoms and functional status in carpal tunnel syndrome. *J Bone Joint Surg Am*. 1993;75(11):1585-1592. doi: 10.2106/00004623-199311000-00002.
18. Юсупова Д.Т., Супонева Н.А., Зимин А.А. и др. Валидация Бостонского опросника по оценке карпального туннельного синдрома (Boston Carpal Tunnel Questionnaire) в России. *Нервно-мышечные болезни*. 2018;8(1):38-45. doi: 10.17650/2222-8721-2018-8-1-38-45.
19. Семенкин О.М., Измалков С.Н., Братийчук А.Н. и др. Результаты оперативного лечения пациентов с синдромом запястного канала в зависимости от степени выраженности заболевания. *Гений ортопедии*. 2021;27(1):24-31. doi: 10.18019/1028-4427-2021-27-1-24-31.
20. Николаев С. Г. *Электромиография: клинический практикум*. Иваново: ПресСто; 2019:392.
21. Гильвег А.С., Парфенов В.А., Евзиков Г.Ю. Ближайшие и отдаленные результаты декомпрессии срединного нерва при синдроме запястного канала. *Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика*. 2018;10(3):79-85. doi: 10.14412/2074-2711-2018-3-79-85.
22. Беляков Ю.В., Иваненко А.В., Олейник Е.А. Осложнения хирургического лечения и причины рецидивов синдрома запястного канала. *Российский нейрохирургический журнал им. профессора А.Л. Поленова*. 2021;13(4):15-21
23. Gartsman GM, Kovach JC, Srouch CC, et al. Carpal arch alteration after carpal tunnel release. *J Hand Surg Am*. 1986;11(3):372-374. doi: 10.1016/s0363-5023(86)80144-7.
24. Luchetti R, Amadio P. *Carpal Tunnel Syndrome*. Berlin: Springer; 2002:121-129. doi: 10.1007/978-3-540-49008-1.
25. Seitz WH, Lall A. Open carpal tunnel release with median neurolysis and Z-plasty reconstruction of the transverse carpal ligament. *Current Orthopaedic Practice*. 2013;24(1):53-57. doi: 10.1097/BCO.0b013e3182797ac3.
26. Netscher D, Steadman AK, Thornby J, Cohen V. Temporal changes in grip and pinch strength after open carpal tunnel release and the effect of ligament reconstruction. *J Hand Surg Am*. 1998;23(1):48-54. doi: 10.1016/S0363-5023(98)80088-9.
27. Котельников Г.П., Повелихин А.К., Князев Н.А. и др. Отдалённые результаты хирургического лечения с применением реконструкции поперечной запястной связки у пациентов с синдромом запястного канала в зависимости от возрастных категорий и степени тяжести заболевания. *Вестник медицинского института «РЕАВИЗ»*. 2023;13(2):56-61. doi: 10.20340/vmi-rvz.2023.2.CLIN.6.
28. Kumar AA, Lawson-Smith M. Pillar Pain After Minimally Invasive and Standard Open Carpal Tunnel Release: A Systematic Review and Meta-analysis. *J Hand Surg Glob Online*. 2024;6(2):212-221. doi: 10.1016/j.jhsg.2023.12.003.
29. Bernstein RA. Endoscopic carpal tunnel release. *Conn Med*. 1994;58(7):387-94.
30. Green DP, Morgan JP. Correlation between muscle morphology of the transverse carpal ligament and branching pattern of the motor branch of median nerve. *J Hand Surg Am*. 2008;33(9):1505-1511. doi: 10.1016/j.jhsa.2008.05.025.

Статья поступила 11.12.2025; одобрена после рецензирования 26.01.2026; принята к публикации 09.02.2026.

The article was submitted 11.12.2025; approved after reviewing 26.01.2026; accepted for publication 09.02.2026.

Информация об авторах:

Сергей Николаевич Измалков — доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой, izmalkov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0108-597X>;

Олег Михайлович Семенкин — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, доцент кафедры, olegsemenkin63@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4461-9994>;

Александр Николаевич Братийчук — доктор медицинских наук, профессор кафедры, brat59@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3953-968X>;

Алексей Константинович Усов — кандидат медицинских наук, заведующий отделением, доцент кафедры, usov82@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4510-0959>;

Никита Алексеевич Демченко — аспирант, врач — травматолог-ортопед, n.a.demchenko@samsmu.ru, <https://orcid.org/0009-0006-4636-5728>;

Алена Евгеньевна Гусева — врач функциональной диагностики, alena.guseva@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-5051-0969>;

Кира Фларитовна Хайруллина — врач ультразвуковой диагностики, uzi163k.f.hairullina@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-7852-4759>.

Information about the authors:

Sergey N. Izmalkov — Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department, izmalkov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0108-597X>;

Oleg M. Semenkin — Candidate of Medical Sciences, orthopaedic surgeon, Associate Professor of the Department, olegsemenkin63@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4461-9994>;

Alexander N. Bratiychuk — Doctor of Medical Sciences, Professor of the Department, brat59@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3953-968X>;

Alexey K. Usov — Candidate of Medical Sciences, Head of the Department, Associate Professor of the Department, usov82@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4510-0959>;

Nikita A. Demchenko — postgraduate student, orthopaedic surgeon, n.a.demchenko@samsmu.ru, <https://orcid.org/0009-0006-4636-5728>;

Alena Ev. Guseva — functional diagnostics doctor, alena.guseva@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-5051-0969>;

Kira F. Khairullina — ultrasound diagnostics doctor, uzi163k.f.hairullina@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-7852-4759>.

Вклад авторов:

Измалков С.Н. — утверждение окончательного варианта рукописи для публикации.

Семенкин О.М. — существенный вклад в разработку концепции и дизайна исследования, написание текста рукописи.

Братийчук А.Н. — редактирование текста рукописи, согласие нести ответственность за все аспекты рукописи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

Усов А.К. — сбор и интерпретация данных.

Демченко Н.А. — сбор данных и их статистическая обработка.

Гусева А.Е. — сбор, анализ данных.

Хайруллина К.Ф. — сбор, анализ данных.

Научная статья

УДК 616.711-007.234-001.5-089.227.84-089.223-089.168

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2026-32-2-186-196>

Факторы, влияющие на стабильность транспедикулярной фиксации при лечении пациентов с застарелыми переломами позвоночника на фоне остеопороза

П.Г. Мытыга[✉], С.В. Масевнин, В.С. Мураховский, К.В. Жданович, Н.С. Заборовский

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

Автор, ответственный за переписку: Павел Геннадьевич Мытыга, paveji.official@gmail.com

Аннотация

Введение. При растущей продолжительности жизни и старении населения проблема переломов позвонков на фоне низкой минеральной плотности костной ткани становится все более актуальной. Несмотря на многообразие методик лечения, сохраняется риск развития нестабильности транспедикулярной фиксации в послеоперационном периоде.

Цель работы — выявить факторы риска развития нестабильности спондилосинтеза у пациентов с остеопоротическими переломами позвоночника для обоснования индивидуализированных подходов к их хирургическому лечению.

Материалы и методы. Ретроспективное одноцентровое исследование основано на анализе данных 82 пациентов, прооперированных в НМИЦ ТО им. Р.Р. Вредена с 2019 по 2023 гг. Пациенты распределены по группам: «Случай» (с развившейся нестабильностью фиксации, $n = 8$) и «Контроль» (без развития нестабильности фиксации, $n = 74$). Оценивали потенциальные факторы риска: возраст, индекс массы тела, протяженность фиксации, установку винта в повреждённый позвонок, диаметр винтов, наличие и тип применения аугментации костным цементом, объем декомпрессии, наличие и метод коррекции локального кифоза (вертебротомии по Schwab), продолжительность операции, кровопотерю.

Результаты. Статистически значимое ($p < 0,05$) различие между группами имело только введение винта в повреждённый позвонок. Модель логистической регрессии выявила факторы, положительно влияющие на сохранение стабильности: промежуточная фиксация, аугментация сломанного позвонка, аугментация винтов, больший диаметр винтов. Выполнение ламинэктомии, фасетэктомии, пожилой возраст и избыточная масса тела определены как факторы, отрицательно влияющие на стабильность металлоконструкции.

Обсуждение. Пациенты с остеопоротическими переломами позвонков характеризуются значительной неоднородностью по возрасту и соматическому статусу, что осложняет выбор оптимальной хирургической тактики. Основными факторами, отрицательно влияющими на стабильность, являются ламинэктомия и фасетэктомия, особенно при резекции фасеточных суставов. Для повышения стабильности целесообразно использовать винты большего диаметра и аугментацию костным цементом, однако это сопряжено с риском специфических осложнений. Установка винта в сломанный позвонок является наиболее значимым положительным фактором, что подтверждается другими биомеханическими и клиническими исследованиями. Ограничения исследования связаны с ретроспективным дизайном, небольшим объемом выборки и неоднородностью когорты, что снижает статистическую достоверность и обобщаемость результатов.

Заключение. У пациентов с застарелыми остеопоротическими переломами позвонков нестабильность фиксации после транспедикулярной стабилизации носит многофакторный характер. Наибольшее значение имеют хирургические факторы. Ламинэктомия и фасетэктомия повышают риск потери стабильности, тогда как установка винтов в сломанный позвонок и аугментация костным цементом способствуют её сохранению. Протяжённость фиксации, объём коррекции кифоза и остаточный кифоз значимого влияния не оказывают. Результаты подтверждают необходимость индивидуализации хирургической тактики у пациентов с остеопорозом.

Ключевые слова: остеопороз, перелом позвоночника, транспедикулярная фиксация, нестабильность

Для цитирования: Мытыга П.Г., Масевнин С.В., Мураховский В.С., Жданович К.В., Заборовский Н.С. Факторы, влияющие на стабильность транспедикулярной фиксации при лечении пациентов с застарелыми переломами позвоночника на фоне остеопороза. *Гений ортопедии*. 2026;32(2):186-196. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-2-186-196.

Original article

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2026-32-2-186-196>



Factors affecting the stability of transpedicular fixation in patients with neglected osteoporotic vertebral fractures

P.G. Mytyga[✉], S.V. Masevnin, V.S. Murakhovsky, K.V. Zhdanovich, N.S. Zaborovskii

Vreden National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, St. Petersburg, Russian Federation

Corresponding author: Pavel G. Mytyga, paveji.official@gmail.com

Abstract

Introduction With increasing life expectancy and an aging population, vertebral fractures are one of the most common fractures associated with low bone mineral density. The problem of vertebral fractures associated with low bone mineral density is becoming increasingly common. Despite a variety of treatment methods, the risk of transpedicular fixation instability in the postoperative period remains.

The **objective** was to identify risk factors for unstable spondylosynthesis in patients with osteoporotic spinal fractures to substantiate an individualized approach to the surgical treatment.

Material and methods This A retrospective single-center study was based on the findings of 82 patients who underwent surgical treatment at the R.R. Vreden National Medical Research Center for Trauma and Orthopedics between 2019 and 2023. Patients were divided into a case group of patients who developed unstable fixation, $n = 8$) and controls (who had no hardware instability, $n = 74$). Potential risk factors included age, body mass index, fixation length, a screw placed in the involved vertebra, screw diameter, the presence and type of bone cement augmentation, the amount of decompression, the presence of local kyphosis and correction technique (Schwab vertebroto my), duration of surgery and blood loss.

Results A screw placed into the involved vertebra was the only statistically significant ($p < 0.05$) difference between the groups. A logistic regression model was used to identify factors that could improve the hardware stability including intermediate fixation, augmentation of the fractured vertebra, screw augmentation and a larger screw diameter. Laminectomy, facetectomy, advanced age, and excess body weight were identified as factors negatively affecting the stability of the metal construct.

Discussion Patients with osteoporotic vertebral fractures are heterogeneous in age and medical status which complicates selection of optimal surgical approaches. Laminectomy and facetectomy are the main factors impacting stability in case of facet joint resection. Larger-diameter screws and bone cement augmentation are practical for better stability and associated with a risk of specific complications. The screw placed in the broken vertebra is a significant positive factor, as confirmed by other biomechanical and clinical studies. Limitations of the study included the retrospective design, small sample size and cohort heterogeneity, which reduce the statistical power and generalizability of the results.

Conclusion Unstable transpedicular fixation after stabilization is multifactorial in patients with chronic osteoporotic vertebral fractures. Surgical factors are most significant. Laminectomy and facetectomy increase the risk of instability with the screw placed in the broken vertebra and bone cement augmentation helps maintain the stability. The length of fixation, the extent of kyphosis correction and residual kyphosis had no significant effect in the study sample. These results support the need for individualized surgical approaches in osteoporotic patients.

Keywords: osteoporosis, spinal fracture, transpedicular fixation, instability

For citation: Mytyga PG, Masevnin SV, Murakhovsky VS, Zhdanovich KV, Zaborovskii NS. Factors affecting the stability of transpedicular fixation in patients with neglected osteoporotic vertebral fractures. *Genij Ortopedii*. 2026;32(2):186-196. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-2-186-196.

ВВЕДЕНИЕ

Ежегодно в мире регистрируют 1,4–1,5 млн случаев компрессионных переломов позвоночника, из которых около трети обусловлены системным остеопорозом [1, 2]. В Российской Федерации остеопорозом страдает более 14 млн человек, что составляет приблизительно 10 % населения страны, а остеопения диагностирована у 20 млн жителей. Популяционные исследования на территории России показывают, что уже в 2013 г. снижение минеральной плотности костной ткани, характерное для остеопороза, было выявлено у 33 % женщин и 27 % мужчин старше 50 лет. С учётом старения населения ожидается рост числа пациентов с недостаточной плотностью костной ткани и сопряжёнными переломами, который, по прогнозам, к 2050 г. может достигнуть 21 млн случаев в год [3].

Большая часть переломов (от 60 до 75 %) локализуется в сегменте Th12–L2, который считается наиболее уязвимой зоной. Эта зона характеризуется биомеханическим переходом от более ригидного грудного отдела к относительно мобильному поясничному отделу позвоночника [4]. Согласно классической теории трёхопорной спинальной стабильности, предложенной F. Denis [5], позвоночник разделяется на три колонны: переднюю, среднюю и заднюю. При остеопоротических компрессионных переломах преимущественно повреждаются передняя и средняя колонны, включающие переднюю продольную связку и тело позвонка. При этом сохранившаяся целостность задней колонны является ключевым фактором, обеспечивающим стабильность позвоночно-двигательного сегмента и предотвращающим развитие неврологического дефицита. Исходя из этого, неврологические нарушения при остеопоротических переломах встречаются относительно редко, так как костные фрагменты не смещаются в позвоночный канал и не вызывают компрессии его содержимого [6, 7]. Тем не менее, при прогрессировании деформации, нестабильности перелома и возникновении сдавления невральных структур могут развиваться неврологические симптомы, что требует своевременного хирургического вмешательства.

Компрессионные переломы позвоночника при системном остеопорозе составляют значительную долю спинальной патологии у пожилых пациентов, что обусловлено преимущественно биомеханическими особенностями пояснично-грудного перехода и требует адекватного клинического подхода с учётом возможных осложнений длительного обездвиживания и риска каскадных переломов.

Анализ научной литературы показал, что в настоящее время отсутствует единый и стандартизированный подход к лечению пациентов с патологическими переломами грудного и поясничного отделов позвоночника, возникающими на фоне остеопороза, в особенности при отсутствии у больных неврологической симптоматики. Пациенты с остеопоротическими переломами позвонков, вызванными низкоэнергетической травмой, требуют более дифференцированного и взвешенного выбора лечебной тактики с учётом возрастных особенностей, сопутствующих соматических заболеваний и степени выраженности изменений костной ткани.

Для части пострадавших показано хирургическое лечение с установкой металлофиксаторов [8]. Несмотря на множество методик, нет единого консенсуса по показаниям к хирургии у больных с остеопорозом. Пациентам с остро развившемся неврологическим дефицитом хирургия необходима, у остальных показания к операции оценивают с учётом соматических рисков и состояния позвоночного столба, включая степень компрессии и деформации позвонков, длительность болевого синдрома и локализацию перелома [9, 10].

Выбор метода фиксации затруднён необходимостью обеспечить надёжную стабильность имплантов в изменённой кости, а также определением оптимального доступа и объёма вмешательства. Передние доступы чаще сопровождаются большей травматизацией и не демонстрируют существенных преимуществ по сравнению с задними, при этом сохраняется большой риск развития нестабильности межтелового импланта при использовании MESH сеток или раздвижных имплантов (по типу vLift). Использование имплантатов с широким основанием и правильное позиционирование импланта может снижать риск его миграции и нестабильности у некоторых пациентов [11–13].

Хирургические вмешательства из заднего доступа имеют риск развития нестабильности фиксации, особенно в тех условиях, когда нет возможности создания опорного костного блока. Важно учитывать, что возраст и наличие сопутствующих заболеваний повышают риск развития осложнений при ревизионных операциях.

Таким образом, проблема определения оптимальной тактики хирургического лечения у пациентов с остеопорозом заключается в выборе минимально инвазивного хирургического вмешательства с приложением максимального количества усилий к сохранению стабильности конструкции в послеоперационном периоде.

Цель работы — выявить факторы риска развития нестабильности спондилосинтеза у пациентов с остеопоротическими переломами позвоночника для обоснования индивидуализированных подходов к их хирургическому лечению.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Исследование представляет собой ретроспективный сравнительный анализ результатов хирургического лечения пациентов с остеопоротическими переломами позвоночника типов OF4 и OF5, получивших медицинскую помощь в НМИЦ травматологии и ортопедии имени Р.Р. Вредена в период с 2019 по 2023 гг.

Критерии включения:

- пациенты любого пола старше 50 лет;
- диагноз — системный остеопороз, подтверждённый медицинской документацией;
- наличие одноуровневых остеопоротических переломов грудного и поясничного отделов позвоночника типов OF4 и OF5 по классификации AO Spine DGOU [14];
- срок, прошедший с момента травмы, — не менее шести недель [15];
- проведённое в НМИЦ ТО им. Р.Р. Вредена репозиционно-стабилизирующее хирургическое вмешательство с применением систем транспедикулярной фиксации;
- минимальный период наблюдения — шесть месяцев после хирургического вмешательства.

Критерии невключения:

- сколиотическая деформация позвоночника во фронтальной плоскости с углом Кобба более 10°, возникшая до перелома;
- наличие периимплантной инфекции;
- предшествующие хирургические вмешательства на оперируемом сегменте;
- наличие переломов смежных позвонков типов OF4 и OF5 до вмешательства;
- пациенты, не допущенные к хирургическому вмешательству ввиду тяжести соматического статуса по шкале Американской анестезиологической ассоциации ASA (англ.: American Society of Anesthesiologists) (ASA IV, ASA V) [16].

Участники исследования

Проанализированы данные 82 пациентов, большинство из которых составляли женщины ($n = 70$; 85 %). Средний возраст — 68,99 (SD = 7,12), индекс массы тела (ИМТ) — 26,53 (SD = 5,10). Большинство пациентов ($n = 55$; 67 %) имели индекс ASA III. Наиболее часто встречающиеся сопутствующие заболевания — гипертоническая болезнь (код I11.9 по МКБ 10) и сахарный диабет 2 типа (код E11 по МКБ 10). Большинство пациентов ($n = 64$; 78 %) ранее не получали лечение по поводу остеопороза. Сохраненную неврологическую функцию (классы D и E по ASIA) имели 76 пациентов (93 %).

Распределение на группы в зависимости от исхода хирургического лечения:

- группа «Контроль» ($n = 74$) — пациенты без признаков нестабильности фиксации;
- группа «Случай» ($n = 8$) — пациенты, у которых возникла нестабильность фиксации или перелом смежных позвонков.

У семи человек (88 %) группы «Случай» выявлена зона резорбции вокруг винтов, у одного пациента (12 %) — перелом фиксирующего винта.

Антропометрические данные пациентов представлены в таблице 1. По исследуемым показателям обе группы являлись однородными и не имели статистически значимой разницы между собой.

Таблица 1

Антропометрические показатели исследуемой когорты

Критерий	Всего ($n = 82$), М (SD)	Группа «Контроль» ($n = 74$), М (SD)	Группа «Случай» ($n = 8$), М (SD)	P критерий
Возраст (лет)	68,99 (7,12)	69,03 (6,98)	68,67 (8,46)	0,8923
ИМТ (кг/м ²)	26,63 (5,10)	26,42 (4,89)	28,57 (7,03)	0,2623
Вес (кг)	70,51 (12,88)	70,01 (12,21)	75,06 (18,44)	0,2950

У всех пациентов выявлены признаки снижения минеральной плотности костной ткани по данным денситометрии (Т-критерий $-2,80$ (SD = 0,64)) и КТ (HU 80,78 (SD = 25,31)), при этом индекс VBQ составил 2,34 (SD = 0,02).

Характеристика групп по типу и локализации переломов позвонков представлены в таблице 2.

Таблица 2

Распределение по типу и локализации переломов позвонков

Тип перелома и позвонок	Все пациенты (n = 82)		Группа «Контроль» (n = 74)		Группа «Случай» (n = 8)		P критерий
	абс.	%	абс.	%	абс.	%	
Ранжирование по типу перелома (DGOU)							
OF4	72	87,8	65	87,8	7	87,5	0,2932
OF5	10	12,2	9	12,2	1	12,5	0,4241
Ранжирование по локализации перелома							
Th12	25	30,9	22	29,7	3	37,5	0,6812
L1	23	28,4	20	27	3	37,5	0,6657
L2	11	13,6	10	13,5	1	12,5	1,000
L4	6	7,4	6	8,1	0		
Th11	5	6,2	5	6,7	0		
L3	4	4,9	4	5,4	0		
Th8	3	3,7	3	4	0		
Прочие сегменты	4	4,9	4	5,4	0		

Наиболее часто встречающимися сегментами являлись позвонки грудопоясничного перехода. Посегментарное сравнение групп «Случай» и «Контроль» по типу переломов не показали достоверного статистического различия между группами.

Исучаемые критерии и параметры исследования

Клинические параметры пациента:

- возраст;
- пол;
- индекс массы тела;
- риск хирургического лечения по шкале ASA;
- наличие остеомодифицирующей терапии в анамнезе.

Данные лучевых методов диагностики:

- денситометрия (давность не более одного года);
- МПКТ (минеральная плотность костной ткани) в единицах Хаунсфилда, рассчитанная по среднему значению плотности поперечного среза губчатой кости тела L3 позвонка [17];
- индекс VBQ (*англ.*: Vertebral Bone Quality) – индекс качества кости по МРТ, рассчитанный как отношение среднего значения T1 взвешенного сигнала от тел L1, L2, L3, L4, L5 позвонков (сломаные сегменты исключали из анализа) к значению сигнала спинномозговой жидкости на уровне L3 [18];
- локализация и характер перелома по DGOU;
- угол локального кифоза рассчитывали как угол Кобба между верхней замыкательной пластинкой вышележащего позвонка и нижней замыкательной пластинкой нижележащего, формирование костного блока оценивали по классификации F.Chistensen [19].

Стабильность конструкции оценивали по наличию:

- зон резорбции более 1 мм вокруг винтов;
- признаков разобщения элементов конструкции;
- болевого синдрома;
- переломов верхних и нижних позвонков относительно зоны фиксации не менее чем через шесть месяцев после вмешательства.

Характеристики хирургического вмешательства:

- протяженность фиксации;
- диаметр;

- размеры винтов;
- наличие и тип применения аугментации костным цементом;
- объем декомпрессии;
- наличие и метод коррекции локального кифоза (вертебротомии по Schwab) [20];
- продолжительность операции;
- кровопотеря;
- сроки послеоперационного пребывания;
- осложнения по классификации Calvien – Dindo [21].

Статистическая обработка

Для описательной статистики использовали среднее и медианное значения; стандартное отклонение (SD); межквартильный размах (IQR).

Для оценки факторов риска точности используемой модели логистической регрессии применяли показатели ROC AUC, точности и чувствительности.

Статистическую обработку и многофакторный регрессионный анализ выполняли с использованием пакетов pandas, numpy, scikit-learn, statsmodels, matplotlib для среды программирования Python.

Этические нормы

Данное исследование не подлежало рассмотрению этическим комитетом, поскольку не затрагивало вопросы, требующие этического одобрения. Исследование не нарушает принципы Хельсинкской декларации и требования российского законодательства в области этики научных исследований.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Характеристика выполненных вмешательств по сравниваемым критериям представлена в таблице 3.

Таблица 3

Характеристика выполненных вмешательств

Критерий		Все пациенты (n = 82)	Группа «Контроль» (n = 74)	Группа «Случай» (n = 8)	P критерий
Инвазивность операции					
Продолжительность (мин), M (SD)		119,10 (48,00)	118,75 (48,84)	123,33 (39,71)	0,8239
Кровопотеря (мл), M (SD)		276,50 (259,60)	268,51 (248,90)	375,00 (384,38)	0,3371
Протяжённость фиксации					
Короткосегментарная (3 сегмента)	абс.	42	39	3	0,6564
	%	51,2	52,7	37,5	
Длинносегментарная (≥ 4 сегментов)	абс.	39	35	4	1,0000
	%	47,6	47,3	50,0	
Хирургические приёмы					
Винт в повреждённый позвонок	абс.	36	36	0	0,0377*
	%	44,4	48,6	0,0	
Аугментация винтов	абс.	37	36	1	0,1146
	%	45,1	48,6	12,5	
Аугментация позвонка	абс.	14	14	0	0,3918
	%	17,1	18,9	0,0	
Ламинэктомия	абс.	20	17	3	0,6344
	%	24,4	23,0	37,5	
Фасетэктомия	абс.	25	22	3	0,9607
	%	30,5	29,7	37,5	
Диаметр винтов (мм)	M	6,60	6,60	6,58	0,9267
	SD	0,35	0,35	0,38	

Сравнительный анализ групп «Случай» и «Контроль» по показателям инвазивности вмешательств выявил одно статистически значимое различие между группами, — установка винта в поврежденный позвонок. В группу «Случай» попал только один пациент, которому выполняли цементную аугментацию позвонков.

Анализ инвазивности хирургического вмешательства показал большое стандартное отклонение показателей кровопотери и продолжительности операции, что обусловлено широкой вариабельностью применения различных методов хирургических вмешательств, начиная от малоинвазивной чрескожной фиксации как наиболее щадящего метода, заканчивая обширными корригирующими вертебротомиями с резекцией позвонков и межпозвонковых дисков.

Ни у кого из пациентов исследуемой выборки не выявлено осложнений в раннем послеоперационном периоде.

Для исправления локальной кифотической деформации у пациентов применяли корригирующие вертебротомии по Schwab (табл. 4), кроме типов 2 и 5.

Таблица 4

Сравнение углов локального кифоза и методов коррекции деформации

Критерий	Все пациенты (n = 82)	Группа «Контроль» (n = 74)	Группа «Случай» (n = 8)	P критерий	
Углы локального кифоза					
Исходный (°) M, SD	22,83 (10,68)	22,51 (10,97)	25,77 (7,29)	0,4162	
Остаточный (°) M, SD	14,48 (9,66)	14,23 (9,88)	18,14 (4,38)	0,3848	
Устраненный(°) M, SD	7,18 (10,66)	7,33 (10,84)	5,80 (9,27)	0,7028	
Метод коррекции					
Без коррекции	абс.	71	64	7	1,0000
	%	86,6	86,5	87,5	
Тип 1	абс.	6	5	1	1,0000
	%	7,3	6,8	12,5	
Тип 3	абс.	1	1	0	1,0000
	%	1,2	1,4	0,0	
Тип 4	абс.	3	3	0	1,0000
	%	3,7	4,1	0,0	

При сравнении рентгенологических данных не выявлено статистической значимости между группами по углам исходного и остаточного (послеоперационного) кифоза, объёму и методу коррекции локальной кифотической деформации.

Для выявления факторов развития нестабильности фиксации был выполнен многофакторный регрессионный анализ. Используемая модель логистической регрессии показала высокую прогностическую способность: ROC-AUC — 0,924, точность — 91,5 %, чувствительность — 98 %. Результаты работы модели визуализированы в виде отношения шансов (рис. 1).

Важно отметить, что протяжённость фиксации и остаточный кифоз не влияют на стабильность конструкции в данной выборке.

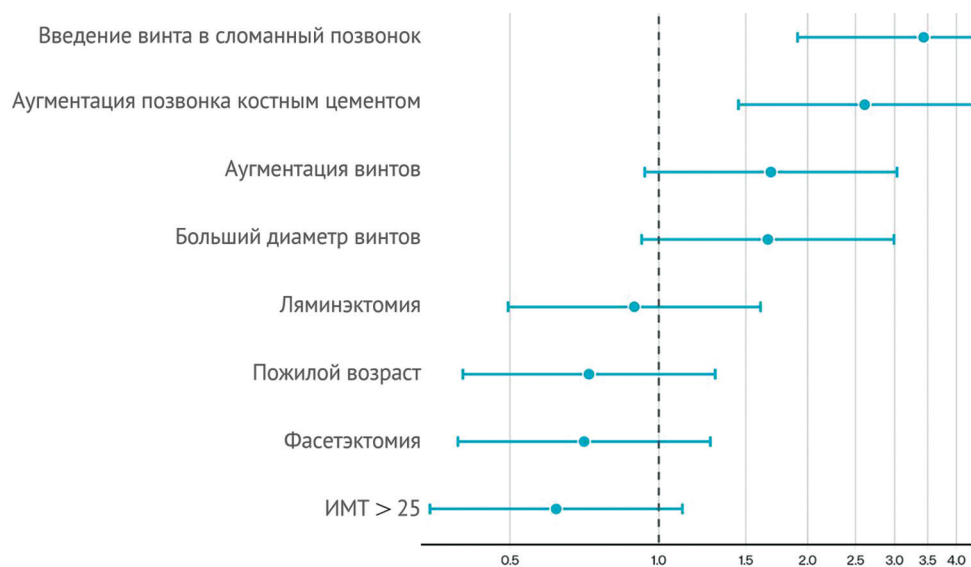


Рис. 1. Отношение шансов сохранения стабильности фиксации

Клинический пример

Пациентка 82 лет (на момент операции). Причиной обращения в клинику послужил болевой синдром в груднопоясничном отделе позвоночника до 7 б. по ВАШ, без иррадиации в ноги. Со слов пациентки, заболела остро после неловкого движения в пределах кровати около полугода до госпитализации, без значимой динамики от консервативного лечения. Терапевтический анамнез отягощён гипертонической болезнью, ишемической болезнью сердца, почечной недостаточностью. Рентгенологические признаки нестабильного компрессионного перелома Th11 позвонка. По данным денситометрии, выявлены признаки остеопороза ($T_{кр} = -3,0$). С учётом соматического статуса и характера перелома пациентке выполнена малоинвазивная короткосегментарная фиксация перелома без использования аугментации (рис. 2).

Срок госпитализации составил шесть дней. Через семь месяцев после вмешательства пациентка отметила ухудшение состояния, появление болей, схожих с дооперационными, но меньшей интенсивности. На контрольной КТ выявлены признаки зоны остеолитиза вокруг винтов (рис. 3, красная стрелка). От ревизионного вмешательства больная отказалась.

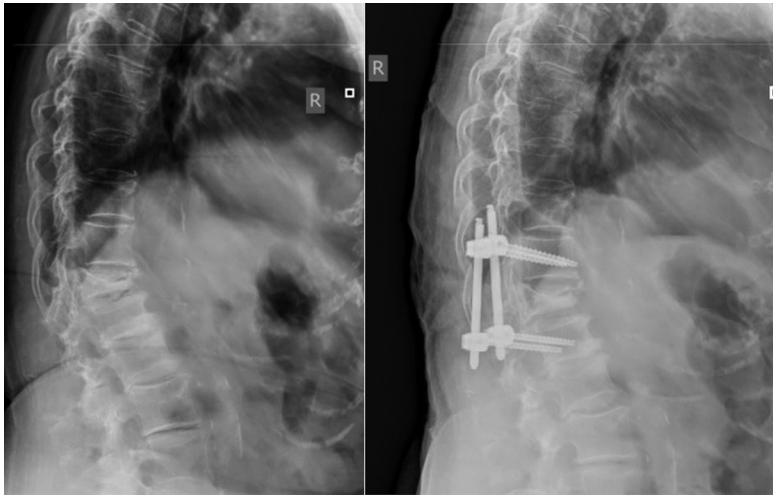


Рис. 2. Рентгенограммы пациентки группы «Случай» до и после операции



Рис. 3. КТ пациентки группы «Случай» через семь месяцев после операции

Опираясь на результаты исследования, можно предположить, что вероятной причиной развития нестабильности конструкции в послеоперационном периоде могло послужить отсутствие «защитных» факторов (аугментации позвонков) и промежуточной фиксации, положительно влияющих на стабильность. Важно отметить, что задние опорные структуры позвонков в описываемом случае были полностью сохранены. Применение костного цемента для укрепления транспедикулярных винтов и введение винта в сломанный позвонок, вероятно, оказывают большее влияние на стабильность, чем воздействие на задние костные структуры позвоночного столба, однако это утверждение нуждается в дополнительном исследовании.

ОБСУЖДЕНИЕ

Пациенты с остеопоротическими переломами представляют собой крайне неоднородную группу по возрасту и соматическому статусу, что затрудняет выбор оптимальной тактики хирургического лечения, однако важно отметить в анализируемой когорте пациентов преобладание женского пола и отсутствие в анамнезе антирезорбтивной терапии. Наиболее уязвимой, с точки зрения сохранения стабильности имплантов, группой являются пожилые пациенты с избыточной массой тела. Тактика лечения таких пациентов нуждается в дополнительном изучении.

По полученным данным, однородная сохранность группы по неврологическому статусу позволяла выполнять стабилизирующие хирургические вмешательства без осуществления декомпрессии с широкой резекцией задних костных структур, что впоследствии оказывало положительное влияние на сохранение стабильности металлоконструкции. В то же время наиболее значимым хирургическим фактором, отрицательно влияющим на сохранение фиксации, является выполнение ламинэктомии и фасетэктомии. Вероятнее всего, это обусловлено большей дестабилизацией позвоночно-двигательного сегмента и подтверждается результатами других клинических исследований [22, 23]. Интересно отметить, что резекция фасеточных суставов оказывает большее влияние на наступление нестабильности, чем просто ламинэктомия.

Причиной компрессии невральных структур при переломах позвонков наиболее часто является клин Урбана, — фрагмент тела позвонка, выстоящий в позвоночный канал. В этом случае оптимальной тактикой хирургического лечения является декомпрессия из переднего доступа с транспедикулярной фиксацией для восстановления передней опорной колонны. Некоторые авторы для улучшения опороспособности рекомендуют применение межтелового импланта на широком основании [11], однако при этом может сохраняться высокая вероятность миграции и проседания межтелового импланта [13].

С целью повышения первичной стабильности конструкции целесообразно использовать винты большего диаметра для максимального заполнения ножки позвонка. Биомеханически это обусловлено фиксацией винтов в более плотной кортикальной части ножки и равномерном распределении нагрузки [24, 25]. Отрицательной стороной введения винтов большого диаметра является высокая вероятность мальпозиции, также несоответствие размеров импланта и ножки позвонка может привести к расколу последней и дестабилизации сегмента. Протяжённость фиксации в исследуемой группе существенного влияния на сохранения стабильности не оказывала. Вместе с тем многие исследователи указывают на то, что с появлением цементной фиксации и других методик аугментации винтов протяжённость фиксации перестаёт значимо влиять на сохранение стабильности [26].

Активное использование костного цемента (аугментация сломанного позвонка, винтов) существенно влияет на сохранение стабильности конструкции в послеоперационном периоде, в этом наши результаты согласуются с данными литературы [27, 28]. Однако использование костного цемента не является безопасным хирургическим приёмом, его применение сопряжено со значительным повышением риска переломов смежных позвоночных сегментов, особенно в случае утечки цемента в межпозвонковые диски. Кроме того, известны случаи цементной эмболии сосудов сердца и лёгочной артерии, которые могут привести к летальному исходу [29, 30]. Описаны случаи компрессии невральных структур и появления неврологического дефицита у пациентов на фоне утечки цемента в позвоночный канал, что может приводить к ревизионным хирургическим вмешательствам [31, 32].

Промежуточная фиксация (введение винта в сломанный позвонок) в рамках проведённого исследования является наиболее значимым фактором, влияющим на сохранение стабильности фиксации. Данный хирургический приём может быть биомеханически обоснован наличием точки фиксации, препятствующей ротационной и трансляционной деформации сегмента [33]. Результаты нашего исследования являются сопоставимыми с данными других авторов, которые также подтверждают положительное влияние промежуточной фиксации на сохранение стабильности конструкции [22].

Вопрос исправления деформации у пациентов с остеопоротическими переломами является спорным. Коррекция деформации позвоночника и восстановление сагиттальной оси, по результатам нашего исследования, не оказывают значимого влияния на сохранение целостности фиксации, однако это противоречит другим исследованиям [34–36]. Противоречие может быть обусловлено исходным малым уровнем локального кифоза и размером выборки. Остаточный кифоз может оказывать отрицательное влияние на качество жизни, но этот показатель в рамках настоящей работы мы не изучали.

Исследование имеет несколько ограничений. Во-первых, ретроспективный дизайн с опорой на уже имеющуюся документацию повышает риск систематических ошибок отбора и информационного смещения. У нас отсутствовала возможность стандартизировать протокол наблюдения и время фиксации до наступления нестабильности. Во-вторых, небольшой объём выборки и малое число случаев нестабильности (восемь пациентов) ограничивают достоверность многофакторного анализа, повышают риск переобучения модели логистической регрессии и не позволяют надёжно оценить влияние редких факторов. В-третьих, неоднородность когорты (возраст, соматический статус, степень остеопороза, сопутствующие заболевания, отсутствие стандартизированной остеомодифицирующей терапии, широкий спектр типов операций) затрудняет изоляцию эффекта отдельных хирургических приёмов и снижает обобщаемость результатов. Кроме того, минимальный срок наблюдения шесть месяцев может быть недостаточным для выявления поздних механических осложнений и оценки влияния остаточной деформации на отдалённые клинико-функциональные исходы, которые мы целенаправленно не анализировали.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что у пациентов с застарелыми остеопоротическими переломами позвоночника типов OF4–OF5 развитие нестабильности конструкции после транспедикулярной фиксации носит многофакторный характер. Среди исследованных переменных наибольшее значение имеют хирургические факторы, особенно выполнение ламинэктомии и фасетэктомии, которые значимо повышают риск потери стабильности фиксации. Установка винтов в сломанный позвонок и аугментация костным цементом, напротив, способствуют сохранению стабильности металлоконструкции и могут рассматриваться как биомеханически обоснованные элементы остеосинтеза. Протяжённость фиксации, объём коррекции

кифотической деформации и остаточный кифоз не оказывают значимого влияния на устойчивость конструкции. Полученные результаты подтверждают необходимость индивидуализации хирургической тактики при лечении пациентов с застарелыми переломами позвоночника и остеопорозом.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование не имело источников финансирования.

Этическая экспертиза. Исследование не затрагивает этических аспектов, не нарушает принципы Хельсинкской декларации и требования российского законодательства в области этики научных исследований.

Информированное согласие. С учётом ретроспективного характера исследования (анализ медицинской документации) информированное согласие пациентов не требовалось.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Михайлов Е.Е., Беневоленская Л.И., Мылов Н.М. Распространенность переломов позвоночника в популяционной выборке лиц 50 лет и старше. *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова*. 1997;4(3):20-26. doi: 10.17816/vto108314.
2. Hoyt D, Urits I, Orhurhu V, et al. Current Concepts in the Management of Vertebral Compression Fractures. *Curr Pain Headache Rep*. 2020;24(5):16. doi: 10.1007/s11916-020-00849-9.
3. Лесняк О.М., Баранова И.А., Белова К.Ю. и др. Остеопороз в Российской Федерации: эпидемиология, медико-социальные и экономические аспекты проблемы (обзор литературы). *Травматология и ортопедия России*. 2018;24(1):155-168. doi: 10.21823/2311-2905-2018-24-1-155-168.
4. Шостак Н.А., Мурадянц А.А., Правдюк Н.Г., Аксенова А.В. Вертебральные остеопоротические переломы: дифференциальная диагностика, терапевтические подходы. *Клиницист*. 2024;18(3):57-68. doi: 10.17650/1818-8338-2024-18-3-K716.
5. Denis F. The three column spine and its significance in the classification of acute thoracolumbar spinal injuries. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1983;8(8):817-831. doi: 10.1097/00007632-198311000-00003.
6. Weber M, Uehlinger K, Gerber H. Osteoporotic vertebral compression fracture causing neurologic deficit. *J Clin Rheumatol*. 2002;8(3):166-73. doi: 10.1097/00124743-200206000-00010.
7. Ветрилэ С.Т., Кулешов А.А., Дарчия Л.Ю. и др. Особенности хирургического лечения больных с осложненными компрессионными переломами тел позвонков грудного и поясничного отдела позвоночника на фоне системного остеопороза. *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова*. 2009;16(2):34-39. doi: 10.17816/vto200916234-39.
8. Рахматиллаев Ш.Н., Рерих В.В., Садовой М.А. Особенности лечения переломов тел позвонков на фоне остеопороза. *Хирургия позвоночника*. 2006;(2):043-047. doi: 10.14531/ss2006.2.43-47.
9. Watanabe K, Katsumi K, Ohashi M, et al. Surgical outcomes of spinal fusion for osteoporotic vertebral fracture in the thoracolumbar spine: Comprehensive evaluations of 5 typical surgical fusion techniques. *J Orthop Sci*. 2019;24(6):1020-1026. doi: 10.1016/j.jos.2019.07.018.
10. Prost S, Pesenti S, Fuentes S, et al. Treatment of osteoporotic vertebral fractures. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2021;107(1S):102779. doi: 10.1016/j.otsr.2020.102779.
11. Segi N, Nakashima H, Kanemura T, et al. Comparison of Outcomes between Minimally Invasive Lateral Approach Vertebral Reconstruction Using a Rectangular Footplate Cage and Conventional Procedure Using a Cylindrical Footplate Cage for Osteoporotic Vertebral Fracture. *J Clin Med*. 2021;10(23):5664. doi: 10.3390/jcm10235664.
12. Uchida K, Kobayashi S, Matsuzaki M, et al. Anterior versus posterior surgery for osteoporotic vertebral collapse with neurological deficit in the thoracolumbar spine. *Eur Spine J*. 2006;15(12):1759-1767. doi: 10.1007/s00586-006-0106-z.
13. Takeuchi T, Yamagishi K, Konishi K, et al. Radiological Evaluation of Combined Anteroposterior Fusion with Vertebral Body Replacement Using a Minimally Invasive Lateral Approach for Osteoporotic Vertebral Fractures: Verification of Optimal Surgical Procedure. *J Clin Med*. 2022;11(3):629. doi: 10.3390/jcm11030629.
14. Schnake KJ, Blattert TR, Hahn P, et al. Classification of Osteoporotic Thoracolumbar Spine Fractures: Recommendations of the Spine Section of the German Society for Orthopaedics and Trauma (DGOU). *Global Spine J*. 2018;8(2 Suppl):46S-49S. doi: 10.1177/2192568217717972.
15. Donnally III CJ, Margetis K, Varacallo MA. Vertebral Compression Fractures. 2025 May 4. In: *StatPearls [Internet]*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK448171/>.
16. Sankar A, Johnson SR, Beattie WS, et al. Reliability of the American Society of Anesthesiologists physical status scale in clinical practice. *Br J Anaesth*. 2014;113(3):424-432. doi: 10.1093/bja/aeu100.
17. Chen J, Li Y, Zheng H, et al. Hounsfield unit for assessing bone mineral density distribution within lumbar vertebrae and its clinical values. *Front Endocrinol (Lausanne)*. 2024 Jun 13;15:1398367. doi: 10.3389/fendo.2024.1398367.
18. Zhao X, Wang W, Chen X, Lu S. Evaluation of MRI-Based Region-specific Vertebral Bone Quality Score for Bone Mineral Density in Lumbar Fusion Surgery. *Global Spine J*. 2025;21925682251393637. doi: 10.1177/21925682251393637.
19. Christensen FB, Laursen M, Gelineck J, et al. Interobserver and intraobserver agreement of radiograph interpretation with and without pedicle screw implants: the need for a detailed classification system in posterolateral spinal fusion. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2001;26(5):538-543; discussion 543-544. doi: 10.1097/00007632-200103010-00018.
20. Басанкин И.В., Гюльзатян А.А., Грицаев И.Е., Тахмазян К.К. Редкий случай тяжелой деформации у пациента с анкилозирующим спондилитом. *Гений ортопедии*. 2025;31(5):655-665. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-5-655-665.
21. Guissé NF, Stone JD, Keil LG, et al. Modified Clavien-Dindo-sink classification system for adolescent idiopathic scoliosis. *Spine Deform*. 2022;10(1):87-95. doi: 10.1007/s43390-021-00394-4.
22. Боков А.Е., Млявух С.Г., Братцев И.С., Дыдыкин А.В. Факторы, влияющие на стабильность транспедикулярной фиксации у пациентов с нестабильными повреждениями поясничного отдела позвоночника и переходной грудопоясничной области. *Инновационная медицина Кубани*. 2020;(3):12-19. doi: 10.35401/2500-0268-2020-19-3-12-19.
23. Bisschop A, van Engelen SJPM, Kingma I, et al. Single level lumbar laminectomy alters segmental biomechanical behavior without affecting adjacent segments. *Clin Biomech (Bristol)*. 2014;29(8):912-917. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2014.06.016.
24. Matsukawa K, Yato Y, Imabayashi H. Impact of Screw Diameter and Length on Pedicle Screw Fixation Strength in Osteoporotic Vertebrae: A Finite Element Analysis. *Asian Spine J*. 2021;15(5):566-574. doi: 10.31616/asj.2020.0353.
25. Kueny RA, Kolb JP, Lehmann W, Püschel K, Morlock MM, Huber G. Influence of the screw augmentation technique and a diameter increase on pedicle screw fixation in the osteoporotic spine: pullout versus fatigue testing. *Eur Spine J*. 2014;23(10):2196-2202. doi: 10.1007/s00586-014-3476-7.
26. Homagk L, Hellweger A, Hofmann GO. Hybrid stabilization and geriatric complex treatment of type A spinal fractures. *Chirurg*. 2020;91(10):878-885. (In German) doi: 10.1007/s00104-020-01136-4.
27. Усиков В. Д., Пташников Д. А., Докиш М. Ю. Варианты остеосинтеза позвоночника в условиях сниженной минеральной плотности кости. *Травматология и ортопедия России*. 2010;16(3):28-34. doi: 10.21823/2311-2905-2010-0-3-28-34.

28. Song Z, Zhou Q, Jin X, Zhang J. Cement-augmented pedicle screw for thoracolumbar degenerative diseases with osteoporosis: a systematic review and meta-analysis. *J Orthop Surg Res.* 2023;18(1):631. doi: 10.1186/s13018-023-04077-w.
29. D'Errico S, Niballi S, Bonuccelli D. Fatal cardiac perforation and pulmonary embolism of leaked cement after percutaneous vertebroplasty. *J Forensic Leg Med.* 2019;63:48-51. doi: 10.1016/j.jflm.2019.03.004.
30. Monticelli F, Meyer HJ, Tutsch-Bauer E. Fatal pulmonary cement embolism following percutaneous vertebroplasty (PVP). *Forensic Sci Int.* 2005;149(1):35-38. doi: 10.1016/j.forsciint.2004.06.010.
31. Lou S, Shi X, Zhang X, et al. Percutaneous vertebroplasty versus non-operative treatment for osteoporotic vertebral compression fractures: a meta-analysis of randomized controlled trials. *Osteoporos Int.* 2019;30(12):2369-2380. doi: 10.1007/s00198-019-05101-8.
32. Zhan Y, Jiang J, Liao H, et al. Risk Factors for Cement Leakage After Vertebroplasty or Kyphoplasty: A Meta-Analysis of Published Evidence. *World Neurosurg.* 2017;101:633-642. doi: 10.1016/j.wneu.2017.01.124.
33. Elmasry S, Asfour S, Travascio F. Effectiveness of pedicle screw inclusion at the fracture level in short-segment fixation constructs for the treatment of thoracolumbar burst fractures: a computational biomechanics analysis. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 2017;20(13):1412-1420. doi: 10.1080/10255842.2017.1366995.
34. Mayer M, Ortmaier R, Koller H, et al. Impact of Sagittal Balance on Clinical Outcomes in Surgically Treated T12 and L1 Burst Fractures: Analysis of Long-Term Outcomes after Posterior-Only and Combined Posteroanterior Treatment. *Biomed Res Int.* 2017;2017:1568258. doi: 10.1155/2017/1568258.
35. Jin C, He L, Chen X, et al. Risk factors for progressive kyphosis after percutaneous kyphoplasty in osteoporotic vertebral compression fracture. *Open Med (Wars).* 2024;19(1):20241107. doi: 10.1515/med-2024-1107.
36. Сиявянин В.Д., Рерих В.В. Сравнительный анализ результатов хирургического лечения взрывных остеопоротических переломов тел позвонков грудного отдела позвоночника. *Гений ортопедии.* 2024;30(4):542-551. doi: 10.18019/1028-4427-2024-30-4-542-551.

Статья поступила 15.12.2025; одобрена после рецензирования 02.02.2026; принята к публикации 09.02.2026.

The article was submitted 15.12.2025; approved after reviewing 02.02.2026; accepted for publication 09.02.2026.

Информация об авторах:

Павел Геннадьевич Мытыга — младший научный сотрудник, paveji.official@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4386-9780>;

Сергей Владимирович Масевнин — кандидат медицинских наук, младший научный сотрудник, drmasevnin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9853-7089>;

Владислав Сергеевич Мураховский — врач-нейрохирург, drmurakhovsky@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9985-5636>;

Константин Викторович Жданович — лаборант-исследователь, zhdanovich.neuro@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0237-4351>;

Никита Сергеевич Заборовский — кандидат медицинских наук, заведующий научным отделением, dr.nzbr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4562-8160>.

Information about the authors:

Pavel G. Mytyga — Junior Researcher, paveji.official@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4386-9780>;

Sergey V. Masevnin — Candidate of Medical Sciences, Junior Researcher, drmasevnin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9853-7089>;

Vladislav S. Murakhovsky — Neurosurgeon, drmurakhovsky@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9985-5636>;

Konstantin V. Zhdanovich — Research Assistant, zhdanovich.neuro@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0237-4351>;

Nikita S. Zaborovskii — Candidate of Medical Sciences, Head of the Research Department, dr.nzbr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4562-8160>.

Вклад авторов:

Мытыга П.Г. — сбор и анализ данных, написание текста статьи,

Масевнин С.В. — обработка данных, редактирование текста

Мураховский В.С. — анализ и обработка данных

Жданович К.В. — обработка данных, редактирование текста

Заборовский Н.С. — концепция и дизайн исследования, управление проектом,



Научная статья

УДК 617.3-022.7:615.281

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2026-32-2-197-204>

Сравнительная оценка коммерческих наборов бактериофагов и перспективы их применения для лечения пациентов с ортопедической MRSA-инфекцией

Е.М. Гордина¹, А.Р. Касимова^{1,2}, С.А. Божкова¹, Л.Н. Смирнова¹

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

² Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени И.П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия

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

Аннотация

Введение. Фаготерапия представляет собой многообещающий подход к решению проблемы устойчивости возбудителей ортопедической инфекции к антибиотикам. Стафилококки являются ведущими этиотропными агентами имплантат-ассоциированной инфекции, при этом 15 % штаммов *S. aureus* являются метициллин-резистентными (MRSA). На фармацевтическом рынке РФ присутствуют препараты бактериофагов, в которых концентрация активных в отношении инфекционного агента фагов напрямую влияет на их эффективность.

Цель работы — сравнительная оценка активности коммерческих наборов бактериофагов в отношении метициллин-резистентных *Staphylococcus aureus*, выделенных от пациентов с ортопедической инфекцией.

Материалы и методы. В исследование включали клинические штаммы *S. aureus* ($n = 25$), выделенные подряд из биоматериала пациентов в 2025 г. Идентификацию выполняли методом MALDI-TOF MS, антибиотикочувствительность — в соответствии с EUCAST v.15. Литическую активность фагов оценивали на мясо-пептонном агаре по пятибалльной шкале и определяли степень чувствительности штамма к действию определенного препарата, — чувствителен, слабо чувствителен и устойчив. Статистический анализ выполнен в программе IBM SPSS Statistics v.26.

Результаты. Все включенные в исследование штаммы *S. aureus* характеризовались устойчивостью к цефокситину. Из протестированных штаммов MRSA большинство (76 %) были чувствительны к препарату ПБФ 1. Больше количество штаммов (60 %) были отнесены к группе «слабо чувствительны» к ПБФ 3. Доли «нечувствительных» культур отличались меньше, при этом только один штамм продемонстрировал устойчивость ко всем трем тестируемым препаратам бактериофагов. Сравнительный анализ антистафилококковых препаратов различного производства также показал отличия в их активности против клинических изолятов MRSA. Доля чувствительных к препарату ПБФ 4 изолятов составила 84 %, к ПБФ 5 — 36 %. При этом один изолят был невосприимчив к тестируемым фагам.

Обсуждение. Полученные различия в активности коммерческих фагов могут быть связаны с составом полученных препаратов, обладающих меньшей тропностью к штаммам, выделенным от пациентов другого региона. С учетом широкой географии проживания пациентов с ортопедической инфекцией, госпитализируемых в федеральные центры, возможность выбирать бактериофаги из широкой линейки представленных на рынке коммерческих наборов увеличивает вероятность успешного их применения.

Заключение. Представленные на рынке отечественные коммерческие препараты характеризовались различной литической активностью в отношении клинических штаммов MRSA, большей — Пиофаг® и Стафилофаг®.

Ключевые слова: бактериофаги, ортопедическая инфекция, *S. aureus*, MRSA

Для цитирования: Гордина Е.М., Касимова А.Р., Божкова С.А., Смирнова Л.Н. Сравнительная оценка коммерческих наборов бактериофагов и перспективы их применения для лечения пациентов с ортопедической MRSA-инфекцией. *Гений ортопедии*. 2026;32(2):197-204. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-2-197-204.



Comparative evaluation of commercial bacteriophages and prospects for their application in the treatment of orthopedic MRSA-infection

E.M. Gordina^{1✉}, A.R. Kasimova^{1,2}, S.A. Bozhkova¹, L.N. Smirnova¹

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

² Academician I.P. Pavlov First St. Petersburg State Medical University, St. Petersburg, Russian Federation

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

Abstract

Introduction Phage therapy is a promising approach to addressing the problem of antibiotic resistance in orthopedic infection pathogens. Staphylococci are the leading etiologic agents of implant-associated infections, with 15 % of *S. aureus* strains being methicillin-resistant (MRSA). Bacteriophage preparations are available on the Russian pharmaceutical market, and the concentration of phages active against the microbial agent influences their effectiveness.

The **objective** was to compare the activity of commercial bacteriophage kits against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* isolated from patients with orthopedic infections.

Material and methods Clinical strains of *S. aureus* ($n = 25$), consecutively isolated from patient biomaterial in 2025 were examined. Identification was performed using MALDI-TOF MS, and antibiotic susceptibility assessed according to EUCAST v.15. Phage lytic activity was evaluated using meat-peptone agar and a five-point scale with the strain sensitivity to a specific drug determined as sensitive, weakly sensitive, or resistant. Statistical analysis was performed using IBM SPSS Statistics v.26.

Results The *S. aureus* strains included in the study were resistant to ceftazidime. Of the MRSA strains tested, the majority (76 %) were sensitive to PBP 1. A larger number of strains (60%) were classified as "weakly sensitive" to PBP 3. There were less variations in "non-susceptible" cultures, with only one strain demonstrating resistance to the three bacteriophage preparations. A comparative analysis of antistaphylococcal drugs from various manufacturers revealed differences in the activity against clinical MRSA isolates. There were 84 % isolates being sensitive to PBP 4 and 36 % to PBP 5. One isolate was resistant to the phages tested.

Discussion The differences in the activity of commercial phages could be associated with the composition of the resulting preparations, which had lower affinity for strains isolated from patients in other regions. Given the wide geographical distribution of patients with orthopedic infections hospitalized in federal centers, the ability to choose bacteriophages from a wide range of commercial kits available on the market increases the likelihood of their successful use.

Conclusion Commercial drugs presented on the Russian market were characterized by different lytic activity against clinical strains of MRSA, with Pyophag® and Staphylophag® exhibiting greater activity.

Keywords: bacteriophages, orthopedic infection, *S. aureus*, MRSA

For citation: Gordina EM, Kasimova AR, Bozhkova SA, Smirnova LN. Comparative evaluation of commercial bacteriophages and prospects for their application in the treatment of orthopedic MRSA-infection. *Genij Ortopedii*. 2026;32(2):197-204. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-2-197-204.

ВВЕДЕНИЕ

Антибиотики с момента их открытия в начале XX века произвели революцию в медицинской практике, позволили взять под контроль и вылечить многие инфекционные заболевания [1]. Широкое применение антибактериальных препаратов стимулировало развитие адаптивных механизмов устойчивости среди бактерий [2–4]. Всемирная организация здравоохранения признала устойчивость бактерий к антибиотикам одной из десяти главных угроз общественному здравоохранению [5]. Необходимость поиска альтернативных методов лечения, которые могут эффективно бороться с бактериальными инфекциями, является одним из приоритетов современной системы здравоохранения [6].

Возрастающее количество ортопедических операций, сопровождающихся установкой различных металлоконструкций, приводит к соответствующему увеличению числа инфекционных осложнений, связанных с имплантатами. Частота инфекций, связанных с ортопедическими имплантатами, достигает 0,3–5,0 % при всех видах операций (погружной остеосинтез, эндопротезирование суставов) [7]. Золотым стандартом лечения пациентов с перипротезной инфекцией считается хирургическое удаление инфицированных имплантатов и длительное лечение антибиотиками, активными в отношении выделенных возбудителей. Однако проблемы, связанные с устойчивостью патогенов к антибиотикам и сохранением биопленок на поверхности имплантатов, часто приводят к рецидивирующим или трудно поддающимся лечению инфекциям, что создает серьезную угрозу здоровью и жизни пациентов [8].

Лечение с использованием бактериофагов представляет собой многообещающий подход к решению проблемы антибиотикорезистентности бактерий [9–11]. Активность фагов определяется возможностью реализации всех стадий их жизненного цикла, включая адсорбцию, проникновение генетического материала в клетку, репликацию генетического материала, сборку фаговых частиц и лизис бактерии [12]. В отличие от антибиотиков широкого спектра действия, которые могут воздействовать на значительный спектр бактерий, фаги высокоспецифичны, обычно нацелены только на один вид или даже на определенный штамм бактерий [12]. Специфичность фагов представляет как сильные стороны, так и проблемы в их терапевтическом применении [13, 14]. Преимуществом является конкретное нацеливание на патогенные бактерии с сохранением полезной микробиоты человека. Однако такая специфичность требует точного микробиологического заключения для выбора активного фага, что делает назначение более сложным в сравнении с антибиотиками широкого спектра действия [15].

В настоящее время на фармацевтическом рынке РФ присутствуют разнообразные препараты бактериофагов, в том числе для местного и/или системного применения. Концентрация активных в отношении инфекционного агента бактериофагов в препарате напрямую влияет на его эффективность [16] и более широкие спектры активности, позволяющие снизить разнообразие фагов в коктейлях с сохранением суммарного диапазона действия, для терапевтических бактериофагов это является предпочтительным свойством [17, 18]. Особый интерес представляет сравнительный анализ литической активности отечественных препаратов бактериофагов в отношении штаммов стафилококков, выделенных от пациентов с ортопедической инфекцией.

Цель работы — сравнительная оценка активности коммерческих наборов бактериофагов в отношении метициллин-резистентных *Staphylococcus aureus*, выделенных от пациентов с ортопедической инфекцией.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выделение культур *S. aureus* выполняли проспективно в 2025 г. из биоматериала пациентов с перипротезной инфекцией и/или остеомиелитом в соответствии с международными стандартами микробиологических исследований. Видовую идентификацию выполняли методом MALDI-TOF MS с использованием системы FlexControl и программного обеспечения MBT Compass 4.1, Score $\geq 2,0$. Чувствительность клинических изолятов к антибактериальным препаратам изучали в соответствии с требованиями EUCAST v.15.

По заключению локального комитета по этической экспертизе клинических и экспериментальных исследований данная работа основана на микробиологическом анализе свойств восприимчивости патогенов, что не является предметом рассмотрения в этическом комитете.

В исследовании оценена чувствительность MRSA ($n = 25$) к пяти отечественным препаратам бактериофагов (ПБФ):

- ПБФ 1 — Пиофаг® (Микроген, Нижний Новгород, ИМП РУ ЛП-№ (002513)-(РГ-RU) МЗ РФ),
- ПБФ 2 — Пиобактериофаг® (Микроген, Уфа, ИМП РУ № ЛС-002031 МЗ РФ),
- ПБФ 3 — Секстафаг® (Микроген, Пермь, ИМП РУ № ЛС-001049 МЗ РФ),
- ПБФ 4 — Стафилофаг® (Микроген, Нижний Новгород, ИМП РУ № Р N001973-01 МЗ РФ);
- ПБФ 5 — Стафилофаг® (Микроген, Пермь, ИМП РУ № Р N001973-01 МЗ РФ).

Оценку литических свойств ПБФ выполняли на мясо-пептонном агаре (МПА). Для этого бактериальную взвесь (0,5 по McF) ватным тампоном наносили на МПА и через 10 минут на поверхность агара дозатором наносили 10 мкл ПБФ в дубликатах. Чашки инкубировали при 37 °С. Через 24 часа оценивали активность ПБФ по пятибальной шкале в соответствии с методическими рекомендациями «Рациональное применение бактериофагов в лечебной и противоэпидемиологической практике» (2023 г.) и в зависимости от полученных результатов определяли степень чувствительности штамма к действию определенного препарата: чувствителен, слабо чувствителен и устойчив.

Статистический анализ различий данных в исследуемых группах восприимчивости и коммерческих препаратов выполняли с помощью непараметрического параметра критерия Краскела – Уоллиса в программе IBM SPSS Statistics Version 26. В случае выявления статистически значимых различий при анализе активности трех препаратов бактериофагов для попарного сравнения групп (post-hoc анализ) применяли критерий Данна (Dunn's test) с поправкой на множественные сравнения. С учетом множественных сравнений использовали меньший критический уровень значимости, который рассчитывался по формуле: $p = 1 - 0,95^{1/n}$, где n – количество производимых сравнений. Для данного исследования статистически значимыми считали значения $p < 0,017$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Все включенные в исследование штаммы *S. aureus* ($n = 25$) характеризовались устойчивостью к цефалоспоринов (MRSA). Тестируемые препараты бактериофагов были активны в отношении большинства клинических изолятов MRSA, выделенных от пациентов с ортопедической инфекцией, однако при сравнении ПБФ были выявлены различия (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1

Оценка антибактериальной активности препаратов бактериофагов в отношении метициллин-резистентных *S. aureus*

Отношение к ПБФ	Тестируемые препараты						p
	ПБФ 1		ПБФ 2		ПБФ 3		
	абс.	%	абс.	%	абс.	%	
Чувствительны	19	76	11	44	8	32	0,01
Слабо чувствительны	5	20	11	44	15	60	0,01
Нечувствительны	1	4	3	12	2	8	0,05

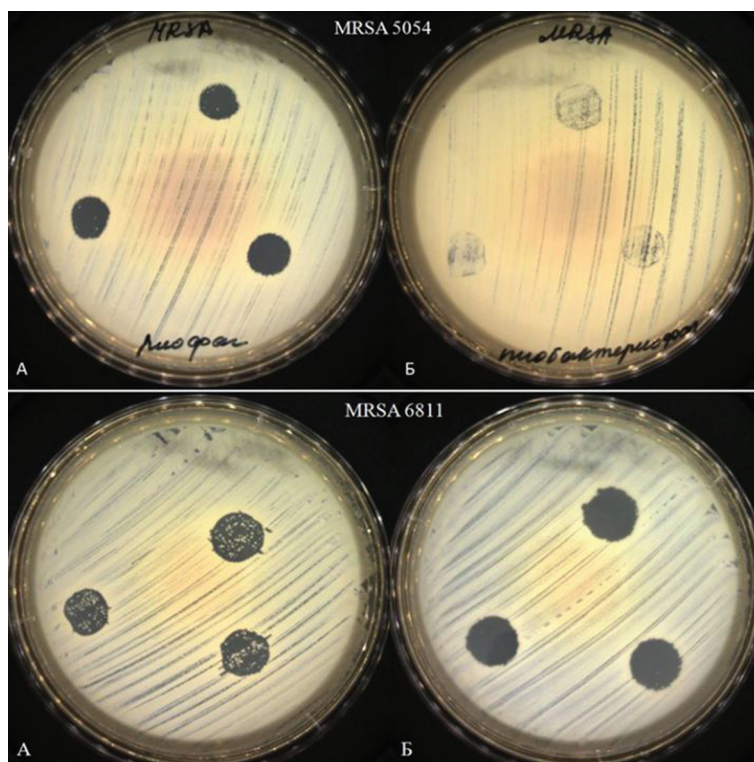


Рис. 1. Фотографии чашек Петри с зонами полного и частичного лизиса культур MRSA: А – ПБФ 1, Б – ПБФ 2

Из протестированных штаммов MRSA наибольшее количество (76 %) были чувствительны к препарату ПБФ 1 ($p = 0,004$ — попарное сравнение с ПБФ 2). Для остальных градаций чувствительности зарегистрирована обратная тенденция, — большее количество штаммов (60 %) были отнесены к группе «слабо чувствительны» к ПБФ 3 ($p = 0,003$ — попарное сравнение с ПБФ 1, $p = 0,009$ — общее). Доли «нечувствительных» культур отличались меньше, при этом только один штамм демонстрировал устойчивость ко всем трем тестируемым препаратам бактериофагов.

Сравнительный анализ антистафилококковых препаратов различного производства также показал отличия в их активности против клинических изолятов MRSA, выделенных от пациентов в нашем Центре (табл. 2, рис. 2). Доля изолятов, чувствительных к препарату ПБФ 4, составила 84 %, а к ПБФ 5 — 36 % ($p = 0,008$). При этом один изолят был не восприимчив к тестируемым фагам.

Таблица 2

Оценка активности антистафилококковых препаратов в отношении метициллин-резистентных *S. aureus*

Отношение к ПБФ	Тестируемые препараты				p
	ПБФ 4		ПБФ 5		
	абс.	%	абс.	%	
Чувствительны	21	84	9	36	0,008
Слабо чувствительны	3	12	15	60	0,004
Не чувствительны	1	4	1	4	0,899

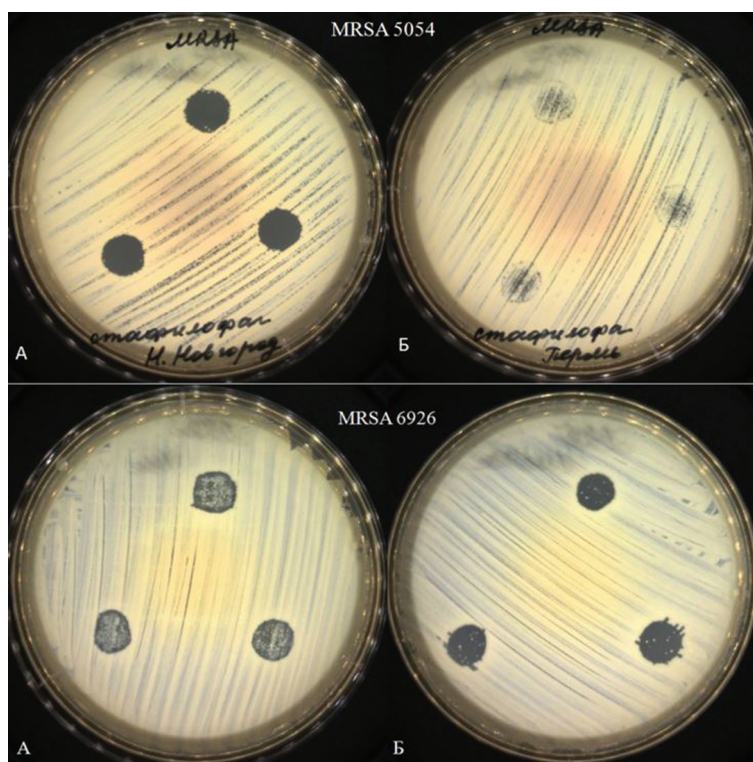


Рис. 2. Фотографии чашек Петри с зонами полного и частичного лизиса культур MRSA: А — ПБФ 4, Б — ПБФ 5

ОБСУЖДЕНИЕ

Наличие механизмов резистентности к антибиотикам у возбудителей инфекционных заболеваний ухудшает прогноз исхода заболевания, удлиняет сроки лечения и значительно увеличивает расходы системы здравоохранения [1]. В нашем исследовании 2024 г. показано, что в течение 12-летнего периода в 33 % случаев возбудителями ортопедической инфекции были *S. aureus*, из них доля метициллин-резистентных штаммов *S. aureus* не снижалась ниже 15 % на протяжении всего изученного периода [19]. В работах А.В. Цискарашвили с соавт. [20] и А.В. Соколовского с соавт. [21] также было установлено, что наиболее частыми возбудителями перипротезной инфекции были *S. aureus*, — 32 % и 38 % соответственно.

Способность *S. aureus* противостоять широкому спектру антибактериальных препаратов делает его идеальным объектом для исследований с использованием бактериофагов. В последние годы подходы к отбору, производству и доставке фагов значительно расширились, а усовершенствование

технологий их получения позволяет проводить персонализированную фаговую терапию. В травматологии и ортопедии в ряде клинических случаев показан многообещающий потенциал фагов против MRSA [22]. Е.А. Фёдоров с соавт. продемонстрировали, что добавление раствора коммерческого стафилококкового бактериофага (6 мл на 40,0 г сухого вещества полиметилметакрилата) с дальнейшим введением его по дренажу или пункционно в перипротезную область в течение 10 дней увеличивает эффективность одноэтапного лечения стафилококковой перипротезной инфекции тазобедренного сустава с 69 % до 96 % [23]. T. Ferry et al. регистрировали улучшение состояния трех пациентов с хронической перипротезной инфекцией после использования фагового коктейля в сочетании с антибиотиками [24]. Аналогичные результаты представлены в работе С. Ramirez-Sanchez et al., в которой авторы описали успешное лечение пациентов с MRSA-инфекцией коленного сустава путем внутрисуставного введения фагового коктейля [25]. Разнообразие методов использования свидетельствует о безопасности применения бактериофагов, что является их значимым преимуществом в сравнении с антибиотиками. Однако для успешной фаготерапии необходимо четкое определение чувствительности конкретного возбудителя к определенному препарату бактериофагов (к конкретной партии коммерческого набора), что обеспечит элиминацию патогена и профилактику развития резистентности бактерий к бактериофагу.

В нашем Центре чувствительность к фагам определяют для всех выделенных штаммов MRSA, используя различные коммерческие препараты. При лечении пациентов с перипротезной инфекцией, вызванной возбудителем чувствительным к имеющимся фагам, после завершения операции устанавливают дренаж из полости сустава. По дренажу в перипротезную область в течение трех-пяти дней ежедневно вводят по 20 мл препарата бактериофагов, затем дренаж перекрывают для увеличения времени экспозиции фагов. После завершения фаготерапии дренаж удаляют. В соответствии с клиническими рекомендациями, все пациенты с перипротезной инфекцией также получают высокодозную, этиотропную антибактериальную терапию, так как бактериофаготерапия не отменяет назначение антибиотиков, а осуществляется совместно в составе комплексного лечения. В обзоре 2023 г. [26] описаны результаты исследований совместного применения литических бактериофагов и антибиотиков в отношении инфекций, вызванных резистентными штаммами *S. aureus*. Авторы подчеркивают, что во многих случаях комбинированное введение фага и антибиотика приводит к значительному снижению роста численности бактерий, в то время как обратный антагонистический эффект встречается значительно реже [26]. На результаты лечения может влиять последовательность введения терапевтических агентов, наилучшие результаты регистрируют в случаях, когда фаготерапия предшествует антибиотикам [27]. Также установлено, что применение бактериофагов может менять профиль чувствительности бактерий к антибактериальным препаратам и, как следствие, ведет к включению препарата в схему лечения [28].

Кроме того, понимание фармакокинетики (ФК) и фармакодинамики (ФД) фагов имеет решающее значение для оптимизации терапевтической эффективности в клинических условиях [29]. Однако достижение всестороннего понимания ФК/ФД для фаговой терапии представляет собой сложную задачу из-за наличия трехсторонних взаимодействий между фагами, бактериями и человеком. Поскольку практически каждая комбинация фаг – бактерия – пациент может демонстрировать уникальный профиль ФК/ФД, разработка стандартизированных моделей, применимых в различных клинических ситуациях, остается сложной задачей. До настоящего времени не существует валидированного подхода к клиническому использованию фаговой терапии, что требует проведения сравнительных клинических исследований или накопления и анализа данных реальной клинической практики использования бактериофагов при лечении пациентов с ортопедической инфекцией.

Выполненное нами сравнительное исследование активности коммерческих наборов бактериофагов в отношении клинических штаммов MRSA, выделенных от пациентов с ортопедической инфекцией, показало высокий уровень литических свойств входящих в состав препаратов фагов. Особенно важно отметить различный уровень антибактериального действия наборов, произведенных на разных территориальных производствах. В работе И.М. Пчелина с соавт. отмечено, что поиск активных бактериофагов, планируемых для использования в качестве противомикробных средств, вероятно, следует проводить в местообитаниях, географически приближенных к популяциям патогенных бактерий [30]. По-видимому, различия в активности коммерческих наборов могут быть связаны с составом полученных препаратов, обладающих меньшей тропностью к штаммам, выделенным от пациентов другого региона. Однако поиск активных фагов, скорее, необходим при назначении персонализированной фаготерапии с подбором конкретного бактериофага против определенного штамма возбудителя. С учетом широкой географии проживания пациентов с ортопедической инфекцией, госпитализируемых в Федеральные Центры, возможность выбирать бактериофаги из широкой линейки представленных на рынке коммерческих наборов увеличивает вероятность успешного их применения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные на рынке отечественные коммерческие препараты бактериофагов характеризовались различной литической активностью в отношении метициллин-резистентных *S. aureus*, выделенных от пациентов с ортопедической инфекцией. Пиофаг® и Стафилофаг® (Н. Новгород) показали высокую эффективность в сравнении с другими протестированными препаратами. В травматологии и ортопедии применение фаготерапии следует рассматривать как один из перспективных методов борьбы с инфекциями, вызванными резистентными к антибиотикам возбудителями, совместно с принятыми методами лечения после обязательного исследования восприимчивости патогена к препаратам бактериофагов.

Конфликт интересов. Не заявлен.

Источник финансирования. Научное исследование выполнено без дополнительного финансирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Akinwotu ST, Fapohunda O. War against antimicrobial resistance. *J Microbiol Exp.* 2020;8(4):148-154. doi: 10.15406/jmen.2020.08.00300.
2. Sinha S, Upadhyay LSB. Understanding antimicrobial resistance (AMR) mechanisms and advancements in AMR diagnostics. *Diagn Microbiol Infect Dis.* 2025;113(2):116949. doi: 10.1016/j.diagmicrobio.2025.116949.
3. Muteeb G, Kazi RNA, Aatif M, et al. Antimicrobial resistance: Linking molecular mechanisms to public health impact. *SLAS Discov.* 2025;33:100232. doi: 10.1016/j.slasd.2025.100232.
4. Behera B, Singh R, Sharma K, et al. A comprehensive review of advanced strategies to combat antimicrobial resistance. *Arch Microbiol.* 2025;207(11):281. doi: 10.1007/s00203-025-04464-3.
5. FAO, OIE, WHO, UNEP. *Antimicrobial resistance and the United Nations Sustainable Development Cooperation Framework: Guidance for United Nations country teams.* Paris, FAO, OIE and WHO; 2021. URL: <https://www.who.int/publications/b/58938>.
6. Kelly JB, Nolan AC, Zeden MS. How can we escape the ESKAPes: Antimicrobial resistance mechanisms and what lies ahead? *PLoS Pathog.* 2024;20(6):e1012270. doi: 10.1371/journal.ppat.1012270.
7. Grammatopoulos G, Kendrick B, McNally M, et al. Outcome Following Debridement, Antibiotics, and Implant Retention in Hip Periprosthetic Joint Infection-An 18-Year Experience. *J Arthroplasty.* 2017;32(7):2248-2255. doi: 10.1016/j.arth.2017.02.066.
8. Mayorga-Ramos A, Carrera-Pacheco SE, Barba-Ostria C, Guamán LP. Bacteriophage-mediated approaches for biofilm control. *Front Cell Infect Microbiol.* 2024;14:1428637. doi: 10.3389/fcimb.2024.1428637.
9. Olawade DB, Fapohunda O, Egbon E, et al. Phage therapy: A targeted approach to overcoming antibiotic resistance. *Microb Pathog.* 2024;197:107088. doi: 10.1016/j.micpath.2024.107088.
10. Ibrahim R, Aranjani JM, Kalikot Valappil V, Nair G. Unveiling the potential bacteriophage therapy: a systematic review. *Future Sci OA.* 2025;11(1):2468114. doi: 10.1080/20565623.2025.2468114.
11. Kushwaha SO, Sahu SK, Yadav VK, et al. Bacteriophages as a potential substitute for antibiotics: A comprehensive review. *Cell Biochem Funct.* 2024;42(3):e4022. doi: 10.1002/cbf.4022.
12. Hatfull GF, Dedrick RM, Schooley RT. Phage Therapy for Antibiotic-Resistant Bacterial Infections. *Annu Rev Med.* 2022;73:197-211. doi: 10.1146/annurev-med-080219-122208.
13. Dąbrowska K. Phage therapy: What factors shape phage pharmacokinetics and bioavailability? Systematic and critical review. *Med Res Rev.* 2019;39(5):2000-2025. doi: 10.1002/med.21572.
14. Palma M, Qi B. Advancing Phage Therapy: A Comprehensive Review of the Safety, Efficacy, and Future Prospects for the Targeted Treatment of Bacterial Infections. *Infect Dis Rep.* 2024;16(6):1127-1181. doi: 10.3390/idr16060092.
15. Akinwotu ST, Fapohunda O. War against antimicrobial resistance. *J Microbiol Exp.* 2020;8(4):148-154. doi: 10.15406/jmen.2020.08.00300.
16. Ryan EM, Gorman SP, Donnelly RF, Gilmore BF. Recent advances in bacteriophage therapy: how delivery routes, formulation, concentration and timing influence the success of phage therapy. *J Pharm Pharmacol.* 2011;63(10):1253-1264. doi: 10.1111/j.2042-7158.2011.01324.x.
17. Ross A, Ward S, Hyman P. More Is Better: Selecting for Broad Host Range Bacteriophages. *Front Microbiol.* 2016;7:1352. doi: 10.3389/fmicb.2016.01352.
18. Casey E, van Sinderen D, Mahony J. *In Vitro* Characteristics of Phages to Guide 'Real Life' Phage Therapy Suitability. *Viruses.* 2018;10(4):163. doi: 10.3390/v10040163.
19. 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.
20. Цискарашвили А.В., Меликова Р.Э., Новожилова Е.А. Анализ шестилетнего мониторинга основных возбудителей перипротезной инфекции крупных суставов и их тенденция к резистентности. *Гений ортопедии.* 2022;28(2): 179-188. doi: 10.18019/1028-4427-2022-28-2-179-188.
21. Соколовский А.В., Соколовский В.А., Мачак Г.Н. и др. Отдалённые результаты профилактики и лечения перипротезной инфекции в онкоортопедии. *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова.* 2023;30(2):143-159. doi: 10.17816/vto322787.
22. Шералиев Т.У., Самохин А.Г., Таштанов Б.Р., и др. Возможности фаготерапии при лечении перипротезной инфекции, вызванной полирезистентными возбудителями: обзор литературы. *Травматология и ортопедия России.* 2024;30(4):180-191. doi: 10.17816/2311-2905-17563.
23. Фёдоров Е.А., Кретьен С.О., Самохин А.Г. и др. Ближайшие результаты лечения стафилококковой перипротезной инфекции тазобедренного сустава с использованием комбинированной терапии антибиотиками и бактериофагами. *Acta Biomedica Scientifica.* 2021;6(4):50-63. doi: 10.29413/ABS.2021-6.4.5.
24. Ferry T, Kolenda C, Batailler C, et al. Phage Therapy as Adjuvant to Conservative Surgery and Antibiotics to Salvage Patients With Relapsing *S. aureus* Prosthetic Knee Infection. *Front Med (Lausanne).* 2020;7:570572. doi: 10.3389/fmed.2020.570572.
25. Ramirez-Sanchez C, Gonzales F, Buckley M, et al. Successful Treatment of *Staphylococcus aureus* Prosthetic Joint Infection with Bacteriophage Therapy. *Viruses.* 2021;13(6):1182. doi: 10.3390/v13061182.
26. Абдраймова Н.К., Шитиков Е.А., Городничев Р.Б., Корниенко М.А. Комбинация бактериофагов и антибиотиков как наиболее эффективный подход борьбы со *Staphylococcus aureus*. *Медицина экстремальных ситуаций.* 2023;25(4):39-47. doi: 10.47183/mes.2023.058.
27. Gordillo Altamirano FL, Barr JJ. Phage Therapy in the Postantibiotic Era. *Clin Microbiol Rev.* 2019;32(2):e00066-18. doi: 10.1128/CMR.00066-18.

28. Chaudhry WN, Concepción-Acevedo J, Park T, et al. Synergy and Order Effects of Antibiotics and Phages in Killing *Pseudomonas aeruginosa* Biofilms. *PLoS One*. 2017;12(1):e0168615. doi: 10.1371/journal.pone.0168615.
29. Kim MK, Suh GA, Cullen GD, et al. Bacteriophage therapy for multidrug-resistant infections: current technologies and therapeutic approaches. *J Clin Invest*. 2025;135(5):e187996. doi: 10.1172/JCI187996.
30. Пчелин И.М., Гончаров А.Е., Асланов Б.И., Азаров Д.В. Спектры литической активности бактериофагов. *Антибиотики и химиотер*. 2023; 68 (11-12): 59-66. doi: 10.37489/0235-2990-2023-68-11-12-59-66.

Статья поступила 18.12.2025; одобрена после рецензирования 19.12.2025; принята к публикации 09.02.2026.

The article was submitted 18.12.2025; approved after reviewing 19.12.2025; accepted for publication 09.02.2026.

Информация об авторах:

Екатерина Михайловна Гордина — кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, emgordina@win.rniito.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2326-7413>;

Алина Рашидовна Касимова — кандидат медицинских наук, доцент, доцент кафедры, врач — клинический фармаколог, kasi-alina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6284-7133>;

Светлана Анатольевна Божкова — доктор медицинских наук, профессор, заведующая научным отделением, clinpharm-rniito@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2083-2424>;

Лариса Николаевна Смирнова — лаборант, lnsmirnova@rniito.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3307-0131>.

Information about the authors:

Ekaterina M. Gordina — Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher, emgordina@win.rniito.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2326-7413>;

Alina R. Kasimova — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department, Clinical pharmacologist, kasi-alina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6284-7133>;

Svetlana A. Bozhkova — Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Scientific Department, clinpharm-rniito@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2083-2424>;

Larisa N. Smirnova — laboratory assistant, lnsmirnova@rniito.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3307-0131>.

Вклад авторов

Гордина Е.М. — сбор, анализ или интерпретация данных существенный вклад в разработку концепции и дизайна исследования, редактирование текста рукописи.

Касимова А.Р. — сбор, анализ или интерпретация данных, редактирование текста рукописи.

Божкова С.А. — существенный вклад в разработку концепции или дизайна исследования, редактирование текста рукописи.

Смирнова Л.Н. — сбор, анализ или интерпретация данных.

Научная статья

УДК 616.728.48:612.7]:616-071.1

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2026-32-2-205-213>

Перевод, кросс-культурная адаптация и валидация русскоязычной версии шкалы Karlsson – Peterson Ankle Function Score System (KAFS)

Т.Н. Кубрина¹✉, Е.П. Сорокин^{1,2}, Е.А. Пашкова¹, Н.С. Коновальчук¹, К.А. Демьянова¹,
Ю.П. Фаустова¹, П.М. Преображенский¹

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

² Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени акад. И.П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Николаевна Кубрина, Kubrina_1998@mail.ru

Аннотация

Введение. В 1991 г. J. Karlsson и L. Peterson предложили шкалу для оценки функционального состояния голеностопного сустава. Данный опросник позволяет оценить боль, ощущение неустойчивости и нарушение повседневной активности с помощью девяти параметров оценки. Опросник Карлссона – Петерсона (*англ.*: Karlsson Ankle Function Score, KAFS) активно используют в зарубежных исследованиях и описывают в литературных источниках. KAFS составлен на английском языке, и до настоящего времени официальная адаптированная версия на русском языке отсутствовала.

Цель работы — произвести межкультурную адаптацию на русский язык и комплексную психометрическую валидацию русскоязычной версии опросника KAFS для клинического применения у пациентов с хронической латеральной нестабильностью голеностопного сустава.

Материалы и методы. В исследование включены 60 пациентов на этапе предоперационного обследования в состоянии клинической стабильности. Проведён перевод и адаптация опросника KAFS по методологии ISPOR. Все пациенты заполнили опросники KAFS и AOFAS-AHS. Повторное анкетирование проходили 39 пациентов через 7–14 дней. Оценены: внутренняя согласованность (α Кронбаха), тест-ретест надёжности (ICC), стандартная ошибка измерения (SEM), минимально значимое различие (MDC), крайние эффекты, конструктивная валидность.

Результаты. Русская версия опросника KAFS показала высокую внутреннюю согласованность ($\alpha = 0,826$) и хорошую воспроизводимость (ICC = 0,720). SEM составила 2,89, MDC — 7,95 балла. Потолочные и этажные эффекты отсутствовали. Обнаружены значимые корреляции между итоговыми баллами опросников KAFS и AOFAS-AHS.

Обсуждение. В рамках произведенного исследования русскоязычная версия опросника KAFS показала нам достаточную надежность, валидность и чувствительность. Опросник является хорошим инструментом для оценки функции и состояния голеностопного сустава.

Заключение. Русскоязычную версию опросника KAFS можно активно применять в практике врача-травматолога-ортопеда как в клинической деятельности, так и в исследовательских целях. Данный опросник показал свою чувствительность при оценке функционального состояния голеностопного сустава у пациентов с хронической латеральной нестабильностью.

Ключевые слова: Karlsson and Peterson scoring system for ankle function, валидация, голеностопный сустав, хроническая нестабильность

Для цитирования: Кубрина Т.Н., Сорокин Е.П., Пашкова Е.А., Коновальчук Н.С., Демьянова К.А., Фаустова Ю.П., Преображенский П.М. Перевод, кросс-культурная адаптация и валидация русскоязычной версии шкалы Karlsson – Peterson Ankle Function Score System (KAFS). *Гений ортопедии*. 2026;32(2):205-213. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-2-205-213.



Translation, cross-cultural adaptation and validation of the Russian language version of the Karlsson – Peterson ankle function score system (KAFS)

T.N. Kubrina^{1✉}, E.P. Sorokin^{1,2}, E.A. Pashkova¹, N.S. Konovalchuk¹, K.A. Demianova¹, Yu.P. Faustova¹, P.M. Preobrazhensky¹

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

² Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, St. Petersburg, Russian Federation

Corresponding author: Tatiana N. Kubrina, Kubrina_1998@mail.ru

Abstract

Introduction In 1991, J. Karlsson and L. Peterson proposed a system for assessing the functional state of the ankle joint. This questionnaire assesses pain, activity, instability and disturbances in daily activities using nine assessment parameters. The Karlsson – Peterson questionnaire has been used actively in foreign studies and literature sources, but despite its widespread use, its original version is in English, and until now there was no official adapted version in Russian.

The **aim** of the study was to translate, cross-culturally adapt and psychometrically validate the Russian version of the Karlsson – Peterson questionnaire for clinical use in patients with chronic lateral instability of the ankle joint.

Materials and methods The study included 60 patients at the preoperative examination stage in a state of clinical stability. The Karlsson – Peterson questionnaire was translated and adapted according to the ISPOR methodology. All patients filled in the Karlsson – Peterson and AOFAS-AHS questionnaires. A total of 39 patients were re-administered after 7–14 days. The following measures were assessed: internal consistency (Cronbach's α), test-retest reliability (ICC), standard measurement error (SEM), minimally significant difference (MDC), extreme effects, and construct validity.

Results The Russian version of the Karlsson – Peterson questionnaire showed high internal consistency ($\alpha = 0.826$) and good reproducibility (ICC = 0.720). SEM was 2.89, MDC was 7.95 points. There were no ceiling or floor effects. Significant correlations were found between the final scores of the Karlsson – Peterson questionnaire and AOFAS-AHS.

Discussion The study demonstrated the reliability, validity, and sensitivity of the Russian version of the Karlsson – Peterson questionnaire. The questionnaire is an informative and clinically interpretable tool for assessing the condition of the ankle joint in patients with chronic ankle instability.

Conclusion The Russian version of the Karlsson – Peterson questionnaire demonstrated high psychometric properties and can be recommended for use in clinical and research practice, as well as for assessing the functional state of patients with chronic lateral instability of the ankle joint to assess the dynamics of changes in the treatment process.

Keywords: Karlsson and Peterson scoring system for ankle function, validation, ankle joint, chronic instability

For citation: Kubrina TN, Sorokin EP, Pashkova EA, Konovalchuk NS, Demianova KA, Faustova YuP, Preobrazhensky PM. Translation, cross-cultural adaptation and validation of the Russian language version of the Karlsson – Peterson ankle function score system (KAFS). *Genij Ortopedii*. 2026;32(2):205-213. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-2-205-213.

ВВЕДЕНИЕ

Хроническая латеральная нестабильность голеностопного сустава представляет собой значимую клиническую проблему в медицине, так как затрагивает физически активную часть населения [1]. Это состояние характеризуется повторяющимися супинационными травмами голеностопного сустава и постоянным ощущением нестабильности, что часто приводит к снижению качества жизни и способности участвовать в спортивных или повседневных активностях [1–4]. Данная патология широко распространена, случаи острых повреждений связочного аппарата голеностопного сустава составляют до 21 % всех травм нижних конечностей [5]. После перенесенной острой травмы все пациенты первоначально проходят консервативное лечение (иммобилизация, ходьба без нагрузки на поврежденную конечность и последующая реабилитация). От 10 до 30 % пациентов отмечают субъективное чувство потери контроля над голеностопным суставом после перенесенного консервативного лечения, что имеет высокие риски развития нежелательных последствий и требует оперативного лечения [6–8].

Высокая распространенность посттравматической нестабильности голеностопного сустава привела к необходимости создания опросника для оценки функции голеностопного сустава для диагностики данной патологии и оценки результатов оперативного лечения. Функциональная оценка состояния голеностопного сустава является важным элементом в диагностике и мониторинге лечения пациентов с его хронической латеральной нестабильностью [9, 10]. На данный момент популяризировано использование опросников, которые пациент заполняет самостоятельно без участия лечащего врача (*англ.*: Patient Reported Outcome Measures, PROM), считается, что такие опросники более точно передают ощущения пациента и функциональные особенности [11].

На данный момент во врачебной практике при хирургии голеностопного сустава применяют разнообразные опросники, валидированные для русскоязычного населения: FAAM (*англ.*: Foot and Ankle Ability Measure), FADI (*англ.*: Foot and Ankle Disability Index), SEFAS (*англ.*: Self-reported Foot and Ankle Score), MOxFQ (*англ.*: Manchester-Oxford Foot Questionnaire) и другие [12–14]. Данные опросники зарекомендовали себя как надежный инструмент для оценки состояния голеностопного сустава, но все они не нацелены на субъективные ощущения пациента. Авторами был произведен поиск шкалы-опросника, которая подходит для оценки функции голеностопного сустава пациентов с хронической нестабильностью голеностопного сустава. Среди множества шкал, используемых в клинической практике, опросник Карлссона – Петерсона (*англ.*: Karlsson Ankle Function Score, KAFS) выделяется своей специфичностью и ориентацией на субъективные ощущения пациента [15, 16]. Популярная в ортопедической практике шкала KAFS предложена J. Karlsson и L. Peterson в Швеции [17]. Оценка происходит с помощью девяти параметров: боль, отек, неустойчивость, ограничения в спорте и т.д. Главная задача KAFS — оценить функциональное состояние голеностопного сустава после травм или операций с точки зрения самого пациента. Опросник активно применяют в зарубежных исследованиях, но на текущий момент валидированная по всем стандартам русскоязычная версия опросника KAFS в литературе не представлена. Поэтому требуется культурная и языковая адаптация для использования данной шкалы в клинической практике врача.

Цель работы — произвести межкультурную адаптацию на русский язык и комплексную психометрическую валидацию русскоязычной версии опросника KAFS у пациентов с хронической латеральной нестабильностью голеностопного сустава.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Опросник Карлссона – Петерсона (KAFS)

Опросник KAFS впервые был опубликован J. Karlsson и L. Peterson в 1991 г. в научной статье [15], но более полное описание опросника и его применение для оценки результатов лечения появилось в 1995 г. [17]. Таким образом, 1995 г. считается ключевым годом популяризации и начала активного использования этого опросника в ортопедической практике и научных исследованиях. Важными особенностями данного опросника являются удобство и быстрота заполнения, а также высокая чувствительность к таким понятиям, как боль, ощущение неустойчивости в области голеностопного сустава и нарушение повседневной активности. Опросник заполняется пациентом самостоятельно без участия врача, что показывает его ориентированность на ощущения пациента.

KAFS состоит из трех основных разделов, которые оценивают разные аспекты функции голеностопного сустава:

1. Оценка Симптомов (*англ.*: Symptoms Score). Этот раздел субъективен и оценивает ощущения пациента, такие как боль, отек, нестабильность, скованность. Максимальный балл — 30.
2. Оценка Функции (*англ.*: Function Score). Этот раздел оценивает способность пациента выполнять повседневные действия, такие как подъем по лестнице, бег, работа по дому, потребность в использовании ортеза. Максимальный балл — 30.

3. Оценка Спортивной Функции (*англ.*: Sports Activity Score). Этот раздел оценивает спортивную активность, например, уровень активности пациента, дистанцию, частоту тренировок. Максимальный балл — 40.

Максимально возможный балл при заполнении опросника KAFS — 100 баллов, означающих идеальную, бессимптомную функцию голеностопного сустава, полное возвращение к спорту и повседневной жизни без ограничений. Пациенты, получившие < 70 баллов, имеют неудовлетворительный результат, указывающий на значительные сохраняющиеся проблемы.

Преимуществами опросника KAFS являются простота заполнения, охват ключевых аспектов и ориентация на ощущения пациента.

Опросник AOFAS-AHS

AOFAS-AHS (*англ.*: American Orthopaedic Foot and Ankle Society ankle-hindfoot scale) — один из самых известных инструментов в ортопедической практике. Данный опросник предназначен для комплексной оценки функции голеностопного сустава, подтаранного сустава и заднего отдела стопы. AOFAS-AHS сочетает в себе субъективную оценку пациентом своих симптомов и объективные данные, которые оценивает сам врач.

Шкала AOFAS-AHS состоит из трех доменов с максимальным общим баллом 100.

1. Боль (*англ.*: Pain). Это самый весомый раздел, который оценивает интенсивность и ограничения, вызванные болью. Максимальный балл — 40.
2. Функция (*англ.*: Function). Этот раздел включает несколько параметров: активность и ограничения, требование дополнительной опоры, дистанция ходьбы, походка. Максимальный балл — 50.
3. Деформация (*англ.*: Deformation). Это параметр, который нацелен на оценку пациентом наличия деформации. Максимальный балл — 10.

Максимальный балл, полученный при заполнении данного опросника (100 баллов), свидетельствует об идеальном результате (отсутствие боли, полная функция, идеальное выравнивание). Пациенты, получившие < 50 баллов, имеют неудовлетворительный результат.

Русскоязычная версия опросника валидирована и адаптирована для русскоговорящего населения в рамках международного стандартизованного протокола EuroQol (*англ.*: European Quality of life) [18], поэтому данный опросник мы использовали для проверки конструктивной валидности.

Перевод и адаптация

Перевод и кросс-культурную адаптацию опросника KAFS осуществляли по методике ISPOR (*англ.*: International Society for Pharmacoeconomics and Outcomes Research) [18, 19]. Опросник KAFS, состоящий из девяти вопросов, переведен на русский язык врачом-травматологом-ортопедом со знанием английского языка на продвинутом уровне, а также профессиональным переводчиком. Получены две параллельные версии перевода. Создана рабочая группа, которая сравнивала два перевода, обсуждала расхождения и создавала единую синтезированную версию. Два других независимых переводчика, рожденных в англоговорящей стране, перевели синтезированную версию опросника обратно на английский язык. Создан комитет, который включал в себя методистов, травматологов-ортопедов, лингвистов, переводчиков (которые участвовали в процессе перевода). Участники комитета обсудили и разрешили все несоответствия, обеспечивая достижение концептуальной, семантической и культурной эквивалентности опросника. Таким образом, создана и утверждена окончательная версия опросника. Для проверки работоспособности утвержденной версии проведено пилотное тестирование и когнитивное интервью.

Печатный вариант опросника был предложен для заполнения 20 пациентам с хронической нестабильностью голеностопного сустава. В ходе когнитивного интервью пациентам были заданы вопросы: «Как вы поняли этот вопрос?», «Были ли какие-то слова или фразы непонятны для Вас?» и др.

В ходе данного тестирования и интервью не было выявлено затруднений в ответах и понимании вопросов у выбранных пациентов, что может говорить о высокой различимости, а также о когнитивной доступности шкал. Для оценки ретестовой надежности 39 пациентов повторно заполняли печатную версию опросника спустя 7–14 дней после первоначального заполнения в состоянии клинической стабильности. Для дальнейшей оценки конструктивной валидности всем пациентам было предложено заполнить опросник AOFAS-AHS [18].

Русскоязычная версия опросника Карлссона – Петерсона

Вопрос	Варианты ответов	Баллы
Боль	Нет	20
	Во время тренировки	15
	Во время ходьбы по неровной поверхности	10
	Во время ходьбы по ровной поверхности	5
	Постоянно	0
Отёк	Нет	10
	После тренировки	5
	Постоянно	0
Неустойчивость	Нет	25
	1–2 раза в год (во время тренировок)	20
	Часто 1–2 раза в месяц (во время тренировок)	15
	Во время ходьбы по неровной поверхности	10
	Во время ходьбы по ровной поверхности	5
	Постоянное использование опоры голеностопного сустава	0
Скованность	Нет	5
	Умеренная (утром, после тренировки)	2
	Выраженная (постоянная, сильная)	0
Подъем по лестнице	Нет проблем	10
	Замедлено (нестабильность)	5
	Невозможно	0
Бег	Нет проблем	10
	Замедлен	5
	Невозможен	0
Трудовая деятельность	Та же, что и до травмы	15
	Та же работа, меньше спорта, нормальные виды досуга	10
	Более легкая работа, без спорта, нормальные виды досуга	5
	Тяжелое нарушение трудоспособности, снижение видов досуга	0
Использование ортеза	Нет	5
	Во время занятий спортом	2
	Во время повседневной деятельности	0

Дизайн исследования

Процедуру валидации проводили на определенной выборке пациентов в течение времени в соответствии международным рекомендациям. Формат данного исследования — проспективное, когортное, наблюдательное. Все пациенты и их данные набирали в рамках одного учреждения, поэтому исследование является одноцентровым.

Выборка

В исследуемую группу включены 60 пациентов с хронической латеральной нестабильностью голеностопного сустава: 30 женщин и 30 мужчин в возрасте от 18 до 65 лет (средний возраст — 36,3 года), госпитализированных в Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени Р.Р. Вредена с января 2023 г. по апрель 2024 г. для оперативного лечения, — анатомической пластики латерального связочного комплекса голеностопного сустава по Бростром – Гоулд.

Критерии включения: пациенты, достигшие 18 лет, наличие информированного добровольного согласия.

Критерии невключения: письменный отказ пациента от участия в исследовании, наличие предшествующих оперативных вмешательств на латеральном связочном комплексе, наличие в анамнезе переломов на уровне голеностопного сустава, остеохондральный дефект таранной кости.

Критерии исключения: отказ от предоставления нужной информации о состоянии здоровья и анамнезе заболевания, нежелание продолжить участие в исследовании на каком-либо из этапов исследования.

Описание критериев соответствия: выборку пациентов формировали на основании наличия у пациента первично перенесенной инверсионной травмы голеностопного сустава, субъективного ощущения нестабильности, а также на основании инструментальных исследований и выполненных функциональных тестов, подтверждающих повреждение латерального связочного комплекса голеностопного сустава.

Статистический анализ

Полученные данные внесены в таблицы с использованием компьютерной программы Microsoft Excel, что позволило их редактировать и обрабатывать. Для статистической обработки данных использовали программы Jamovi (версия 2.3.28) и PAST (версия 4,03).

Психометрическая оценка

Оценка психометрических свойств русскоязычной версии опросника KAFS была проведена на основании международных принципов COSMIN (*англ.*: Consensus-based Standards for the selection of health status Measurement Instruments) [21].

Коэффициент α -Кронбаха — статистический показатель, который помогает оценить внутреннюю согласованность между всеми пунктами опросника и самого опросника в целом, не доказывает одномерность и не оценивает другие виды надежности, показывает, насколько хорошо все пункты измеряют одну и ту же характеристику. Данный коэффициент считается автоматически с помощью программных пакетов и не нуждается в подсчете вручную. Коэффициент α -Кронабаха, полученный в диапазоне от 0,7 до 0,9, считается высоким и показывает отличную согласованность всех пунктов для оценки общего конструкта [22].

Конструктивную валидность оценивали корреляционным анализом с опросником AOFAS-AHS с помощью критерия Спирмена. Конструктивная валидность показывает, насколько хорошо набор показателей отражает концепцию. Вычисление ретестовой надежности проводили с помощью коэффициента внутриклассовой корреляции ICC (*англ.*: Intraclass Correlation Coefficient) [22]. Стандартную ошибку измерения SEM (*англ.*: Standard Error of the Measurement) рассчитывали по формуле: $SEM = SD \times \sqrt{1 - ICC}$. Минимально значимое различие MDC (*англ.*: Minimal Detectable Change) определяли по формуле: $MDC = 1.96 \times SEM \times \sqrt{2}$. Анализ потолочного и этажного эффектов определяли как часть пациентов, набравших максимальное или минимальное значение по окончательному баллу. Низкими эффектами «потолка» и «пола» считаются значения менее 15 %.

Планирование гипотез

Конструктивная валидность — это степень, в которой опросник измеряет тот теоретический конструкт, для измерения которого он был создан. Один из самых мощных способов оценки конструктивной валидности — это изучение связей с другими переменными. В нашем исследовании использована методика сопоставления с показателями опросника AOFAS-AHS на основании заранее сформированных гипотез о силе предполагаемых корреляций [20]. Для проверки этих гипотез используют коэффициент корреляции Спирмена, т.к. данные более устойчивы к отклонениям от нормального распределения [23].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Кросс-культурная адаптация заключалась в возможности добиться того, чтобы переведенный опросник был не просто лингвистически точным, но и концептуально и семантически эквивалентным оригиналу, а также прост и понятен пациенту. Нам требовалось обеспечить сопоставимость данных и гарантировать, что инструмент надежен и валиден для использования в новой культуре.

Исследование завершили все 60 пациентов, входящих в исследование, в полном объеме. Средний балл по шкале KAFS составил 36,3 (min — 26; max — 72) из 100 возможных. Со всеми пациентами проведена беседа врачом — травматологом-ортопедом, в ходе которой была дана информация о том, как правильно заполнять анкету, поэтому заполняемость составила 100 %. Ни один пациент, входящий в исследование, не отметил трудностей в процессе заполнения печатной версии опросника. Среднее время заполнения анкеты составило 3,1 мин.

Распределение баллов русскоязычной версии опросника KAFS не выявило значимых потолочного и этажного эффектов (0 баллов и 100 баллов), критически важных показателей качества измерительного инструмента, что свидетельствует о хорошей дискриминативной способности опросника, его высокой чувствительности и пригодности для измерения функции голеностопного сустава у пациентов с различной степенью тяжести патологии.

Внутренняя согласованность

Русскоязычная версия опросника KAFS продемонстрировала высокую внутреннюю согласованность, что является подтверждением того, что данный инструмент для оценки функции голеностопного сустава является цельным и последовательным в измерении нужного нам свойства. Расчет α -Кронбаха имел значение 0,826. Данный расчет основан на первоначальном заполнении печатной версии опросника и включал 60 пациентов на дооперационном этапе в состоянии полного клинического покоя.

Надежность

Тест-ретест анализ помог нам в оценке устойчивости результатов измерений во времени. Русскоязычная версия опросника KAFS продемонстрировала хорошую тест-ретест надежность на 39 пациентах, которые повторно заполняли печатную версию опросника KAFS в течение 7–14 дней после первичного анкетирования при неизменном клиническом состоянии до оперативного лечения. Внутриклассовый коэффициент корреляции (ICC) для общего балла составил 0,720, что свидетельствует о хорошей воспроизводимости и стабильности результатов опросника при повторном заполнении.

Для оценки точности измерения рассчитана стандартная ошибка измерения (SEM), которая составила 2,89 балла. Минимально значимое различие (MDC) 7,95 балла подтверждает высокую точность и надежность данного опросника.

Конструктивная валидность

Для оценки конструктивной валидности мы подготовили пять заранее сформированных гипотез о силе корреляции. Сама оценка показателей происходила с помощью расчёта коэффициентов ранговой корреляции Спирмена. Все пять сформированных гипотез (100 %) получили подтверждение (табл. 1), что свидетельствует о высокой степени конструктивной валидности русскоязычной версии KAFS [21].

Таблица 1

Тестирование гипотез для определения конструктивной валидности переведенной версии опросника

Сравниваемые шкалы/домены	Гипотеза	Ожидаемый ρ
KAFS и AOFAS-AHS: активность	Прямая корреляция	$\geq 0,5$
KAFS и AOFAS-AHS: неустойчивость	Прямая корреляция	$\geq 0,5$
KAFS и AOFAS-AHS: боль/дискомфорт	Прямая корреляция	$\geq 0,5$
KAFS и AOFAS-AHS: использование дополнительной опоры	Прямая корреляция	$\geq 0,4$
KAFS и AOFAS-AHS: самообслуживание	Прямая корреляция	$\geq 0,4$

ОБСУЖДЕНИЕ

Хроническая нестабильность голеностопного сустава на сегодняшний день является актуальной проблемой в связи с ее распространенностью среди физически активных, работоспособных людей. В данное время не существует шкалы, которая была бы специфична при данной патологии и помогала на этапе диагностики и для послеоперационного наблюдения. Врачи пользуются разнообразными шкалами, которые в полной мере не отображают субъективные ощущения пациента и не являются специфичными при оценке субъективных ощущений пациентов с хронической латеральной нестабильностью голеностопного сустава. В зарубежной литературе авторы в своих исследованиях активно используют шкалу KAFS для диагностики хронической нестабильности голеностопного сустава и послеоперационного наблюдения пациентов, считая ее наиболее специфичной для данной патологии [24–28]. В результате данного исследования в соответствии с международными критериями выполнен перевод, кросс-культурная адаптация и валидация русскоязычной версии KAFS на выборке пациентов с хронической латеральной нестабильностью голеностопного сустава. Полученные результаты доказывают высокие психометрические свойства данной шкалы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опросник KAFS продемонстрировал высокую чувствительность и специфичность в оценке функционального состояния голеностопного сустава. В отличие от опросника AOFAS-AHS, который сочетает объективные и субъективные параметры, опросник KAFS фокусируется на субъективных ощущениях пациента, что делает его особенно ценным в контексте оценки качества жизни и восприятия стабильности голеностопного сустава пациентом.

Опросник KAFS является валидным и надёжным инструментом для оценки функционального состояния голеностопного сустава у пациентов с хронической латеральной нестабильностью голеностопного сустава. Использование KAFS в клинической практике позволяет более точно оценивать эффективность проведённого лечения и уровень восстановления функции сустава у пациентов с хронической латеральной нестабильностью голеностопного сустава с учётом субъективных ощущений пациента.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Этическая экспертиза. Этическая экспертиза протокола исследования не проводилась.

Информированное согласие. Все пациенты подписали форму информированного согласия на участие в исследовании.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Takao M, Matsui K, Stone JW, et al. Arthroscopic anterior talofibular ligament repair for lateral instability of the ankle. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2016;24(4):1003-1006. doi: 10.1007/s00167-015-3638-0.
2. Vega J, Malagelada F, Manzanares Céspedes MC, Dalmau-Pastor M. The lateral fibulotalocalcaneal ligament complex: an ankle stabilizing isometric structure. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2020;28(1):8-17. doi: 10.1007/s00167-018-5188-8.
3. Hamilton WG, Thompson FM, Snow SW. The modified Brostrom procedure for lateral ankle instability. *Foot Ankle.* 1993;14(1):1-7. doi: 10.1177/107110079301400101.
4. Broström L. Sprained ankles. VI. Surgical treatment of "chronic" ligament ruptures. *Acta Chir Scand.* 1966;132(5):551-65.
5. Мацакян А.М., Кесян Г.А., Очкуренко А.А. и др. Использование модифицированной артроскопической стабилизации голеностопного сустава в лечении хронической наружной нестабильности. *Вестник травматологии и ортопедии им Н.Н. Приорова.* 2017;24(1):32-36. doi: 10.17816/vto201724132-36.
6. Sarcon AK, Heyrani N, Giza E, Kreulen C. Lateral Ankle Sprain and Chronic Ankle Instability. *Foot Ankle Orthop.* 2019;4(2):2473011419846938. doi: 10.1177/2473011419846938.
7. Каплун В.А., Копысова В.А., Мартель И.И. Методы хирургического лечения больных с повреждениями голеностопного сустава. *Вестник травматологии и ортопедии им Н.Н. Приорова.* 2013;20(1):27-33. doi: 10.17816/vto20130127-33.
8. Cao Y, Hong Y, Xu Y, et al. Surgical management of chronic lateral ankle instability: a meta-analysis. *J Orthop Surg Res.* 2018;13(1):159. doi: 10.1186/s13018-018-0870-6.
9. Rigby RB, Cottom JM. A comparison of the "All-Inside" arthroscopic Broström procedure with the traditional open modified Broström-Gould technique: A review of 62 patients. *Foot Ankle Surg.* 2019;25(1):31-36. doi: 10.1016/j.fas.2017.07.642.
10. van Dijk CN, Lim LS, Bossuyt PM, Marti RK. Physical examination is sufficient for the diagnosis of sprained ankles. *J Bone Joint Surg Br.* 1996;78(6):958-962. doi: 10.1302/0301-620x78b6.1285.
11. Horwitz DS, Richard RD, Suk M. The reporting of functional outcome instruments in the Journal of Orthopaedic Trauma over a 5-year period. *J Orthop Trauma.* 2014;28(1):2-5. doi: 10.1097/BOT.0000000000000026.
12. Акулаев А.А., Иванов А.А., Ионова Т.И. и др. Валидация и апробация русской версии опросника оценки состояния стопы и голеностопного сустава SEFAS у пациентов хирургического профиля с патологией передних отделов стопы. *Гений ортопедии.* 2024;30(2):221-233. doi: 10.18019/1028-4427-2024-30-2-221-233.
13. Акулаев А.А., Иванов А.А., Ионова Т.И. и др. Апробация русскоязычных опросников FADI и FAAM для определения функции стопы до и после хирургического лечения. *Гений ортопедии.* 2024;30(3):384-393. doi: 10.18019/1028-4427-2024-30-3-384-393.
14. Пашкова Е.А., Сорокин Е.П., Фаустова Ю.П. и др. Кросс-культурная адаптация и валидация русскоязычной версии опросника ManchesterOxford Foot Questionnaire (МОxFO) у пациентов с патологией стоп и голеностопных суставов. *Травматология и ортопедия России.* 2025;31(3):96-104. doi: 10.17816/2311-2905-17715.
15. Karlsson J, Peterson L. Evaluation of ankle joint function: the use of a scoring scale. *Foot.* 1991;1(1):15-19. doi: 10.1016/0958-2592(91)90006-W.
16. Haywood KL, Hargreaves J, Lamb SE. Multi-item outcome measures for lateral ligament injury of the ankle: a structured review. *J Eval Clin Pract.* 2004;10(2):339-352. doi: 10.1111/j.1365-2753.2003.00435.x.
17. Karlsson J, Rudholm O, Bergsten T, et al. Early range of motion training after ligament reconstruction of the ankle joint. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 1995;3(3):173-177. doi: 10.1007/BF01565478.
18. Фомичев В.А., Сорокин Е.П., Коновальчук Н.С. и др. Кросс-культурная адаптация и валидация русскоязычной версии шкалы Американской ассоциации хирургов стопы и голеностопного сустава AOFAS-AHS. *Травматология и ортопедия России.* 2023;29(4):78-86. doi: 10.17816/2311-2905-16494.
19. Beaton DE, Bombardier C, Guillemin F, Ferraz MB. Guidelines for the process of cross-cultural adaptation of self-report measures. *Spine (Phila Pa 1976).* 2000;25(24):3186-191. doi: 10.1097/00007632-200012150-00014.
20. Wild D, Grove A, Martin M, et al. Principles of Good Practice for the Translation and Cultural Adaptation Process for Patient-Reported Outcomes (PRO) Measures: report of the ISPOR Task Force for Translation and Cultural Adaptation. *Value Health.* 2005;8(2):94-104. doi: 10.1111/j.1524-4733.2005.04054.x.
21. Mokkink LB, Terwee CB, Patrick DL, et al. The COSMIN checklist for assessing the methodological quality of studies on measurement properties of health status measurement instruments: an international Delphi study. *Qual Life Res.* 2010;19(4):539-549. doi: 10.1007/s11136-010-9606-8.
22. Tavakol M, Dennick R. Making sense of Cronbach's alpha. *Int J Med Educ.* 2011;2:53-55. doi: 10.5116/ijme.4dfb.8dfd.
23. Terwee CB, Bot SD, de Boer MR, et al. Quality criteria were proposed for measurement properties of health status questionnaires. *J Clin Epidemiol.* 2007;60(1):34-42. doi: 10.1016/j.jclinepi.2006.03.012.
24. Shan L, Zhao B, Wang H, et al. Comparison of Inferior Extensor Retinacular Reinforcement Versus Nonreinforcement in Arthroscopic Isolated Anterior Talofibular Ligament Repair for Chronic Lateral Ankle Instability: A Systematic Review and Meta-analysis. *Orthop J Sports Med.* 2024;12(12):23259671241270305. doi: 10.1177/23259671241270305.
25. Park KH, Shim DW, Lee JW, et al. Results of arthroscopic lateral ligament repair according to the arthroscopic classification of anterior talofibular ligament remnants. *Foot Ankle Surg.* 2025;31(5):400-405. doi: 10.1016/j.fas.2024.12.008.
26. Fan D, Liu X, Zhang L. Single anchor versus double anchor for arthroscopic anterior talofibular ligament repair: A systematic review and meta-analysis of cohort studies. *J Orthop Surg (Hong Kong).* 2023;31(3):10225536231217914. doi: 10.1177/10225536231217914.
27. Guelfi M, Zamperetti M, Pantalone A, et al. Open and arthroscopic lateral ligament repair for treatment of chronic ankle instability: A systematic review. *Foot Ankle Surg.* 2018;24(1):11-18. doi: 10.1016/j.fas.2016.05.315.
28. Shan L, Zhao B, Wang H, et al. Comparison of Inferior Extensor Retinacular Reinforcement Versus Nonreinforcement in Arthroscopic Isolated Anterior Talofibular Ligament Repair for Chronic Lateral Ankle Instability: A Systematic Review and Meta-analysis. *Orthop J Sports Med.* 2024;12(12):23259671241270305. doi: 10.1177/23259671241270305.

Статья поступила 10.10.2025; одобрена после рецензирования 02.12.2025; принята к публикации 09.02.2026.

The article was submitted 10.10.2025; approved after reviewing 02.12.2025; accepted for publication 09.02.2026.

Информация об авторах:

Татьяна Николаевна Кубрина — врач — травматолог-ортопед, аспирант, Kubrina_1998@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-3309-2560>;

Евгений Петрович Сорокин — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, заведующий отделением, ассистент кафедры травматологии и ортопедии, sorokinortoped@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9948-9015>;

Екатерина Анатольевна Пашкова — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, младший научный сотрудник, caterinapashkova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3198-9985>;

Никита Сергеевич Коновальчук — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, младший научный сотрудник, konovalchuk91@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2762-816X>;
Ксения Андреевна Демьянова — врач — травматолог-ортопед, ortodem@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2239-2792>;
Юлия Павловна Фаустова — врач — травматолог-ортопед, аспирант, fausjulie99@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-2779-7564>;
Петр Михайлович Преображенский — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, младший научный сотрудник, pedrro@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9569-1566>.

Information about the authors:

Tatiana N. Kubrina — orthopaedic surgeon, post-graduate student, Kubrina_1998@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-3309-2560>;
Evgenii P. Sorokin — Candidate of Medical Sciences, orthopaedic surgeon, Head of Department, Assistant Professor, sorokinortoped@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9948-9015>;
Ekaterina A. Pashkova — Candidate of Medical Sciences, orthopaedic surgeon, Junior researcher, caterinapashkova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3198-9985>;
Nikita S. Konovalchuk — Candidate of Medical Sciences, orthopaedic surgeon, Junior researcher, konovalchuk91@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2762-816X>;
Ksenia A. Demianova — orthopaedic surgeon, ortodem@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2239-2792>;
Yulia P. Faustova — orthopaedic surgeon, post-graduate student, fausjulie99@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-2779-7564>;
Petr M. Preobrazhenskii — Candidate of Medical Sciences, orthopaedic surgeon, Junior researcher, pedrro@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9569-1566>.

Вклад авторов:

Кубрина Т.Н. — формулировка и развитие ключевых целей и задач, составление черновика рукописи, его критический пересмотр с внесением ценных замечаний интеллектуального содержания, применение статистических, математических, вычислительных методов для анализа и синтеза данных исследования;

Сорокин Е.П. — формулировка и развитие ключевых целей и задач, анализ и интерпретация полученных данных, критический пересмотр рукописи с внесением ценного замечания интеллектуального содержания;

Пашкова Е.А. — внесения ценных замечаний интеллектуального содержания, применение статистических, математических, вычислительных методов для анализа и синтеза данных исследования;

Коновальчук Н.С. — сбор данных, анализ и интерпретация полученных данных, внесения ценных замечаний интеллектуального содержания;

Демьянова К.А., Фаустова Ю.П., Преображенский П.М. — сбор данных, анализ и интерпретация полученных данных.

Научная статья

УДК 616.718.4-004.8-089.843-77:666.1-3:615.382:616.71-003.93-092.9

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2026-32-2-214-224>



Применение обогащенной тромбоцитами плазмы при возмещении дефектов костной ткани керамическими имплантатами

И.П. Антропова, Е.А. Волокитина✉, К.А. Тимофеев, Р.А. Труфаненко, С.М. Кутепов, Л.Г. Полушина

Уральский государственный медицинский университет, Екатеринбург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Елена Александровна Волокитина, Volokitina_elen@rambler.ru

Аннотация

Введение. Применение керамических материалов является перспективным направлением возмещения дефектов кости. Для улучшения их свойств и повышения регенераторного потенциала используют различные ортобиологические препараты.

Цель работы — определить эффективность применения обогащенной тромбоцитами плазмы при возмещении дефектов костной ткани керамическими имплантатами из диоксида циркония, допированного оксидом иттрия.

Материалы и методы. Образцы биокерамики представлены диоксидом циркония. Керамические имплантаты имели размер 0,15 × 0,15 × 1,00 см. В эксперименте использовали самцов кроликов породы шиншилла: группа 1 ($n = 10$) — животные, которым билатерально моделировали метафизарные костные дефекты с имплантацией керамических аугментов; группа 2 ($n = 10$) — животные, которым моделировали костные дефекты без имплантации. Кроликам обеих групп в костный дефект на правом бедре вводили плазму, обогащенную тромбоцитами (PRP), в дефект на левом бедре PRP не вводили. Отбор крови проводили перед операцией и при выводе из эксперимента через четыре и восемь недель после операции. Определяли основные показатели крови, С-реактивный белок, в PRP — тромбоцитарный фактор роста PDGF. Для оценки влияния PRP на динамику остеогенеза проведен сравнительный анализ гистологического строения тканей в области моделирования дефекта кости.

Результаты. Ни до операции, ни спустя восемь недель после операции существенных различий между группами по основным показателям лейкоцитов, эритроцитов и тромбоцитов, уровню С-реактивного белка не выявлено. Концентрация PDGF во вводимой PRP не имела существенных различий между группами. Гистологический анализ показал, что применение PRP увеличивало количество регенерирующих костных балок, снижало количество и размер фокусов фиброза и костно-хрящевой мозоли в обеих группах.

Обсуждение. Ранее доказано, что использование аутологичной PRP является простым и эффективным способом улучшения регенерации кости за счет высвобождения тромбоцитами при активации множества факторов роста, которые управляют основными биологическими процессами, включая индукцию ангиогенеза, разрешение воспаления и регенерацию тканей. Наше исследование было направлено на изучение того, усиливает ли обогащенная тромбоцитами плазма остеогенный потенциал керамических имплантатов из диоксида циркония при возмещении дефектов костной ткани. Наши результаты подтверждают, что PRP, имеющая концентрацию тромбоцитов $800 \times 10^9/\text{л}$ — $1200 \times 10^9/\text{л}$, уровень лейкоцитов 4–7 %, эритроцитов не более 1 % от исходного содержания в крови, может быть полезным инструментом для репаративной регенерации костной ткани.

Заключение. Использование PRP эффективно при возмещении дефектов костной ткани с использованием керамических имплантатов из диоксида циркония. Вместе с тем для интеграции методов, использующих PRP, в доказательную медицинскую практику, необходимы дальнейшие тщательные клинические исследования.

Ключевые слова: возмещение дефектов костной ткани, имплантат, циркониевая керамика, обогащенная тромбоцитами плазма, остеоинтеграция, эксперимент

Для цитирования: Антропова И.П., Волокитина Е.А., Тимофеев К.А., Труфаненко Р.А., Кутепов С.М., Полушина Л.Г. Применение обогащенной тромбоцитами плазмы при возмещении дефектов костной ткани керамическими имплантатами. *Гений ортопедии*. 2026;32(2):214-224. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-2-214-224.



Application of platelet-rich plasma in compensating bone defects with ceramic Implants

I.P. Antropova, E.A. Volokitina , K.A. Timofeev, R.A. Trufanenko, S.M. Kutepov, L.G. Polushina

Ural State Medical University, Ekaterinburg, Russian Federation

Corresponding author: Elena A. Volokitina, Volokitina_elena@rambler.ru

Abstract

Introduction The use of ceramic materials is a promising approach to bone defect repair. Various orthobiological agents are used to improve their properties and enhance their regenerative potential.

The **aim** of this study was to determine the efficacy of platelet-rich plasma in repairing bone defects with yttria-doped zirconia ceramic implants.

Materials and Methods Bioceramic samples were zirconium dioxide. The ceramic implants measured $0.15 \times 0.15 \times 1.00$ cm. Male Chinchilla rabbits were used in the experiment: Group 1 ($n = 10$) included animals that underwent bilateral metaphyseal bone defect filling with implantation of ceramic augments; Group 2 ($n = 10$) included animals that underwent bone defect repair without implantation. Platelet-rich plasma (PRP) was injected into the bone defect in the right femur of rabbits in both groups; PRP was not injected into the defect in the left femur. Blood samples were collected preoperatively and at the end of the experiment, four and eight weeks after surgery. Key blood parameters, including C-reactive protein, and platelet-derived growth factor (PDGF) in PRP were determined. To assess the effect of PRP on the dynamics of osteogenesis, a comparative histological analysis of the tissue structure in the simulated bone defect area was conducted.

Results No significant differences were found between the groups in key parameters of leukocytes, erythrocytes, and platelets, or C-reactive protein levels, either preoperatively or eight weeks after surgery. The concentration of PDGF in the injected PRP did not differ significantly between the groups. Histological analysis showed that injection of PRP increased the number of regenerating bone trabeculae and reduced the number and size of fibrotic foci and osteochondral callus in both groups.

Discussion Autologous PRP has previously been shown to be a simple and effective way to enhance bone regeneration due to the release of multiple growth factors by platelets, which regulate key biological processes, including angiogenesis, inflammation resolution, and tissue regeneration. Our study aimed to investigate whether platelet-rich plasma enhances the osteogenic potential of zirconia ceramic implants in bone defect repair. Our results confirm that PRP, with a platelet concentration of $800 \times 10^9/L$ to $1200 \times 10^9/L$, a white blood cell count of 4–7 %, and a red blood cell count of no more than 1 % of the baseline blood count, may be a useful tool for bone regeneration.

Conclusion The use of PRP is effective in compensating bone defects using zirconia ceramic implants. However, further rigorous clinical studies are needed to integrate PRP-based methods into evidence-based medical practice.

Keywords: bone tissue, defect repair, implant, zirconium ceramics, platelet-rich plasma, osseointegration, experiment

For citation: Antropova IP, Volokitina EA, Timofeev KA, Trufanenko RA, Kutepov SM, Polushina LG. Application of platelet-rich plasma in compensating bone defects with ceramic Implants. *Genij Ortopedii*. 2026;32(2):214-224. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-2-214-224.

ВВЕДЕНИЕ

Возмещение дефектов кости является одной из ключевых задач современной травматологии и ортопедии. С каждым годом отмечается рост числа травм, дегенеративных заболеваний и онкологических патологий, связанных с костной тканью, которые требуют оперативного лечения, а в ряде случаев — возмещения полученных дефектов. Количество хирургических вмешательств при внутрисуставных и многооскольчатых переломах с костными дефектами растет с каждым годом [1, 2, 3].

Для замещения дефектов используют различные остеопластические материалы. «Золотым стандартом» признают аутотрансплантат, однако его применение сопряжено с возможными осложнениями, как в донорском участке, так и в месте замещения дефекта [4]. Использование алло- и ксенотрансплантатов также имеет существенные недостатки [5]. Дефицит натуральных источников на фоне роста потребности в имплантатах стимулировал поиск и разработку искусственных материалов для остеопластики.

Одним из перспективных направлений в возмещении дефектов кости является применение керамических материалов. Широкий спектр свойств биокерамики и хорошая совместимость с тканями человека делает этот материал потенциально приемлемым для решения большого круга проблем травматологии и ортопедии [6]. Важное место занимает биокерамика на основе стабилизированного иттрием диоксида циркония. Этот материал демонстрирует исключительные механические свойства и биосовместимость, не вызывает цитотоксических эффектов или аллергических реакций в окружающих тканях [7, 8].

В силу своих физико-химических свойств биокерамика, применяемая для костной пластики, обладает, главным образом, osteoconductive свойствами [9]. С целью улучшения свойств остеопластических материалов и повышения их регенераторного потенциала используют различные ортобиологические препараты [10]. Особое внимание в последние годы уделяется тромбоцитарным биопрепаратам [11]. Отмечено, что применение обогащенной тромбоцитами плазмы (PRP, *англ.*: platelet rich plasma) не только улучшает пролиферацию мезенхимальных стволовых клеток [12], но и способствует их остеогенной дифференцировке [13]. Исследования показывают, что применение PRP в комбинации с керамическими или композитными имплантатами может способствовать osteoinduction [14] и значительно улучшать исходы лечения [15]. Результаты комбинированного применения PRP-терапии с костнопластическими материалами признаются многообещающими [16]. Вместе с тем отмечено, что, несмотря на дополнительные преимущества сочетания керамических osteoconductive материалов с тромбоцитарными ортобиологическими продуктами, необходимы дальнейшие экспериментальные и клинические исследования.

Цель работы — определить эффективность применения обогащенной тромбоцитами плазмы при возмещении дефектов костной ткани керамическими имплантатами из диоксида циркония, допированного оксидом иттрия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Лабораторные животные

В качестве экспериментальных животных выбраны самцы кроликов породы шиншилла, которых содержали на базе вивария Уральского государственного медицинского университета при температуре 23–25 °С, цикле освещения 12 ч день/ночь, с доступом к еде и воде *ad libitum*. Все эксперименты проводили в соответствии с «Правилами надлежащей лабораторной практики» (приказ МЗ РФ № 199н от 01.04.2016г.), Межгосударственными стандартами (ГОСТ 33215-2014, ГОСТ 33216-2014 «Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными»), Европейской конвенцией о защите позвоночных животных, используемых в экспериментах и в других научных целях (ETS № 123, Страсбург, 18 марта 1986 г. с приложением от 15.06.2006). Исследования одобрены локальным этическим комитетом ФГБОУ ВО УГМУ Минздрава России (протокол № 4 от 26.05.23).

Все кролики разделены на две группы: в группу 1 ($n = 10$) включены животные, которым билатерально в бедренных костях моделировали метафизарные костные дефекты с имплантацией керамических аугментов; в группу 2 ($n = 10$) вошли животные, которым также билатерально в бедренных костях моделировали метафизарные костные дефекты, но имплантацию керамических аугментов не проводили. Кроликам обеих групп в костный дефект на правом бедре вводили PRP, в дефект на левом бедре PRP не вводили.

Хирургическое моделирование костного дефекта в области дистального метафиза бедренной кости

Для создания модели костного дефекта экспериментальное животное укладывали на бок, заднюю конечность обрабатывали растворами антисептиков, операционное поле обкладывали стерильным хирургическим бельем. Выполняли продольный кожный разрез длиной 1 см по латеральной поверхности нижней трети бедра в проекции бедренной кости. Мягкие ткани по ходу доступа отсепаховывали тупым способом. Спицей Кишнера диаметром 2,0 мм формировали костный дефект в области

дистального метафиза бедренной кости параллельно суставной поверхности коленного сустава. Моделирование костного дефекта производили билатерально. На правой конечности в костный дефект вводили PRP, на левой конечности в костный дефект PRP не вводили.

В группе 1 в костные дефекты обоих бедер имплантировали керамические аугменты (размер $0,15 \times 0,15 \times 1$ см). В группе 2 в костные дефекты обоих бедер аугменты из керамики не имплантировали. Рану ушивали послойно, кожные покровы обрабатывали антисептиком, накладывали асептическую повязку. В каждой из групп пять животных выводили из эксперимента через четыре недели после операции, пять животных — через восемь недель после операции.

Материал для аугментации костных дефектов

Образцы биокерамики, представленной диоксидом циркония (ZrO_2), допированным оксидом иттрия (Y_2O_3 5 масс %), получены в Институте высокотемпературной электрохимии Уральского отделения Российской академии наук. Материал — с закрытым типом пористости, объемная доля пор — около 15 %. Пores — размером от 1–2 до 30 мкм, сложной формы. Керамические имплантаты имели размер $0,15 \times 0,15 \times 1$ см (рис. 1).

Приготовление плазмы, сыворотки, PRP

Процедуру отбора крови у животных обеих групп проводили перед операцией и при выводе из эксперимента через четыре и восемь недель после операции.

Отбор крови осуществляли из краевой вены уха кроликов:

- в пробирки с ЭДТА-К2 (этилендиаминтетраацетат калия) для определения гематологических параметров;
- в пробирки без антикоагулянта для получения сыворотки, которую далее замораживали и хранили при температуре -80 °C до проведения иммуноферментного анализа (ИФА);
- в пробирки с 3,2 % цитратом натрия в соотношении 9:1.

Для получения PRP кровь с цитратом натрия центрифугировали в течение 7 мин. при скорости 1500 об/мин. Полученную плазму оттягивали стерильным инсулиновым шприцем, 200 мкл помещали в пробирку Эппендорфа для определения количества тромбоцитов на гематологическом анализаторе Cell-70 (Biocode-Hugel, France) и последующего замораживания, остальную PRP (1 мл) вводили в место сформированного метафизарного дефекта правого бедра.

Лабораторные исследования

Лабораторные исследования проводили на базе ЦНИЛ ФГБОУ ВО УГМУ. Основные показатели крови определяли на автоматическом гематологическом анализаторе Cell-70 (Biocode-Hugel, France). Тромбоцитарный фактор роста (PDGF subunit A, rabbit) после процедуры замораживания–оттаивания PRP определяли с использованием наборов для ИФА (Cloud-Clone Corp., Китай). Также методом ИФА определяли С-реактивный белок (CRP, rabbit, Cloud-Clone Corp), остеокальцин (Osteocalcin, rabbit, Cloud-Clone Corp). Для выполнения анализа применяли комплекс, включающий планшетный иммуноферментный анализатор Thermo Scientific Multiskan GO (Япония); шейкер Thermo Scientific Wellwash (Япония), шейкер-термостат Elmi ST-3L (Латвия).

Гистологическое исследование

После вывода животного из эксперимента забирали образец костной ткани в области дистального метафиза бедра в виде блока, фиксировали путем погружения в 10 % забуференный формальдегид при комнатной температуре в течение минимум семи дней. После фиксации образцы декальцинировали в течение 48 часов в растворе соляной ($11,5 \pm 0,5$ %) и муравьиной ($5,8 \pm 0,3$ %) кислот, который заменяли каждые 24 часа. Декальцинированные образцы разрезали в области костного дефекта с формированием пластин толщиной от 2 до 4 мм. Полученные пластины обезвоживали в этаноле восходящей крепости и заливали в парафин с формированием блоков, после чего изготавливали срезы парафиновых блоков толщиной от 3 до 4 мкм, материал окрашивали гематоксилином и эозином. Керамические имплантаты извлекали при вырезке образцов для гистологического исследования после проведения декальцинации. Гистологические срезы готовили с использованием механического ротационного микротомата CUT 4062. Гистологическое и морфометрическое исследования осуществляли при помощи микроскопа Olympus CX-31, камеры Olympus DP27. Выполняли оценку степени фиброза, наличия и выраженности костно-хрящевой мозоли, регенерирующих костных балок, определяли наличие воспалительного инфильтрата.

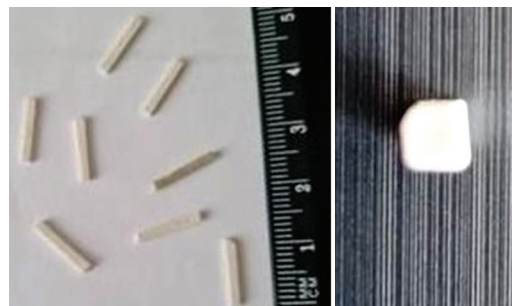


Рис. 1. Керамические имплантаты, приготовленные из диоксида циркония, допированного оксидом иттрия и имплантат в сечении

Статистическая обработка данных

Применяли методы вариационной статистики, использовали программу Statistica 10. Для сравнения исследуемых групп использовали критерий Манна – Уитни. Уровень $p < 0,05$ принимали статистически значимым. Данные представлены как медиана [интерквартильный размах].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для оценки влияния вводимого керамического материала на общее состояние организма экспериментальных животных проводили определение общих гематологических параметров в динамике (до и после операции). Общий анализ крови (табл. 1) не выявил существенных различий по основным показателям лейкоцитов, эритроцитов и тромбоцитов между группами 1 и 2 ни до операции, ни в послеоперационном периоде.

Таблица 1

Основные гематологические параметры до и после моделирования дефекта кости у кроликов

Параметры и группы		Медиана [интерквартильный интервал]		
		Исходно ($n = 10$)	4 нед. ($n = 5$)	8 нед. ($n = 5$)
Лейкоциты (WBC), $\times 10^9/\text{л}$	Группа 1	11,4 [10,3; 12,4]	7,8 [7,5; 8,1]	9,4 [9,3; 9,7]
	Группа 2	10,4 [9,3; 10,6]	8,2 [7,8; 8,4]	8,5 [7,4; 9,6]
	p	0,109	0,095	0,413
Эритроциты (RBC), $\times 10^{12}/\text{л}$	Группа 1	5,72 [5,50; 6,10]	6,06 [5,76; 6,23]	5,82 [5,74; 5,84]
	Группа 2	6,08 [5,65; 6,23]	5,24 [5,19; 5,51]	5,56 [5,38; 5,97]
	p	0,193	0,056	0,286
Гемоглобин (HGB), (г/л)	Группа 1	130 [122; 135]	130 [126; 138]	130 [129; 130]
	Группа 2	135 [128; 139]	120 [117; 126]	125 [118; 132]
	p	0,193	0,151	0,556
Гематокрит (HCT), %	Группа 1	37,5 [35,8; 38,6]	39,0 [37,0; 39,8]	37,3 [37,0; 37,5]
	Группа 2	39,6 [36,7; 40,4]	35,9 [34,8; 38,1]	36,9 [35,1; 38,3]
	p	0,109	0,151	0,730
Тромбоциты (PLT), $\times 10^9/\text{л}$	Группа 1	211 [199; 243]	216 [202; 223]	239 [234; 244]
	Группа 2	212 [176; 231]	239 [217; 280]	235 [181; 290]
	p	0,669	0,413	0,730
Средний объем тромбоцита (MPV), фл	Группа 1	3,7 [3,4; 4,1]	4,1 [3,6; 4,2]	3,5 [3,4; 3,5]
	Группа 2	3,4 [3,3; 3,9]	3,8 [3,7; 3,9]	3,8 [3,3; 4,8]
	p	0,417	0,548	0,413
Относительная ширина распределения тромбоцитов по объёму PDW	Группа 1	19,0 [18,2; 19,9]	19,9 [19,3; 20,7]	17,7 [17,5; 18,3]
	Группа 2	18,4 [17,8; 19,0]	19,3 [18,4; 19,3]	18,4 [17,6; 19,0]
	p	0,270	0,310	0,730
Палочкоядерные нейтрофилы, $\times 10^9/\text{л}$	Группа 1	0,21 [0,11; 0,28]	0,22 [0,08; 0,24]	0,19 [0,19; 0,22]
	Группа 2	0,09 [0,00; 0,28]	0,11 [0,08; 0,17]	0,26 [0,17; 0,34]
	p	0,364	0,310	0,556
Сегментоядерные нейтрофилы, $\times 10^9/\text{л}$	Группа 1	3,30 [2,71; 4,72]	3,55 [2,35; 4,56]	2,88 [2,59; 3,35]
	Группа 2	2,88 [2,60; 4,49]	2,81 [2,77; 3,10]	2,85 [2,33; 3,56]
	p	0,475	0,690	0,905
Эозинофилы, $\times 10^9/\text{л}$	Группа 1	0,32 [0,14; 0,56]	0,13 [0,08; 0,21]	0,09 [0,07; 0,12]
	Группа 2	0,20 [0,12; 0,32]	0,25 [0,17; 0,31]	0,12 [0,08; 0,24]
	p	0,613	0,343	0,730
Базофилы, $\times 10^9/\text{л}$	Группа 1	0,0 [0,0; 0,0]	0,0 [0,0; 0,0]	0,0 [0,0; 0,0]
	Группа 2	0,0 [0,0; 0,1]	0,0 [0,0; 0,0]	0,0 [0,0; 0,0]
	p	0,161	0,690	0,556
Лимфоциты, (LYM), $\times 10^9/\text{л}$	Группа 1	7,21 [4,62; 7,78]	3,31 [2,64; 4,11]	5,95 [5,12; 6,91]
	Группа 2	6,90 [5,58; 7,06]	4,16 [3,90; 4,37]	5,05 [2,22; 5,46]
	p	0,475	0,343	0,286
Моноциты (MON), $\times 10^9/\text{л}$	Группа 1	0,33 [0,22; 0,79]	0,41 [0,30; 0,44]	0,28 [0,23; 0,29]
	Группа 2	0,31 [0,20; 0,36]	0,64 [0,46; 0,83]	0,24 [0,15; 0,32]
	p	0,315	0,151	0,730

При анализе уровня маркера воспаления С-реактивного белка на дооперационном этапе существенных различий между группами не обнаружили (рис. 2). Однако через четыре недели после операции у животных в группе 1 уровень СРБ был существенно выше, чем в группе 2, что могло быть связано

как с реакцией организма на введение имплантата, так и с техникой выполнения имплантации. Спустя восемь недель после операции различий в уровне маркера воспаления между группами не выявлено.

Концентрация маркера остеогенеза остеокальцина через четыре недели после операции была существенно выше в группе 2. Однако через восемь недель значительно более высокий уровень остеокальцина наблюдали в группе 1 (рис. 3). Полученные данные свидетельствуют об изменении динамики остеогенеза у животных, которым проводили имплантацию керамического аугмента в сравнении с животными контрольной группы.

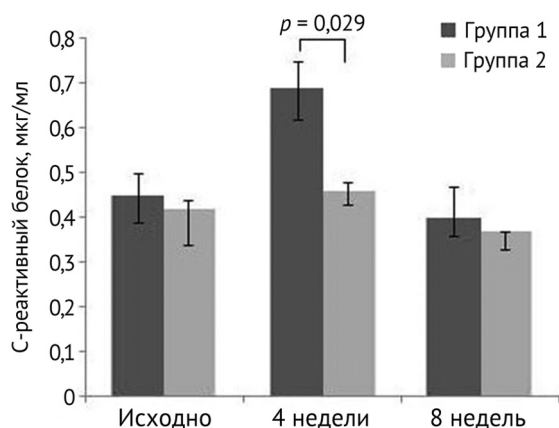


Рис. 2. Уровень С-реактивного белка до и после моделирования дефекта кости у кроликов, которым проводили имплантацию керамического материала (группа 1) и у кроликов без имплантации (группа 2). Результаты представлены как медиана и интерквартильный интервал

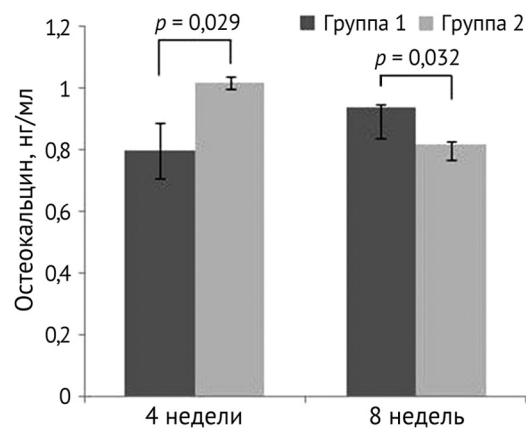


Рис. 3. Концентрация остеокальцина после моделирования дефекта кости у кроликов, которым проводили имплантацию керамического материала (группа 1) и у кроликов без имплантации (группа 2). Результаты представлены как медиана и интерквартильный интервал

Полученная PRP была охарактеризована с использованием таких параметров как концентрация тромбоцитов, лейкоцитов и эритроцитов (табл. 2). Относительное количество лейкоцитов не превышало 5–8 %, эритроцитов – 1 % от исходного уровня данных клеток в крови. Концентрация PDGF, одного из факторов роста, выделяемых при активации тромбоцитами, также не имела существенных различий между группами 1 и 2. Относительно исходного уровня в крови количество тромбоцитов в PRP было увеличено в четыре раза, средний объем тромбоцитов – в 1,4 раза (рис. 4).

Таблица 2

Показатели PRP, вводимой кроликам изучаемых групп

Показатели	Медиана [интерквартильный интервал]		
	Группа 1	Группа 2	<i>p</i>
Тромбоциты (PLT), ×10 ⁹ /л	846 [837; 1204]	808 [790; 1110]	0,310
Средний объем тромбоцита (MPV), фл	5,0 [5,0; 5,1]	4,8 [4,3; 5,0]	0,421
Лейкоциты (WBC), ×10 ⁹ /л	0,50 [0,40; 0,70]	0,70 [0,60; 0,90]	0,310
Эритроциты (RBC), ×10 ¹² /л	0,04 [0,03; 0,04]	0,04 [0,04; 0,05]	0,421
PDGF, нг/мл	1,89 [1,88; 2,18]	1,78 [1,75; 2,14]	0,364

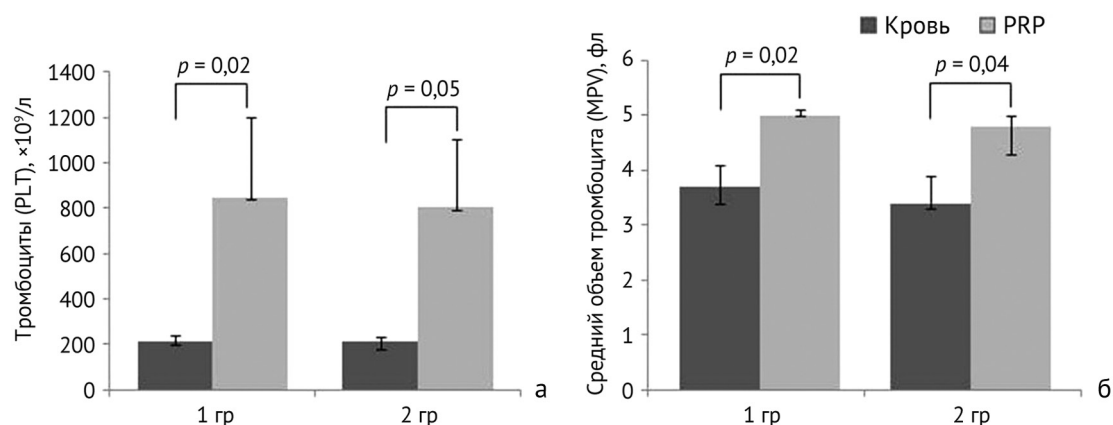


Рис. 4. Сравнение уровня тромбоцитов (а) и среднего объема тромбоцитов (б) в крови и полученной из нее PRP у кроликов исследованных групп. Результаты представлены как медиана и интерквартильный интервал

Для оценки влияния PRP на динамику остеогенеза при хирургическом моделировании костного дефекта в области дистального метафиза бедренной кости кроликов проведен сравнительный анализ гистологического строения тканей в области моделирования дефекта кости.

Гистологический анализ показал, что через четыре недели после операции у животных группы 2 (без имплантации) при моделировании дефекта без введения PRP в микропрепаратах встречались крупные фокусы фиброза (рис. 5, а), а также фокусы незавершенного вторичного остеогенеза (рис. 5, б). В случае применения PRP обнаруживали регенерирующие костные балки, что свидетельствовало о более эффективной регенерации при введении тромбоцитарного продукта (рис. 5, в).

В группе 1 (с имплантацией керамического материала) также наблюдали более активный репарационный процесс при введении в зону дефекта PRP, однако в отличие от группы 2 и вне зависимости от применения PRP в периимплантной зоне обнаруживали воспалительный процесс (рис. 5, г). Выявленное воспаление может быть связано как с реакцией на введение имплантата, так и с техникой выполнения имплантации.

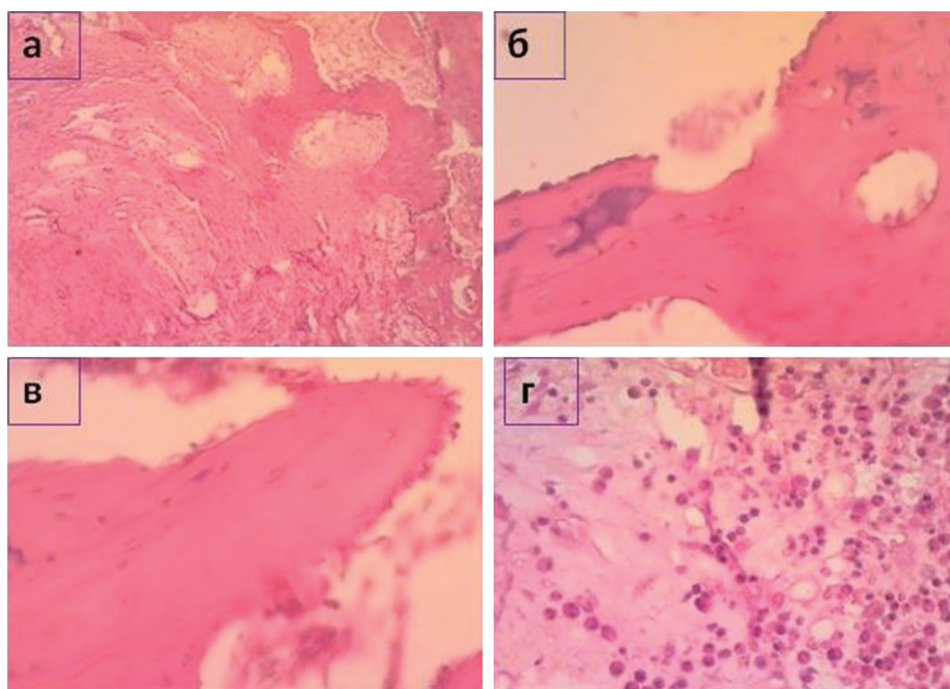


Рис. 5. Особенности гистологического строения тканей в области моделирования дефекта кости у кроликов через 4 недели после операции:
 а — крупный фокус фиброза, животные без имплантации, без PRP, ×40, Г-Э;
 б — мелкий очаг незавершенного вторичного остеогенеза, животные без имплантации, без PRP, ×100, Г-Э;
 в — регенерирующая костная балка, животные с имплантацией, с PRP, ×100, Г-Э;
 г — воспаление в зоне имплантата, животные с имплантацией, с PRP, ×100, Г-Э

Через восемь недель после операции без введения PRP в микропрепаратах костной ткани животных обеих групп сохранялись признаки незавершенной репаративной регенерации костной ткани в виде вторичного (энхондрального) остеогенеза и участков фиброза. Вместе с тем применение PRP способствовало более эффективной репаративной регенерации как в группе, где не проводили аугментацию костного дефекта, так и в группе, где применяли имплантат. В обеих группах выявлены регенерирующие костные балки. В таблице 3 приведены результаты сравнения в отношении применения PRP в группах 1 и 2.

Таблица 3

Сравнение в отношении применения PRP в группах

	Фокусы			
	1 группа		2 группа	
	PRP (-)	PRP (+)	PRP (-)	PRP (+)
Фиброз	множественные крупные	единичные мелкие	множественные мелкие, единичные крупные	единичные мелкие
Костно-хрящевая мозоль	множественные мелкие, единичные крупные	единичные мелкие	множественные мелкие, единичные крупные	единичные мелкие
Регенерирующие костные балки	единичные	множественные	не обнаружено	множественные
Воспалительная инфильтрация	присутствует	присутствует	отсутствует	отсутствует

Примечание: **Фиброз:** *единичные* — не более одного фокуса в трех полях зрения при ×40; *мелкие* — менее 1 поля зрения при ×100; *множественные* — два и более фокусов в трех полях зрения при ×40; *крупные* — более одного поля зрения при ×100. **Костно-хрящевая мозоль:** *единичные* — не более одного фокуса в трех полях зрения при ×40; *мелкие* — менее 1 поля зрения при ×200; *множественные* — два и более фокусов в трех полях зрения при ×40; *крупные* — более одного поля зрения при ×200. **Регенерирующие костные балки:** *единичные* — не более трех регенерирующих балок в образце, *множественные* — более трех регенерирующих балок в образце.

Таким образом, применение PRP увеличивало количество регенерирующих костных балок как в группе 1, так и в группе 2. Использование тромбоцитарного продукта приводило также к снижению количества и размера фокусов фиброза и костно-хрящевой мозоли в обеих группах. Наличие признаков воспаления в гистологических образцах, по-видимому, связано с реакцией организма на введение искусственного имплантата, не исключено также влияние техники выполнения имплантации. Вместе с тем необходимо отметить, что к восьмой послеоперационной неделе уровень биохимического маркера воспаления С-реактивного белка в группе животных, которым проводили имплантацию, не имел существенных различий с группой животных, которым имплантацию не проводили.

ОБСУЖДЕНИЕ

Стремление к поиску оптимальных стратегий лечения пациентов с костной травмой привело к изучению возможности использования PRP для ускорения заживления переломов [17], поскольку обогащенная тромбоцитами плазма является экономически эффективным аутологичным препаратом, содержащими широкий спектр факторов роста, цитокинов, молекул адгезии [18].

Введение PRP непосредственно в травмированный участок обеспечивает высокую концентрацию факторов роста непосредственно в месте повреждения, что способствует восстановлению тканей, уменьшению воспаления, ускорению регенеративного процесса [19]. Использование обогащенной тромбоцитами плазмы при хирургических процедурах может сочетаться с использованием костных трансплантатов, этот подход направлен на оптимизацию интеграции остеозамещающих материалов и повышение эффективности репаративной регенерации [19]. В настоящее время эффективность и безопасность PRP продемонстрирована в большом числе медицинских исследований [20]. Тем не менее, регенеративные эффекты PRP при использовании искусственных, в частности керамических, имплантатов до сих пор полностью не выяснены [21].

Известно, что эффективность использования PRP зависит от состояния здоровья донора [22]. Отражением общего состояния организма может служить клинический анализ крови. Наше исследование показало, что введение имплантатов из диоксида циркония включенным в исследование животным не оказывало существенного влияния на показатели эритроцитов, лейкоцитов и тромбоцитов в динамике послеоперационного периода.

Биокерамика на основе диоксида циркония, стабилизированного иттрием, кроме исключительных механических свойств демонстрирует также биосовместимость, не вызывает цитотоксических эффектов или аллергических реакций в окружающих тканях [23, 24]. В нашем исследовании при высокочувствительном анализе концентрации С-реактивного белка обнаружено, что введение кроликам имплантата повышало уровень данного маркера воспаления относительно животных, которым имплантацию не проводили. Однако, учитывая, что к концу срока наблюдения различий в уровне С-реактивного белка между группами выявлено не было, можно заключить, что данная реакция была связана не с физико-химическими свойствами керамического материала, а с ответом организма на введение имплантата и техникой выполнения хирургического вмешательства.

Ранее нами было показано, что темп пролиферации фибробластов человека в присутствии образцов биокерамики замедлен по сравнению с контролем на начальных этапах роста культуры клеток [25]. В настоящем исследовании для оценки остеогенеза мы использовали остеокальцин, высвобождающийся остеобластами в процессе остеосинтеза и используемый в качестве информативного маркера формирования кости [26]. Мы обнаружили, что введение имплантата несколько замедляет процесс остеогенеза в раннем периоде после операции, что можно объяснить процессами адаптации на введение искусственного остеозамещающего материала.

Полученная в настоящем исследовании PRP была охарактеризована с точки зрения клеточного состава, а также концентрации тромбоцитарного фактора роста, выделяемого при активации из альфа-гранул. Количество тромбоцитов является одним из основных параметров, рутинно оцениваемых при приготовлении PRP, поскольку считается, что он имеет связь с концентрацией биологически активных компонентов в тромбоцитарном продукте. Хотя в настоящее время не поддерживается четкая корреляция между количеством тромбоцитов в PRP и клиническим ответом [27], рекомендуемое количество тромбоцитов в PRP колеблется от 800×10^9 до 1200×10^9 /л [21, 28]. В нашей работе количество тромбоцитов в PRP в обеих группах соответствовало данным рекомендациям.

Недавние исследования показали, что средний объем тромбоцитов может быть полезным параметром, — более высокий уровень MPV указывает на более высокую концентрацию биологически активных молекул [29]. Мы обнаружили, что MPV в полученной нами PRP был существенно выше, чем MPV в цельной крови кроликов. Возможно, это связано с техникой приготовления плазмы. Данную особенность мы наблюдали в обеих группах исследованных животных.

Лейкоциты выполняют многочисленные биологические функции, которые, как правило, способствуют воспалению и инициируют его. Уровень лейкоцитов необходимо определять и упоминать при описании получения PRP [30]. Польза от включения лейкоцитов в PRP является спорной, однако высвобождение лейкоцитами полезных цитокинов считается положительным фактором, особенно в случаях, когда необходим первоначальный провоспалительный процесс [31]. В то же время присутствие эритроцитов в PRP считается нежелательным [32]. В нашем исследовании в PRP сохранялось небольшое количество лейкоцитов (4–7 % от исходного уровня), остаточное количество эритроцитов не превышало 1 % от их исходного содержания в крови.

Альфа-гранулы тромбоцитов при активации высвобождают множество факторов роста, включая тромбоцитарный фактор роста (PDGF), фактор роста эндотелия сосудов (VEGF), фактор роста фибробластов (FGF), эпидермальный фактор роста (EGF) и инсулиноподобные факторы роста (IGF-1 и IGF-2). Эти факторы управляют основными биологическими процессами, включая индукцию ангиогенеза, разрешение воспаления и регенерацию тканей [33]. Уровень ростовых факторов в PRP и, соответственно, её качество можно определять после процедуры замораживания–оттаивания [34]. Мы применили данный метод с последующим определением PDGF, — уровень тромбоцитарного фактора роста имел близкие значения в PRP изучаемых групп. В работе S. Pulcini et al. обнаружена прямая корреляция количества тромбоцитов с изоформой PDGF-AA, но не с изоформами -BB и -AB. Мы не выявили корреляцию между количеством тромбоцитов и PDGF [21]. Это можно объяснить тем, что мы проводили определение субъединицы А, которая присутствует и в изоформе PDGF-AA, и в изоформе PDGF-AB.

Применение PRP для улучшения регенерации костной ткани при восстановлении костного дефекта разнообразно. В частности, использование аутологичной PRP является простым и эффективным способом обеспечения остеоиндукции и улучшения регенерации кости при применении костного трансплантата и тканеинженерных реконструкций кости [35, 36].

Наше исследование было направлено на изучение того, усиливает ли обогащенная тромбоцитами плазма остеогенный потенциал керамических имплантатов из диоксида циркония при возмещении дефектов костной ткани. Гистологическую оценку эффективности использования PRP для коррекции остеогенеза при хирургическом моделировании костного дефекта в области дистального метафиза бедренной кости кроликов проводили через четыре и восемь недель после операции. Ранее D. Saginova et al. показали, что комплекс PRP-костный трансплантат улучшает восстановление костной ткани в костном дефекте на начальных этапах регенерации кости [37]. В. Октаş et al. также обнаружили, что применение PRP может играть роль в ускорении заживления переломов и уменьшении несращения на очень ранних сроках при восстановлении костных дефектов [38]. Наши данные согласуются с этими исследованиями, мы также показали, что через четыре недели после имплантации керамического материала более активный репаративный процесс наблюдается при введении в зону дефекта PRP. В более отдаленном периоде, спустя восемь недель после операции, мы обнаружили, что применение PRP не только увеличивает количество регенерирующих костных балок, но и снижает количество и размер фокусов фиброза и костно-хрящевой мозоли.

Известно, что концентраты тромбоцитов обладают способностью контролировать воспалительную среду благодаря своим противовоспалительным свойствам [39]. В нашем исследовании при анализе гистологических образцов, тем не менее, не обнаружено выраженного снижения воспалительной инфильтрации в периимплантной ткани в условиях введения PRP.

Обогащенная тромбоцитами плазма — полезный вспомогательный инструмент в контексте репаративной регенерации костной ткани, учитывая преимущества, которые включают в себя стимуляцию клеточных реакций, ускоренное восстановление тканей и потенциальную ускоренную реабилитацию. Вместе с тем для интеграции методов, использующих PRP, в доказательную медицинскую практику, необходимы дальнейшие тщательные клинические исследования, которые позволят углубить понимание места PRP в области регенеративной медицины и будут способствовать эффективному лечению пациентов с травмой и заболеваниями опорно-двигательного аппарата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение обогащенной тромбоцитами плазмы эффективно при возмещении дефектов костной ткани с использованием керамических имплантатов из диоксида циркония, допированного оксидом иттрия.

Конфликт интересов. Не заявлен.

Источник финансирования. Не заявлен.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Global status report on road safety 2018*. Geneva: World Health Organization; 2018.
2. Schade AT, Mbowuwa F, Chidothi P, et al. Epidemiology of fractures and their treatment in Malawi: Results of a multicentre prospective registry study to guide orthopaedic care planning. *PLoS One*. 2021;16(8):e0255052. doi: 10.1371/journal.pone.0255052.
3. Файн А.М., Ваза А.Ю., Гнетецкий С.Ф. и др. Доступные способы повышения регенераторного потенциала пластического материала в неотложной травматологии. Часть 1. Использование аутологичной богатой тромбоцитами плазмы крови. *Трансплантология*. 2022;14(1):79-97. doi: 10.23873/2074-0506-2022-14-1-79-97.
4. Parikh SN. Bone graft substitutes: past, present, future. *J Postgrad Med*. 2002;48(2):142-148.
5. Oryan A, Alidadi S, Moshiri A, Maffulli N. Bone regenerative medicine: classic options, novel strategies, and future directions. *J Orthop Surg Res*. 2014;9(1):18. doi: 10.1186/1749-799X-9-18.
6. Vaiani L, Boccaccio A, Uva AE, et al. Ceramic Materials for Biomedical Applications: An Overview on Properties and Fabrication Processes. *J Funct Biomater*. 2023;14(3):146. doi: 10.3390/jfb14030146.
7. Gahlert M, Roehling S, Sprecher CM, et al. *In vivo* performance of zirconia and titanium implants: a histomorphometric study in mini pig maxillae. *Clin Oral Implants Res*. 2012;23(3):281-286. doi: 10.1111/j.1600-0501.2011.02157.x.
8. Han JM, Hong G, Lin H, et al. Biomechanical and histological evaluation of the osseointegration capacity of two types of zirconia implant. *Int J Nanomedicine*. 2016;11:6507-6516. doi: 10.2147/IJN.S119519.
9. Кирилова И.А., Садовой М.А., Подорожная В.Т. Сравнительная характеристика материалов для костной пластики: состав и свойства. *Хирургия позвоночника*. 2012;(3):72-83. doi: 10.14531/ss2012.3.72-83.
10. Bin Shahri N, Chong AKS, Karjalainen T. The role of orthobiologics in bone healing and joint and tendon degeneration in the upper limb. *J Hand Surg Eur Vol*. 2025;50(6):728-737. doi: 10.1177/17531934251327034.
11. Khandan-Nasab N, Torkamanzadeh B, Abbasi B, et al. Application of Platelet-Rich Plasma-Based Scaffolds in Soft and Hard Tissue Regeneration. *Tissue Eng Part B Rev*. 2025. doi: 10.1089/ten.teb.2024.0285.
12. Mishra A, Tummala P, King A, et al. Buffered platelet-rich plasma enhances mesenchymal stem cell proliferation and chondrogenic differentiation. *Tissue Eng Part C Methods*. 2009;15(3):431-435. doi: 10.1089/ten.tec.2008.0534.
13. Becerra-Bayona SM, Solarte VA, Alviar Rueda JD, et al. Effect of biomolecules derived from human platelet-rich plasma on the ex vivo expansion of human adipose-derived mesenchymal stem cells for clinical applications. *Biologicals*. 2022;75:37-48. doi: 10.1016/j.biologicals.2021.11.001.
14. Teotia AK, Qayoom I, Kumar A. Endogenous Platelet-Rich Plasma Supplements/Augments Growth Factors Delivered via Porous Collagen-Nanohydroxyapatite Bone Substitute for Enhanced Bone Formation. *ACS Biomater Sci Eng*. 2019;5(1):56-69. doi: 10.1021/acsbomaterials.8b00227.
15. Lyu J, Ma T, Huang X, et al. Core decompression with β -tri-calcium phosphate grafts in combination with platelet-rich plasma for the treatment of avascular necrosis of femoral head. *BMC Musculoskelet Disord*. 2023;24(1):40. doi: 10.1186/s12891-022-06120-z.
16. 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.
17. Kale P, Shrivastava S, Balusani P, Pundkar A. Therapeutic Potential of Platelet-Rich Plasma in Fracture Healing: A Comprehensive Review. *Cureus*. 2024;16(6):e62271. doi: 10.7759/cureus.62271.
18. Zhang N, Wu YP, Qian SJ, et al. Research progress in the mechanism of effect of PRP in bone deficiency healing. *ScientificWorldJournal*. 2013;2013:134582. doi: 10.1155/2013/134582.
19. Bacevich BM, Smith RDJ, Reihl AM, et al. Advances with Platelet-Rich Plasma for Bone Healing. *Biologics*. 2024;18:29-1859. doi: 10.2147/BTT.S290341
20. Gupta S, Paliczak A, Delgado D. Evidence-based indications of platelet-rich plasma therapy. *Expert Rev Hematol*. 2021;14(1):97-108. doi: 10.1080/17474086.2021.1860002.
21. Pulcini S, Merolle L, Marraccini C, et al. Apheresis Platelet Rich-Plasma for Regenerative Medicine: An *In Vitro* Study on Osteogenic Potential. *Int J Mol Sci*. 2021;22(16):8764. doi: 10.3390/ijms22168764.
22. O'Donnell C, Migliore E, Grandi FC, et al. Platelet-Rich Plasma (PRP) From Older Males With Knee Osteoarthritis Depresses Chondrocyte Metabolism and Upregulates Inflammation. *J Orthop Res*. 2019;37(8):1760-1770. doi: 10.1002/jor.24322
23. Yin L, Nakanishi Y, Alao AR, et al. A review of engineered zirconia surfaces in biomedical applications. *Procedia CIRP*. 2017;65:284-290. doi: 10.1016/j.procir.2017.04.057
24. Ульянов Ю.А., Зарипова Э.М., Мингазова Э.Н. К вопросу о биосовместимости керамических имплантатов при оказании ортопедической помощи. *Менеджер здравоохранения*. 2023;(9):18-22. doi: 10.21045/1811-0185-2023-9-18-22.
25. Ulitko M, Antonets Y, Antropova I, et al. Ceramic materials based on lanthanum zirconate for the bone augmentation purposes: cytocompatibility in a cell culture model. *Chimica Technol Acta*. 2023;10(4):202310402. doi: 10.15826/chimtech.2023.10.4.02.
26. Дружинина Т.В., Хлусов И.А., Карлов А.В., Ростовцев А.В. Маркеры остеогенеза в периферической крови как патогенетические факторы и предикторы системных эффектов имплантатов для остеосинтеза. *Гений ортопедии*. 2007;4:83-88.
27. Laver L, Filardo G, Sanchez M, et al. ESSKA-ORBIT Group. The use of injectable orthobiologics for knee osteoarthritis: A European ESSKA-ORBIT consensus. Part 1 - Blood-derived products (platelet-rich plasma). *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2024;32(4):783-797. doi: 10.1002/ksa.12077.
28. Aprili G, Gandini G, Guaschino R, et al. SIMTI Working Group. SIMTI recommendations on blood components for non-transfusional use. *Blood Transfus*. 2013;11(4):611-622. doi: 10.2450/2013.0118-13
29. Ozer K, Kankaya Y, Çolak Ö. An important and overlooked parameter in platelet rich plasma preparation: The mean platelet volume. *J Cosmet Dermatol*. 2019;18(2):474-482. doi: 10.1111/jocd.12682.
30. Ragni E, Taiana MM, Çengic T, et al. PRP or not PRP: Is the debate surrounding platelets-based blood-derived products evolving? *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2025;33(5):1920-1924. doi: 10.1002/ksa.12655.
31. Tischer T, Bode G, Buhs M, et al. Platelet-rich plasma (PRP) as therapy for cartilage, tendon and muscle damage - German working group position statement. *J Exp Orthop*. 2020;7(1):64. doi: 10.1186/s40634-020-00282-2.
32. Zhou JY, Wong JH, Berman ZT, et al. Bleeding with iron deposition and vascular remodelling in subchondral cysts: A newly discovered feature unique to haemophilic arthropathy. *Haemophilia*. 2021;27(6):e730-e738. doi: 10.1111/hae.14417.
33. Kale P, Shrivastava S, Balusani P, Pundkar A. Therapeutic Potential of Platelet-Rich Plasma in Fracture Healing: A Comprehensive Review. *Cureus*. 2024;16(6):e62271. doi: 10.7759/cureus.62271.
34. Tang S, Wang L, Zhang Y, Zhang F. A Biomimetic Platelet-Rich Plasma-Based Interpenetrating Network Printable Hydrogel for Bone Regeneration. *Front Bioeng Biotechnol*. 2022;10:887454. doi: 10.3389/fbioe.2022.887454.
35. Корыткин А.А., Зыкин А.А., Захарова Д.В., Новикова Я.С. Применение обогащенной тромбоцитами плазмы при замещении очага аваскулярного некроза головки бедренной кости аллотрансплантатами. *Травматология и ортопедия России*. 2018;24(1):115-122. doi: 10.21823/2311-2905-2018-24-1-115-122
36. Guo Y, Yang Y, Peng B, Xing G. Repair of Vertebral Bone Defects with Injectable Calcium Phosphate Bone Cement Reinforced with Autologous Platelet-rich Plasma in Goats. *Tissue Eng Part C Methods*. 2025;31(6):211-220. doi: 10.1089/ten.tec.2025.0021.

37. Saginova D, Tashmetov E, Tuleubaev B, Kamyshanskiy Y. Effect of autologous platelet-rich plasma on new bone formation and viability of a Marburg bone graft. *Open Life Sci.* 2023;18(1):20220761. doi: 10.1515/biol-2022-0761.
38. Oktaş B, Çırpar M, Şanlı E, et al. The effect of the platelet-rich plasma on osteogenic potential of the periosteum in an animal bone defect model. *Jt Dis Relat Surg.* 2021;32(3):668-675. doi: 10.52312/jdrs.2021.199.
39. Salem M, Rizk A, Mosbah E, et al. Reinforcement of osteochondral defects repair with leukocyte platelet-rich fibrin and bone marrow-derived mononuclear cells in a rabbit model. *BMC Musculoskelet Disord.* 2025;26(1):707. doi: 10.1186/s12891-025-08952-x.

Статья поступила 19.11.2025; одобрена после рецензирования 19.01.2026; принята к публикации 09.02.2026.

The article was submitted 19.11.2025; approved after reviewing 19.01.2026; accepted for publication 09.02.2026.

Информация об авторах:

Ирина Петровна Антропова — доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, aip.hemolab@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9957-2505>;

Елена Александровна Волокитина — доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой, ведущий научный сотрудник, volokitina_elena@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5994-8558>;

Кирилл Андреевич Тимофеев — аспирант кафедры, врач — травматолог-ортопед, kirilltimofeev64166@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2208-7154>;

Роман Андреевич Труфаненко — ассистент кафедры, rtrufanenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9978-4807>;

Сергей Михайлович Кутепов — член-корр. РАН, профессор, доктор медицинских наук, руководитель института травматологии ЦНИЛ, kcm@usma.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3069-8150>;

Лариса Георгиевна Полушина — кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, polushina-larisa@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4921-7222>.

Information about the authors:

Irina P. Antropova — Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher, aip.hemolab@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9957-2505>;

Elena A. Volokitina — Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of Department, Leading Researcher, volokitina_elena@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5994-8558>;

Kirill A. Timofeev — Postgraduate Student, orthopaedic surgeon, kirilltimofeev64166@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2208-7154>;

Roman A. Trufanenko — Assistant Professor, rtrufanenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9978-4807>;

Sergey M. Kutepov — Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Medical Sciences, Head of the Institute of Traumatology at the Central Research Laboratory, kcm@usma.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3069-8150>;

Larisa G. Polushina — Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher, polushina-larisa@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4921-7222>.

Вклад авторов:

Антропова И.П. — поиск и анализ публикаций по теме статьи, интерпретация полученных данных, подготовка и написание текста статьи, редактирование текста статьи.

Волокитина Е.А. — идея и разработка концепции статьи, интерпретация полученного материала, окончательное редактирование текста статьи.

Тимофеев К.А. — выполнение эксперимента на животных, подготовка и написание текста статьи.

Труфаненко Р.А. — гистологический, морфометрический анализ экспериментального материала, подготовка и написание текста статьи.

Кутепов С.М. — поиск и анализ публикаций по теме обзора.

Полушина Л.Г. — выполнение эксперимента на животных, обработка и анализ экспериментальных данных.



Научная статья

УДК [616.71/.74-77:669.295]-092.9

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2026-32-2-225-236>

Биологическое тестирование *in vivo* титановых сплавов с добавлением редкоземельных элементов для оценки возможности их использования в медицинских изделиях

А.С. Анохин¹, Н.А. Кононович^{1,2}✉, А.Л. Шастов², Е.Н. Горбач², Е.А. Ермакова¹, А.А. Кирсанкин¹, М.С. Чувикина¹, А.С. Лукьянов¹, С.С. Стрельникова¹, И.В. Шипицына², Е.А. Киреева², Н.В. Тушина²

¹ Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова, Москва, Россия

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

Автор, ответственный за переписку: Наталья Андреевна Кононович, n.a.kononovich@mail.ru

Аннотация

Введение. Медицинские имплантируемые изделия для травматологии и ортопедии часто изготавливают из титана и его сплавов. Улучшить их физико-химические характеристики, в том числе замедлить процессы коррозии, можно путем добавления редкоземельных элементов.

Цель работы — на экспериментальной модели подкожной имплантации *in vivo* оценить безопасность новых материалов на основе сплава титана Ti6Al7Nb, легированного иттрием, лантаном и церием.

Материалы и методы. Крысам-самцам линии Вистар подкожно имплантировали образцы из титана и титановых сплавов: ВТ1-00 (контроль, $n = 10$); Ti6Al7Nb0,3Y (группа 1, $n = 12$); Ti6Al7Nb0,3La (группа 2, $n = 12$); Ti6Al7Nb0,3Ce (группа 3, $n = 12$). Срок эксперимента — 28 суток. Оценивали общее состояние, поведенческие реакции животных, визуально отмечали область имплантации. Регистрировали массу и общую температуру тела, локальную температуру в области имплантации. Проводили гематологический и биохимический анализ крови, анатомическим методом оценивали внутренние органы и состояние тканей вокруг имплантата.

Результаты. Во всех группах общее состояние, поведенческие реакции, масса тела, общая температура тела и локальная температура, а также ткани вокруг имплантатов патологически не изменялись, заживление кожной раны происходило первичным натяжением. Выявлено положительное влияние изучаемых редкоземельных элементов на репаративные процессы при заживлении кожной раны. В контрольной группе и группе 1 органы сохраняли нормальные размеры, цвет и анатомическую структуру. В группе 1 был незначительно повышен уровень эритроцитов и увеличена концентрация веществ низкой и средней молекулярной массы. В группах 2 и 3 выявляли изменения анатомических характеристик печени, почек и селезенки, в сыворотке крови повышалось АСТ и ЛДГ, снижался уровень С-реактивного белка, увеличивалась доля нейтрофилов, снижалось количество лимфоцитов. В группе 2 снижался уровень глюкозы, а в группе 3 повышались показатели глюкозы и мочевины.

Обсуждение. При подкожной имплантации в течение одного месяца иттрий (Y), лантан (La) и церий (Ce) по 0,3 % мас. % в сплавах титана состава Ti6Al7Nb не оказывали негативного влияния на общее состояние, процессы терморегуляции, сердечно-сосудистую систему и репродуктивные органы крыс-самцов. Сплав титана, легированный иттрием (Y), оказывал на организм токсическое действие компенсаторного характера. Сплавы титана, легированные лантаном (La) и церием (Ce), оказывали гепатотоксический и нефротоксический эффекты, нарушалась функция селезенки. Полученные результаты согласуются с известными литературными данными.

Заключение. В созданных условиях безопасными можно считать материалы с добавлением иттрия и контрольные образцы. Материалы с добавлением лантана и церия при имплантации в живой организм вызывают настороженность, в связи с чем требуется более продолжительное исследование с применением гистологических методов.

Ключевые слова: травматология и ортопедия, имплантат, сплав титана, коррозия, иттрий, лантан, церий, эксперимент *in vivo*, безопасность медицинских изделий

Для цитирования: Анохин А.С., Кононович Н.А., Шастов А.Л., Горбач Е.Н., Ермакова Е.А., Кирсанкин А.А., Чувикина М.С., Лукьянов А.С., Стрельникова С.С., Шипицына И.В., Киреева Е.А., Тушина Н.В. Биологическое тестирование *in vivo* титановых сплавов с добавлением редкоземельных элементов для оценки возможности их использования в медицинских изделиях. *Гений ортопедии*. 2026;32(2):225-236. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-2-225-236.

© Анохин А.С., Кононович Н.А., Шастов А.Л., Горбач Е.Н., Ермакова Е.А., Кирсанкин А.А., Чувикина М.С., Лукьянов А.С., Стрельникова С.С., Шипицына И.В., Киреева Е.А., Тушина Н.В., 2026



***In vivo* biological testing of titanium alloys with added rare earth elements to assess their possible use in medical products**

A.S. Anokhin¹, N.A. Kononovich^{1,2}✉, A.L. Shastov², E.N. Gorbach², E.A. Ermakova¹, A.A. Kirsankin¹, M.S. Chuvikina¹, A.S. Lukyanov¹, S.S. Strelnikova¹, I.V. Shipitsyna², E.A. Kireeva², N.V. Tushina²

¹ Baykov Institute of Metallurgy and Materials Science, Moscow, Russian Federation

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

Corresponding author: Natalia A. Kononovich, n.a.kononovich@mail.ru

Abstract

Introduction Medical implants for treating injuries and orthopedic diseases are often made of titanium and its alloys. Their physicochemical properties, including corrosion inhibition, can be improved by adding rare earth elements.

The **aim** of this study was to evaluate the safety of new materials based on the titanium alloy Ti6Al7Nb doped with yttrium, lanthanum, and cerium using an experimental *in vivo* subcutaneous implantation model.

Materials and Methods Male Wistar rats were subcutaneously implanted with titanium and titanium alloy samples: VT1-00 (control, $n = 10$); Ti6Al7Nb0.3Y (group 1, $n = 12$); Ti6Al7Nb0.3La (group 2, $n = 12$); Ti6Al7Nb0.3Ce (group 3, $n = 12$). The experiment lasted 28 days. The animals' general condition and behavioral responses were assessed, and the implantation area was visually marked. Body weight, body temperature, and local temperature at the implantation site were recorded. Hematological and biochemical blood tests were performed, and internal organs and peri-implant tissue condition were anatomically assessed.

Results In all groups, general condition, behavioral responses, body weight, body temperature, and peri-implant tissue temperature were normal, and skin wound healing occurred by primary intention. A positive effect of the rare earth elements studied was observed on reparative processes during skin wound healing. In the control group and group 1, organs retained normal size, color, and anatomical structure. In group 1, red blood cell counts were slightly elevated, along with increased concentrations of low- and medium-molecular-weight substances. In groups 2 and 3, changes in the anatomical characteristics of the liver, kidneys, and spleen were determined. Serum AST and LDH levels increased, C-reactive protein levels decreased, the proportion of neutrophils increased, and the lymphocyte count decreased. Glucose levels decreased in group 2, while glucose and urea levels increased in group 3.

Discussion Subcutaneous implantation of yttrium (Y), lanthanum (La), and cerium (Ce) at 0.3 % wt. each in titanium alloys of Ti6Al7Nb composition for one month had no negative impact on the general condition, thermoregulation, cardiovascular system, or reproductive organs of male rats. The titanium alloy doped with yttrium (Y) had a compensatory toxic effect on the body. Titanium alloys doped with lanthanum (La) and cerium (Ce) exhibited hepatotoxic and nephrotoxic effects and impaired spleen function. The results obtained are consistent with existing literature data.

Conclusion Under the conditions created, yttrium-doped materials and control samples can be considered safe. Materials doped with lanthanum and cerium raise concerns when implanted *in vivo*, requiring a longer-term study using histological methods.

Keywords: traumatology and orthopedics, implant, titanium alloy, corrosion, yttrium, lanthanum, cerium, *in vivo* experiment, medical product safety

For citation: Anokhin AS, Kononovich NA, Shastov AL, Gorbach EN, Ermakova EA, Kirsankin AA, Chuvikina MS, Lukyanov AS, Strelnikova SS, Shipitsyna IV, Kireeva EA, Tushina NV. *In vivo* biological testing of titanium alloys with added rare earth elements to assess their possible use in medical products. *Genij Ortopedii*. 2026;32(2):225-236. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-2-225-236.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что некоторые традиционные сплавы металлов, используемые для изготовления имплантируемых медицинских изделий, в том числе при аддитивном производстве, обладают рядом недостатков, которые в свою очередь могут оказать негативное влияние на результаты лечения, в том числе пациентов с заболеваниями костно-мышечной системы. Это, как правило, связано с физико-химическими свойствами самих материалов, модуль упругости которых (модуль Юнга) нередко значительно превышает модуль упругости костной ткани [1–3]. В таких условиях при длительных сроках имплантации происходит потеря костной массы на границе контакта поверхности имплантата с костью, вызывая нарушения стабильности фиксации, устранение которой требует повторного хирургического вмешательства. Ряд элементов, входящих в состав сплавов металлов, оказывает токсическое действие на окружающие ткани и организм в целом. Для предотвращения подобного рода воздействия материалы должны обладать повышенной коррозионной стойкостью [4–6].

В настоящее время проводят исследования по улучшению механических свойств, в частности титана и его сплавов, так как их наиболее часто используют при изготовлении медицинских изделий, в том числе предназначенных для травматологии и ортопедии [3, 7, 8]. Одним из способов улучшения механических свойств, износостойкости и устойчивости к процессам коррозии является легирование таких материалов редкоземельными элементами (РЗЭ), так как, например, добавление небольшого количества иттрия или церия (0,3 масс. %) снижает модуль упругости и улучшает пластичность. Скорость коррозии уменьшается при добавлении лантана, церия, иттрия или неодима. И если малые концентрации редкоземельных металлов часто изменяют характеристики сплавов в лучшую сторону, то повышенные весовые доли этих элементов могут отрицательно повлиять на пористость, предел прочности на разрыв, вязкость растяжения и другие свойства [9–11].

Современные материалы, используемые для изготовления медицинских изделий, помимо улучшенных механических характеристик должны обладать биосовместимыми, биоактивными и антибактериальными свойствами [12–16]. Некоторые металлы, включая редкоземельные, могут оказывать противомикробное действие, что расширяет возможности и обосновывает их использование при разработке новых медицинских сплавов [17–19].

Несмотря на широкие перспективы применения редкоземельных элементов с целью улучшения физико-химических и механических свойств сплавов, предназначенных для дальнейшего изготовления медицинских конструкций, их безопасность изучена недостаточно, что требует выполнения дополнительных комплексных исследований.

Цель работы — на экспериментальной модели подкожной имплантации *in vivo* оценить безопасность новых материалов на основе сплава титана Ti6Al7Nb, легированного иттрием, лантаном и церием.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использовали крыс-самцов линии Вистар в возрасте восьми месяцев, средняя масса тела которых составляла $(473,3 \pm 74,03)$ г. Всем животным в условиях операционной выполняли подкожную имплантацию тестовых образцов исследуемых материалов в области спины. Образцы имели цилиндрическую форму диаметром 10,0 мм и толщиной 1,0 мм. В образцах основных групп содержание редкоземельных элементов составляло 0,3 мас. %.

Выполнили четыре группы экспериментов (одна контрольная и три основных) *in vivo*:

- контрольная группа — образцы, изготовленные из титана BT1-00 ($n = 10$);
- основная группа 1 — образцы, изготовленные из Ti6Al7Nb0,3Y ($n = 12$);
- основная группа 2 — образцы, изготовленные из Ti6Al7Nb0,3La ($n = 12$);
- основная группа 3 — образцы, изготовленные из Ti6Al7Nb0,3Ce ($n = 12$).

Процедуру выполняли в условиях операционной под общим наркозом, адаптированным по весу (Рометар 2 % 1–2 мг/кг (Биовета, Чехия); Золетил 100 10–15 мг/кг (Virbac Sante Animale, Франция)). После оперативного вмешательства животных помещали в клетки по две особи. В качестве послеоперационной анальгезии использовали Анальгин (Биосинтез, ОАО, Россия) подкожно в дозе 30–50 мг/кг два раза в день в течение трех суток. На протяжении эксперимента в помещении вивария для содержания крыс поддерживали рекомендуемый температурный режим (24–26 °С). Животных содержали на стандартном сбалансированном рационе при свободном доступе к воде.

Для оценки безопасности тестируемых материалов прижизненными методами исследования у животных регистрировали массу тела (г), общую температуру тела (°С) и локальную температуру тела в области имплантации (°С) непосредственно перед началом эксперимента, через семь, 14, 21 и 28 суток после операции. В качестве нормы принимали значения, полученные перед выполнением оперативного вмешательства.

В эти же сроки у животных изучали внешний вид, поведенческие реакции, интенсивность и характер двигательной активности, состояние волосяного и кожного покровов, цвет слизистых оболочек. Выполняли визуальную оценку мягких тканей в области имплантации.

Исследования проводили в утренние часы перед первым кормлением. Через 28 суток эксперимента по шесть животных из каждой группы, выбранных случайным образом, подвергали эвтаназии с помощью декапитации с целью забора крови для гематологического и биохимического исследования. После этого осуществляли забор анатомических препаратов, а также аутопсию тел с извлечением внутренних органов. При выполнении доклинических исследований, особенно направленных на выявление токсического воздействия, измерение массы внутренних органов и подсчет их массовых коэффициентов относительно массы тела являются обязательными манипуляциями. Анализ данных показателей дает возможность обнаружения органа-мишени токсического агента. В связи с этим после извлечения внутренних органов выполняли их взвешивание и расчет массовых коэффициентов.

Визуально оценивали состояние тканей в области имплантата, а также расположение, цвет и форму внутренних органов в грудной и брюшной полостях. Оставшихся животных (по четыре особи в контрольной группе и по шесть в опытных группах) оставляли для проведения долгосрочного наблюдения.

Для гистологических исследований забирали фрагменты кожного покрова в области имплантации, фиксировали их в 10 % растворе нейтрального формалина и заливали в парафин. Гистологические срезы готовили с помощью санного микротомы (Reichard, Германия), затем окрашивали их гематоксилином и эозином. Цифровые изображения гистологических препаратов получали путем их сканирования с разрешением 40 в сканирующем микроскопе для лабораторных исследований PANNORAMIC Midi II BF (3DHISTECH Ltd., Венгрия). В программе PANNORAMIC Viewer, версия 2.4 (3DHISTECH Ltd., Венгрия) измеряли толщину эпидермиса и дермы, площадь и протяженность рубца. Численную плотность дериватов и сосудов в области рубца определяли в поле зрения изображения гистологического препарата при увеличении $\times 400$, а затем пропорционально пересчитывали на 1 мм^2 .

При гематологическом исследовании клеточный состав периферической крови определяли, используя стандартные методики подсчета клеток в камере Горяева. В периферической крови крыс определяли количество лейкоцитов, эритроцитов, тромбоцитов, относительное количество нейтрофилов, эозинофилов, моноцитов, лимфоцитов. Лейкоцитарную формулу подсчитывали в мазках крови, окрашенных по Романовскому – Гимзе, под иммерсией при увеличении $\times 100$.

В сыворотке крови экспериментальных животных определяли концентрацию общего белка, мочевины, креатинина, глюкозы, С-реактивного белка (СРБ), а также активность ферментов аминотрансфераз (АЛТ, АСТ) и лактатдегидрогеназы (ЛДГ). Биохимические исследования выполняли на автоматическом биохимическом анализаторе Hitachi/ВМ 902 (F. Hoffmann-La Roche Ltd., Италия), используя наборы реагентов фирм Витал Диагностикс, Вектор-Бест, БиоСистемс (Россия). Уровень эндогенной интоксикации оценивали по содержанию веществ низкой и средней молекулярной массы (ВНСММ) в сыворотке крови, среди последних рассчитывали процент катаболического пула (Кат. %), равный сумме продуктов распада, регистрируемых в диапазоне длин волн 238–258 нм. Содержание ВНСММ определяли по методу Малаховой [20].

Массу тела животных регистрировали с использованием весов электронных ТВ_А. Для взвешивания внутренних органов использовали весы электронные портативные POCKET SCALE MH-100 (100 г/0,01). Общую температуру тела измеряли при помощи электронного термометра DT-622, локальную температуру тела — с использованием инфракрасного тепловизора Uni-T Uti320e (рис. 1).

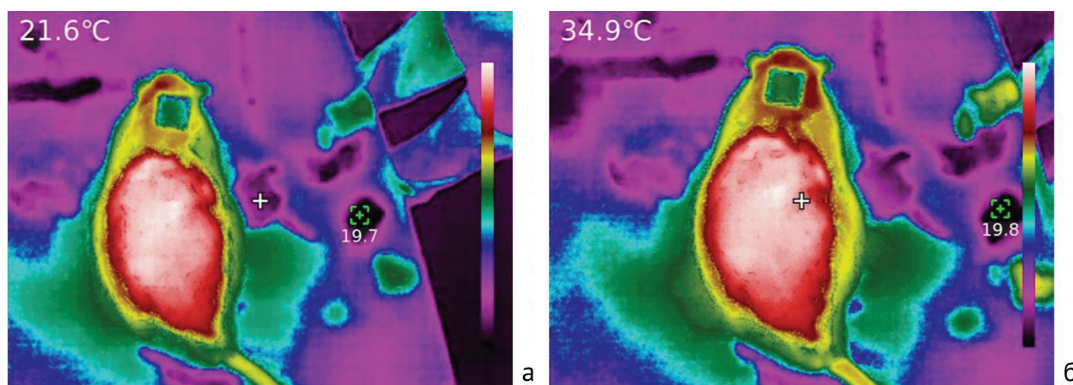


Рис. 1. Термограмма области спины экспериментального животного: а — непосредственно перед выполнением тепловизионного обследования; б — во время выполнения тепловизионного обследования (крестиком отмечена непосредственно область имплантации тестового образца, с которой выполняли съем данных, в левом верхнем углу — значение температуры покровных тканей области имплантации тестового образца)

Полученные количественные данные подвергали статистическому анализу. Статистический анализ проводили с использованием надстройки AtteStat версии 13.1 к электронным таблицам Excel (2016, 16.0.5278.1000). Методами описательной статистики определяли медиану и межквартильный размах (Me, Q1–Q3). Для сравнения динамики изменений внутри одной группы (зависимые выборки) использовали критерий Вилкоксона. Для сравнения показателей между основными группами и контролем (независимые выборки) применяли критерий Краскела – Уоллиса. Различия показателей считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

При содержании животных соблюдали требования ГОСТ Р 33044-2014 «Принципы надлежащей лабораторной практики», ГОСТ 33215-2014 «Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила оборудования помещений и организации процедур», ГОСТ 33216-2014 «Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила содержания и ухода за лабораторными грызунами и кроликами». При выполнении экспериментов соблюдали требования Европейской конвенции по защите позвоночных животных, используемых для экспериментов и других научных целей, и Директивы 2010/63/EU Европейского парламента и Совета Европейского союза от 22.09.2010 по охране животных, используемых в научных целях. На проведение исследования получено разрешение этического комитета ИМЕТ РАН (протокол от 15.02.2024 № 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ

На протяжении эксперимента общее состояние животных всех групп было удовлетворительным. Случаи гибели животных не зарегистрированы. Не обнаружено отклонений в потреблении корма и воды, а также осложнений инфекционного и неврологического характера. Состояние кожного и волосяного покровов, окраска слизистых оболочек не изменялись. Особенности поведения животных и их общее состояние соответствовали ожидаемой клинической картине. Во время покоя и при движении животные принимали естественное физиологическое положение.

Ни в одной группе в разные сроки эксперимента не выявлено достоверных изменений массы тела по отношению к исходным значениям.

Во всех группах, на всех сроках эксперимента регистрировали достоверное понижение общей температуры тела в сравнении с дооперационными значениями. Между группами значимых отличий не выявили.

Анализ динамики локальной температуры тела в области имплантации тестовых образцов показал, что через семь суток эксперимента в контрольной группе и группе 1 происходило достоверное понижение данного параметра в сравнении с исходными значениями на $1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($p = 0,0002$; $p = 0,01$ соответственно). В этот период в группе 2 локальная температура была значимо выше в сравнении с другими группами на $0,9\text{--}1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($p < 0,05$). В последующем данный параметр во всех группах был достоверно меньше исходных значений, но различий внутри каждой группы и между группами не выявили.

Динамика изменения массы тела, общей температуры тела и локальной температуры тканей в области имплантации тестовых образцов представлена в табл. 1.

Таблица 1

Изменение массы тела, общей и локальной температуры тела, Me (Q1–Q3)

Группы	Этапы эксперимента				
	0 суток (норма)	7 суток	14 суток	21 сутки	28 суток
Масса тела, г					
Контроль	412 (390–434)	404 (388–439)	393 (378–439)	394 (382–452)	398 (386–398)
1	440 (417–461)	435,5 (426–479)	440 (411–427)	429 (409–435,5)	424 (410–434)
2	523 (446–574)	528 (348–540)	542 (496–558)	560 (514–584)	556 (526–574)
3	552 (507–591)	565 (485–582)	564 (499–584)	577 (502–588)	560 (510–592)
Общая температура тела, $^{\circ}\text{C}$					
Контроль	37,3 (37,2–37,6)	36,35 (36,3–36,7)	36,65 (36,2–37)	36,5 (36,3–36,5)	36,2 (35,8–36,2)
1	37,1 (36,65–37,55)	36,35 (36,15–36,65)	36,4 (36,2–36,35)	36,3 (36,05–36,35)	36,5 (36,1–36,5)
2	37,7 (37,55–37,95)	36,65 (36,4–36,75)	36,5 (36,4–36,5)	36,65 (36,4–36,9)	36,8 (36,6–37)
3	37,2 (37,1–37,35)	36,6 (36,45–36,8)	36,5 (36,25–36,95)	36,6 (36,4–36,8)	36,7 (36,5–36,8)
Локальная температура тела, $^{\circ}\text{C}$					
Контроль	34,1 (34–34,3)	32,5 (32,1–32,9)	32 (31,2–32)	33 (32–33)	32,5 (31,8–32,5)
1	33,75 (33,05–34,2)	32,1 (31,35–33,1)	32,6 (32,15–32,4)	32,1 (31,65–32,1)	32,8 (32,1–32,8)
2	34,95 (34,05–35)	34,2* (33,55–34,85)	32,0 (31–32,8)	32,5 (32–33,8)	33,0 (32,2–33,2)
3	34,0 (33,8–34,2)	33,3 (32,3–34,1)	32,55 (32,05–33,3)	32,9 (31,95–33,1)	32,7 (31,55–33,45)

Примечания: **жирным шрифтом** отмечены показатели, статистически отличающиеся от дооперационных значений (срок 0 суток) при $p < 0,05$; * – различия показателя с контрольной, основной 1 и основной 3 группами при $p < 0,05$.

Послеоперационная рана в области имплантации тестовых образцов во всех экспериментальных группах заживала первичным натяжением. Гематом, абсцессов и других патологических изменений кожного покрова на разных этапах эксперимента не регистрировали. При анатомическом препарировании в области контакта тестовых образцов с прилегающими мягкими тканями ни в одном случае визуально локальных признаков воспаления не отмечено.

В контрольной группе (образцы BT1-00) заживление кожной раны после имплантации происходило первичным натяжением, под струпом. Через семь суток на поверхности кожной раны визуализировали «корочку» бурого цвета. Отечности окружающих тканей и геморрагий в прилегающих к ране неповрежденных тканях кожного покрова не наблюдали. Через 14 суток происходило полное или почти полное слущивание струпа. Наблюдали эпителизацию раневой поверхности. Через 21 сутки в области повреждения кожного покрова наблюдали нормотрофический линейный рубец с признаками ремоделирования. Определяли следы от швов. Через 28 суток наблюдений происходила еще большая перестройка рубцовой ткани в нормотрофическую. Рубец в области заживления имел линейную форму, визуализировался слабо. При препарировании кожного лоскута вокруг имплантируемого образца отмечали формирование достаточно плотной фиброзной капсулы (рис. 2, а). В тканях фиброзной капсулы не выявлено признаков выраженного отека, наличия геморрагий, изъязвления или некротизирования. Обнаружено незначительное утолщение и уплотнение подкожной и поверхностной мышечных фасций.

В группе 1 (образцы Ti6Al7Nb0,3Y) заживление происходило под струпом, однако в отличие от контрольной группы через 14 суток полной эпителизации раны не происходило, струп отходил частично. В этот период наблюдали незначительную отечность окружающих кожную рану тканей, выражавшуюся холмообразным выступанием тканей вокруг заживающей кожной раны над общей горизонтальной поверхностью кожи. Однако уже к 21-ым суткам формировался нитевидный линейный рубец, который к 28-ым суткам был практически незаметен (рис. 2, б). Окружающие его ткани снаружи визуальны изменены не были. Вокруг имплантата формировалась тонкая прозрачная соединительнотканная капсула (рис. 2, б). Реакции окружающих тканей на имплантат не наблюдали. Фасции были не утолщены, полупрозрачны, органотипичны.

Через семь суток эксперимента в группе 2 (образцы Ti6Al7Nb0,3La) поверхность кожной раны была по-

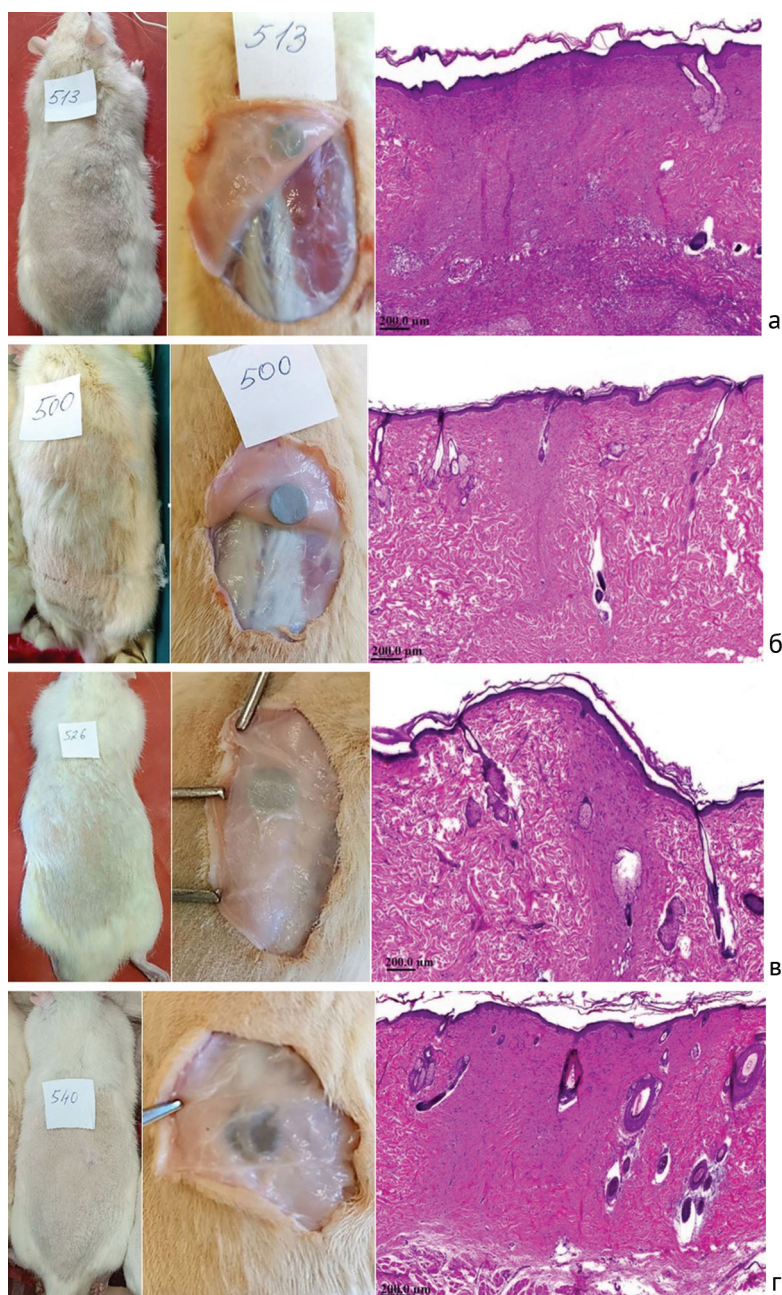


Рис. 2. Состояние тканей в области имплантации через 28 суток эксперимента: а — контрольная группа (BT1-00); б — группа 1 (Ti6AL7Nb0,3Y); в — группа 2 (Ti6AL7Nb0,3La); г — группа 3 (Ti6AL7Nb0,3Ce). Крайний левый столбец — внешний вид области имплантации, средний столбец — состояние тканей в перимплантационной области, крайний правый столбец — гистоструктурная организация кожного рубца, окраска гематоксилином и эозином, ув. — 50×

крыта на всем протяжении струпом буро-коричневого цвета. Отмечали губообразную припухлость краев кожной раны, которая сохранялась и к 14-ым суткам наблюдений. Изменения цвета прилегающих к ране участков кожного покрова не визуализировали. Выраженной локальной отечности не выявляли. Струп к 14-ым суткам не слущивался и покрывал всю поверхность раны. К 21-ым суткам происходила эпителизация раны, струп не определялся. О формировании тонкого эпителия в участке кожного повреждения свидетельствовала интенсивно-розовая окраска линейного рубца, сформировавшегося к данному периоду. По структуре рубец был гипотрофичным. Через 28 суток при наружном осмотре рубец визуализировался очень слабо. Вокруг подкожного имплантата формировалась полупрозрачная фиброзная ткань. Расположенная вокруг имплантата фасциальная ткань теряла прозрачность, была уплотнена и существенно утолщена, приобретала беловато-телесный цвет и незначительную матовость (рис. 2, в).

В группе 3 (образцы Ti6Al7Nb0,3Ce), как и в других группах, заживление раны происходило под струпом первичным натяжением. К седьмым суткам эксперимента края раны плотно смыкались, струп в отличие от других серий уже начинал слущиваться. Выделений из раны, как и в других группах, не наблюдали. К 14-ым суткам рана была уже в большей части эпителизована, хотя часть струпа оставалась несущенной. Ткани раны над поверхностью кожи не возвышались. Выраженной отечности, геморрагий или некротизации тканей не выявлено. Через 21 сутки формировался гипотрофичный рубец с губовидными выступлениями по краям раны. Через 28 суток рубец становился менее заметным, при этом его гипотрофичность сохранялась. Имплантируемый образец по периферии был погружен в плотную непрозрачную достаточно толстую фиброзную капсулу, которая становилась более тонкой, прозрачной и неоднородной в центральных участках над поверхностью имплантата. Окружающие его ткани были достаточно плотными, непрозрачными, телесно-беловатого цвета с жировыми включениями (рис. 1, г).

Гистологически в области кожной раны к 28-ым суткам эксперимента в основных и контрольной группах отмечали формирование кожного регенерата (рубца), снаружи покрытого полнослойным эпидермисом (рис. 2, крайний правый столбец). Отличия состояли в том, что в основных группах клетки шиповатого слоя располагались, как правило, в один ряд, тогда как в контроле — в два или даже три ряда. Это отражалось на толщине эпидермиса, толщина которого в группе 1 была достоверно меньше, чем в контрольной группе на 37,4 %, а в группах 2 и 3 — на 49,3 % и 47,3 %, соответственно (табл. 2). Дерма в контрольной группе (рис. 2, а, справа) и группе 3 (рис. 2, г, справа) была представлена преимущественно плотно упакованной волокнистой соединительной тканью (преимущественно фиброзной), волокна которой были разнонаправлены. В группе 3 наблюдали повышенную клеточность. В контрольной группе отмечали участки грануляций. Именно в этих группах показатели протяженности рубца были наибольшими по сравнению с группами 1 и 2, превышая их в среднем в три раза (табл. 2). При этом показатели площади рубца в контрольной группе были втрое выше, чем в группе 3, и в девять раз выше, чем в группах 1 и 2. Минимальное содержание рубцово-измененной ткани было характерно для основных групп 1 и 2. Толщина дермы у животных контрольной группы достоверно не отличалась от группы 1, а в группах 2 и 3 была достоверно ниже, чем в контрольной.

Таблица 2

Показатели гистологических параметров кожного регенерата в области повреждения на 28-ые сутки после имплантации материала, Me (Q1–Q3)

Параметры	Группы эксперимента			
	Контроль	Группа 1	Группа 2	Группа 3
Толщина эпидермиса h, мкм	98,8 (96,7–101,4)	62,1 (61,3–70,4)	50,1 (47,1–52,6)	52,1 (47–54,7)
Толщина дермы h, мкм	1870,6 (1856,6–1868,3)	1876,8 (1758,3–1876,8)	1272,95 (1171,5–1345,1)	1553,45 (1505,1–1555,7)
Протяженность рубца L, мкм	1789 (1776–1801)	558,1 (501,3–600,9)	549 (538,6–593,3)	1431,5 (1228,1–1626,5)
Площадь рубца S, мм ²	5,4 (4,9–5,6)	0,553 (0,531–0,584)	0,631 (0,579–0,649)	1,8 (1,6–1,9)
Численная плотность дериватов NAder, ед/мм ²	4,75 (4,1–6,2)	7,2 (4,3–9,1)	7,4 (5,8–8,3)	15,6 (16,4–17,03)
Численная плотность сосудов NASos, ед/мм ²	59,02 (29,51–59,02)	59,03 (44,26–73,7)	59,02 (29,52–59,01)	59 (29,63–59,6)

Примечания: **жирным шрифтом** отмечены показатели, статистически значимо отличающиеся от значений животных группы контроля (при $p < 0,05$).

В кожных регенератах контрольной группы отмечали наличие немногочисленных волосяных фолликулов и салльных желез. В регенератах животных опытных групп их количество было существенно выше: в группах 1 и 2 — на 51,6 % и 55,8 %, в группе 3 — в 2,28 раза. Численная плотность сосудов в кожных регенератах всех анализируемых групп была практически одинаковой.

Во всех группах, включая контрольную, на 28-ые сутки эксперимента наблюдали низкие значения лейкоцитов в сравнении с физиологической нормой для животных. В группе 1 количество эритроцитов значительно отличалось в сторону увеличения от результатов, полученных в контроле. Количество тромбоцитов в опытных и контрольной группах было в пределах нормальных значений (табл. 3). Профиль крови был лимфоцитарный. Показатели лейкограммы в контрольной группе варьировали в пределах нормальных значений. В лейкоформулах групп 2 и 3 количество лимфоцитов и нейтрофилов достоверно отличалось от значений контрольной группы (табл. 3).

Результаты биохимического исследования сыворотки крови (табл. 4) показали, что через 28 суток после имплантации уровень продуктов эндогенной интоксикации (ВНСММ) у крыс группы 1 был статистически значимо ($p = 0,05$) повышен относительно животных группы контроля. Уровень продуктов катаболизма у животных основных групп не отличался от контроля. В группах 2 и 3 уровень СРБ относительно контроля был достоверно ниже ($p = 0,03$; $p = 0,04$). Это свидетельствует о том, что острый ответ на имплантацию данных материалов был ниже контрольного материала. Достоверное изменение маркеров повреждения печени (АСТ и ЛДГ) было зафиксировано у крыс группы 2 ($p = 0,05$) и группы 3 ($p = 0,03$) относительно контроля. При этом более существенное увеличение активности данных ферментов отмечено у крыс группы 3. У животных этой группы отмечено и статистически значимое ($p = 0,02$) увеличение уровня мочевины в крови, как признак нефротоксического эффекта. К этому сроку у животных группы 2 отмечено достоверное снижение уровня глюкозы в крови ($p = 0,05$) относительно животных контрольной группы.

Таблица 3

Гематологические показатели крови экспериментальных животных на 28-ые сутки после имплантации материала, Ме (Q1–Q3)

Показатель	Референсный интервал	Контроль	1 группа	2 группа	3 группа
Эритроциты, $10^{12}/л$	5,5–11,0	6,6 (6,4–6,8)	7,4 (6,9–7,6)	5,7 (5,5–6,5)	7,0 (6,4–7,5)
Лейкоциты, $10^9/л$	8,0–23,0	5,0 (4,7–5,4)	5,2 (4,5–6,2)	5,4 (5,0–5,5)	5,7 (5,0–6,0)
Тромбоциты, $10^9/л$	200–600	430,0 (420,1–490,0)	425,5 (412,5–447,5)	475,5 (425,0–550,0)	475,0 (369,0–675,0)
NEU, %	20–35	29 (28–30)	34 (29–38)	44 (42–45)	44 (34–50)
LYM, %	55–75	65 (64–68)	57 (52–65)	50 (48–52)	49 (44–55)
MON, %	1–5	5 (4–6)	6 (4–6)	3 (3–5)	4 (3–6)
EOS, %	1–5	1 (1–4)	3,5 (2–4,5)	3 (2–3)	3 (3–4)
BAS, %	0–1	0 (0–0)	0,5 (0–0,5)	0 (0–0)	0 (0–0,5)

Примечание: **жирным шрифтом** отмечены показатели, статистически значимо отличающиеся от значений животных группы контроля (при $p < 0,05$), NEU — нейтрофилы, LYM — лимфоциты, MON — моноциты, EOS — эозинофилы, BAS — базофилы.

Таблица 4

Биохимические показатели сыворотки крови экспериментальных животных на 28-ые сутки после имплантации материала, Ме (Q1–Q3)

Показатель	Контроль	Группа 1	Группа 2	Группа 3
Общий белок, г/л	67 (64–68)	67 (65–68)	64 (64–68)	67 (62–67)
СРБ, мкг/л	7,3 (6,2–8,3)	6,7 (5,0–7,9)	2,0 (1,9–3,9)	3,5 (2,7–4,3)
АЛТ, Е/л	67 (58–71)	69 (59–85)	87 (70–91)	85 (70–105)
АСТ, Е/л	121 (117–149)	142 (130–155)	160 (153–195)	158 (155–180)
ЛДГ, Е/л	1061 (987–1645)	1547 (1418–2002)	2371 (2230–3045)	2974 (2485–3333)
Мочевина, ммоль/л	4,8 (4,6–5,1)	4,9 (4,8–5,1)	4,9 (4,8–5,6)	6,8 (6,6–7,1)
Креатинин, мкмоль/л	56 (53–56)	60 (56–61)	49 (48–55)	51 (50–54)
Глюкоза, ммоль/л	21,6 (19,6–23,0)	21,7 (18,9–24,3)	16,7 (16,6–16,9)	22,5 (21,2–23,7)
ВНСММ, ед.оп.пл.	7,44 (6,94–7,60)	8,48 (7,95–11,18)	8,22 (7,70–8,27)	7,60 (7,45–8,28)
Кат. %	16,6 (16,4–18,9)	20,6 (15,6–26,2)	15,7 (15,2–16,4)	16,7 (15,7–17,1)

Примечание: **жирным шрифтом** отмечены показатели, статистически значимо отличающиеся от значений животных группы контроля (при $p < 0,05$).

При аутопсии тел животных во всех наблюдениях пространственное расположение внутренних органов было анатомически правильным. Не выявили достоверной разницы между группами массы сердца и семенников, а также их цвета и формы. В группе 1 масса и анатомические характеристики печени, селезенки и почек не отличались от контроля. Макроскопически в группах 2 и 3 наблюдали изменения печени, что характеризовалось сглаженностью краев, более насыщенным бурым цветом. У трех из шести эвтаназированных в этот период животных группы 2 и у четырех из шести животных группы 3 имелась гепатомегалия. В этих группах визуально определяли изменения почек, — отсутствовала их типичная бобовидная форма (была ближе к овальной), отмечали более водянистую структуру, масса

была достоверно больше чем в контроле ($p = 0,02$). Также определяли значимые отличия массы селезенки ($p = 0,01$) в сравнении с аналогичным параметром данного органа контрольной группы. В некоторых случаях визуально при сохранении анатомии краев в центре органа определяли отек. Значения массы основных внутренних органов представлены в табл. 5.

Таблица 5

Масса основных внутренних органов, Me (Q1–Q3)

Группа	Органы (гр / % от общей массы тела)				
	Сердце	Печень	Селезенка	Почки	Семенники
Контроль	1,75 / 0,45 (1,69–1,79 / 0,42–0,48)	18,86 / 3,76 (17,68–20,83 / 3,44–4,35)	1,03 / 0,26 (0,99–1,09 / 0,25–0,28)	2,45 / 0,66 (2,26–2,56 / 0,61–0,67)	2,59 / 0,66 (2,54–2,71 / 0,64–0,74)
Группа 1	1,95 / 0,46 (1,9–1,97 / 0,43–0,47)	19,21 / 4,21 (17,77–25,88 / 3,67–5,5)	1,23 / 0,28 (1,08–1,33 / 0,24–0,32)	2,53 / 0,61 (2,32–2,88 / 0,57–0,65)	2,74 / 0,63 (2,54–2,93 / 0,59–0,68)
Группа 2	2,36 / 0,45 (1,94–2,16 / 0,41–0,43)	22,73 / 4,32 (18,17–21,27 / 4,17–4,25)	1,55 / 0,33 (1,36–1,5 / 0,29–0,31)	2,68 / 0,55 (2,45–3,24 / 0,52–0,57)	3,31 / 0,66 (2,89–3,54 / 0,58–0,7)
Группа 3	2,49 / 0,45 (2,22–2,56 / 0,43–0,49)	23,27 / 4,04 (17,02–20,81 / 3,98–4,03)	1,68 / 0,32 (1,48–1,86 / 0,29–0,35)	2,99 / 0,55 (2,57–3,47 / 0,51–0,61)	3,19 / 0,6 (3,11–3,5 / 0,57–0,66)

Примечание: **жирным шрифтом** отмечены показатели, статистически значимо отличающиеся от значений животных группы контроля (при $p < 0,05$).

ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время ведутся активные работы по улучшению физико-химических свойств металлов, предназначенных, в частности, для изготовления медицинских имплантируемых ортопедических конструкций [16, 21, 22]. Для обеспечения их безопасности и эффективности требуется выполнение исследований *in vitro*, в том числе механических испытаний для оценки коррозионной устойчивости, износостойкости, упругости и других характеристик. Важным этапом является тестирование новых сплавов в системах *in vivo* с использованием прижизненных и посмертных методов исследования. Это позволяет определить биологическую совместимость с окружающими тканями, оценить иммунный ответ, цитотоксичность и другие возможные реакции живого организма как ответ на взаимодействие с новыми материалами.

Основной целью выполненного исследования *in vivo* являлось изучение безопасности новых материалов на основе сплава титана, легированного редкоземельными элементами, такими как иттрий, лантан и церий. В составе сплава титана Ti6Al7Nb содержание какого-либо из них составляло 0,3 мас. %. В качестве тест-системы использовали половозрелых клинически здоровых белых лабораторных крыс-самцов линии Вистар, которым выполняли подкожную имплантацию тестовых образцов. За животными наблюдали в течение 28 суток.

На протяжении всего эксперимента ни в одной из групп не выявлено нарушений процессов терморегуляции в организме опытных животных, о чем свидетельствовало отсутствие резких значимых колебаний общей и локальной температуры тела в контрольной и основных группах при одинаковых условиях содержания животных. Также не изменялась интенсивность приема корма и воды. Сохранялись двигательные и поведенческие реакции. Не зарегистрировано случаев гибели животных.

Во всех группах заживление кожной раны в области имплантации происходило по первичному натяжению, под струпом. Более раннее формирование кожного рубца наблюдали у животных группы 3, которым имплантировали образцы легированные церием. В этих наблюдениях уже к седьмым суткам эксперимента выявляли слушивание струпа, тогда как в других группах в этот период струп покрывал всю поверхность раны. Гистологически выявлено трехкратное уменьшение рубцовой ткани по сравнению с контролем в области кожной раны к 28-ым суткам эксперимента, что свидетельствует о влиянии церия на ускорение органотипической перестройки тканей рубца. Выявлено положительное влияние церия на формирование дериватов кожи в области повреждения. Некоторые авторы в экспериментах *in vivo* на крысах-самцах линии Вистар при топическом нанесении на кожную рану наночастиц оксида церия в составе водорастворимого гидрогеля получили похожие результаты. В этих исследованиях полное заживление раны с формированием достаточно прочного рубцового соединения с благоприятным косметическим эффектом определяли уже к шестым суткам эксперимента [23]. По другим данным, воздействие нанодисперсным диоксидом церия активировало краевую эпителизацию экспериментальной ожоговой раны у крыс [24]. Возможно, такого рода эффект связан с тем, что наночастицы церия могут действовать как прямые антиоксиданты, ограничивая количество активных форм кислорода, необходимых для гибели клеток, в частности, нервных [25].

В некоторых исследованиях показано, что длительное пероральное введение нитрата церия не оказывает токсического действия на репродуктивную функцию у лабораторных крыс женского пола. При этом у маточного поголовья не изменялись поведенческие реакции, не менялась масса тела жи-

вотных и масса матки [26]. В выполненных исследованиях на крысах-самцах в группе 3 (образцы с церием) через 28 суток опыта мы также не наблюдали изменения поведенческих реакций, значимо не менялась масса тела и массовый коэффициент семенников по отношению к контролю.

В выполненном исследовании гематологические и биохимические показатели в контрольной группе (ВТ6) и опытной группе 1 (образцы с иттрием) были наиболее близки к норме. В группе 1 наблюдали статистически значимое (но клинически незначимое) повышение уровня эритроцитов, а также увеличение концентрации веществ низкой и средней молекулярной массы. Данные анализа крови полностью согласуются с результатами анатомического исследования. У животных этих групп не выявлено гепатомегалии, изменений в почках или селезенке. Органы сохраняли нормальные размеры, цвет и структуру. Это свидетельствует о том, что сплав, легированный иттрием, оказывает токсическое действие, которое организм способен компенсировать.

При подкожной имплантации опытных образцов из титанового сплава, легированных лантаном (группа 2) и церием (группа 3), выявили признаки токсического воздействия на печень, почки и селезенку. В этих группах в большинстве наблюдений гепатотоксический эффект проявлялся гепатомегалией, изменением цвета и формы печени, а также резким повышением АСТ и ЛДГ в сыворотке крови (особенно в группе 3). В группе 2 снижение уровня глюкозы также могло быть следствием нарушения метаболизма печени, что в совокупности с вышеуказанными признаками свидетельствовало о еще более выраженном гепатотоксическом эффекте, чем в группе 3.

Нефротоксические проявления у животных групп 2 и 3 характеризовались изменением анатомической формы и структуры почек, что отражалось на массе данных органов, которая увеличивалась в сравнении с контрольной группой, когда имплантировали сплав титана ВТ1. По всей видимости, негативное влияние на почки было сильнее проявлено в группе 3, так как у этих животных отмечали статистически значимое повышение глюкозы и уровня мочевины в крови, — ключевого маркера нарушения азотовыделительной функции почек. Как отмечено выше, при аутопсии это подтвердилось помимо изменения формы и структуры данных органов еще и значимым увеличением их массы в сравнении с другими группами.

Токсическое воздействие на селезенку у животных 2 и 3 групп характеризовалось значимым увеличением массы и массового коэффициента этого органа в сочетании с таким признаком, как ее отечность.

В группах 2 и 3 по сравнению с контролем снижение уровня С-реактивного белка можно объяснить общим угнетением иммунной системы или специфическим влиянием ионов лантана и церия на синтез белков острой фазы воспаления, что не отменяет наличия токсического повреждения. В этих группах были зафиксированы значительные изменения в лейкоцитарной формуле: достоверное увеличение доли нейтрофилов и снижение лимфоцитов. Такой сдвиг характерен для хронического воспалительного процесса или токсического стресса, что указывает на системный ответ организма на имплантированный материал. Признаки токсического хронического воспаления в почках, поджелудочной железе и семенниках у белых беспородных крыс-самцов, возникшие на фоне ингаляционного введения вещества, содержащего в частности лантан, были определены другими авторами [27]. В литературе также есть сведения о токсичном воздействии лантана на функцию печени, почек, селезенки, отмечены негативные эффекты на иммунную систему и кости [28].

Очевидно, что имплантация опытных образцов, легированных иттрием (группа 1), также вызывала определенный незначительный токсический эффект, характеризующийся повышением уровня продуктов эндогенной интоксикации. Однако этот эффект можно считать компенсированным, так как он не проявлялся в нарушениях функции висцеральных органов.

Подкожная имплантация сплавов с содержанием лантана и иттрия выявила их существенное влияние на перестройку рубцово-измененной ткани в сторону органотипического восстановления, при этом содержание в составе имплантируемого изделия иттрия способствовало формированию рубца нормотрофического типа, а лантана — гипотрофического.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов выполненного исследования показал, что в течение одного месяца после имплантации в живой организм:

- сплавы титана состава Ti6Al7Nb, легированные иттрием, лантаном или церием 0,3 масс. %, не оказывают заметного негативного влияния на сердечно-сосудистую систему и репродуктивные органы, не нарушают процессы терморегуляции, способствуют репаративным процессам в кожной ране;
- сплавы титана состава Ti6Al7Nb, легированные иттрием 0,3 масс. %, способствуют проявлению признаков эндогенной интоксикации, не приводя при этом к органным повреждениям;

- сплавы титана состава Ti6Al7Nb, легированные лантаном 0,3 масс. %, оказывают выраженный гепатотоксический эффект, нефротоксический эффект, нарушают функцию селезенки;
- сплавы титана состава Ti6Al7Nb, легированные церием 0,3 масс. %, оказывают выраженный нефротоксический эффект, гепатотоксический эффект, нарушают функцию селезенки.

Полученные результаты следует учитывать при разработке новых материалов, предназначенных для изготовления изделий медицинского назначения.

Конфликт интересов. Не заявлен.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда, проект № 24-43-02066, <https://rscf.ru/project/24-43-02066/>.

Этическая экспертиза. На проведение исследования получено разрешение этического комитета ИМЕТ РАН (протокол от 15.02.2024 № 1).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Liu S, Shin YC. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. *Materials & Design*. 2019;164:107552. doi: 10.1016/j.matdes.2018.107552.
2. Posiyano K, Prasad RVS, Dzogbewu TC, et al. The potential of Ti-6Al-7Nb, and design for manufacturing considerations in mitigating failure of hip implants in service. *Biomedical Engineering Advances*. 2024;8:100136. doi: 10.1016/j.bea.2024.100136.
3. Gao Y, Jiang W, Zeng D, et al. Additive manufacturing of titanium alloys for biomedical applications: A systematic review. *Review of Materials Research*. 2025;1(1):100011. doi: 10.1016/j.revmat.2025.100011.
4. Pesode P, Barve S. A review – metastable β titanium alloy for biomedical applications. *J Eng Appl Sci*. 2023;70(1):25. doi: 10.1186/s44147-023-00196-7.
5. Hazwani MR, Lim LX, Lockman Z, Zuhailawati H. Fabrication of titanium-based alloys with bioactive surface oxide layer as biomedical implants: Opportunity and challenges. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2022;32(1):1-44. doi: 10.1016/S1003-6326(21)65776-X.
6. Zaffe D, Bertoldi C, Consolo U. Accumulation of aluminium in lamellar bone after implantation of titanium plates, Ti-6Al-4V screws, hydroxyapatite granules. *Biomaterials*. 2004;25(17):3837-3844. doi: 10.1016/j.biomaterials.2003.10.020.
7. Garg D, Wagh NP, Shinde MB, et al. A comparative study between functional outcomes of proximal humerus fracture treated using closed reduction and JESS external stabilization system and open reduction and internal fixation with PHILOS plate at a tertiary health care center. *Genij Ortopedii*. 2025;31(5):558-566. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-5-558-566.
8. Абдуллоев А.М., Гвоздев Н.С., Тропин Д.В., Попков Д.А. Результаты реконструктивной хирургии конечностей с использованием телескопического титанового стержня. *Гений ортопедии*. 2025;31(1):51-59. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-51-59.
9. Peng Xu, Florian Pyczak, Ming Yan, Fantao Kong, Thomas Ebel. Impacts of yttrium on microstructure and tensile properties of biomedical β Ti-Nb-Zr fabricated by metal injection molding. *Mater Sci Eng A*. 2020;792:139816. doi: 10.1016/j.msea.2020.139816.
10. Won JW, Oh JM, Kim WC, et al. Simultaneous high tensile strength and high ductility in cast Ce-alloyed Ti. *Mater Sci Eng A*. 2024;918:147487. doi: 10.1016/j.msea.2024.147487.
11. Willbold E, Gu X, Albert D, et al. Effect of the addition of low rare earth elements (lanthanum, neodymium, cerium) on the biodegradation and biocompatibility of magnesium. *Acta Biomater*. 2015;11:554-562. doi: 10.1016/j.actbio.2014.09.041.
12. 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.
13. Baldin EK, de Castro VV, Santos PB, et al. Copper incorporation by low-energy ion implantation in PEO-coated additively manufactured Ti6Al4V ELI: surface microstructure, cytotoxicity and antibacterial behavior. *J Alloy Compd*. 2023;940:168735. doi: 10.1016/j.jallcom.2023.168735.
14. Quinn J, McFadden R, Chan CW, Carson L. Titanium for Orthopedic Applications: An Overview of Surface Modification to Improve Biocompatibility and Prevent Bacterial Biofilm Formation. *iScience*. 2020;23(11):101745. doi: 10.1016/j.isci.2020.101745.
15. Попков 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.
16. Stich T, Alagboso F, Krenek T, et al. Implant-bone-interface: Reviewing the impact of titanium surface modifications on osteogenic processes *in vitro* and *in vivo*. *Bioeng Transl Med*. 2021;7(1):e10239. doi: 10.1002/btm2.10239.
17. Sun Y, Xu W, Jiang C, et al. Gold nanoparticle decoration potentiates the antibacterial enhancement of TiO₂ nanotubes via sonodynamic therapy against peri-implant infections. *Front Bioeng Biotechnol*. 2022;10:1074083. doi: 10.3389/fbioe.2022.1074083.
18. Li J, Liu XM, Tan L, et al. Zinc-doped Prussian blue enhances photothermal clearance of Staphylococcus aureus and promotes tissue repair in infected wounds. *Nat Commun*. 2019;10(1):4490. doi: 10.1038/s41467-019-12429-6.
19. Chen YH, Guan SW, Xing M, et al. Ce-doped defective titanium oxide coating with antibacterial, antioxidant and anti-inflammatory properties for potential application of peri-implantitis treatment. *Rare Metals*. 2025;44(1):472-488. doi: 10.1007/s12598-024-02935-y.
20. Данилова Л.А. *Справочник по лабораторным методам исследования*. СПб.: Питер. 2003:736.
21. Baltatu MS, Vizureanu P, Sandu AV, et al. Research Progress of Titanium-Based Alloys for Medical Devices. *Biomedicines*. 2023;11(11):2997. doi: 10.3390/biomedicines11112997.
22. Еманов А.А., Кузнецов В.П., Горбач Е.Н. и др. Сравнительное исследование остеоинтеграции изготовленных с применением аддитивных технологий титановых и стальных имплантатов в большеберцовой кости кролика в условиях внешней фиксации. *Травматология и ортопедия России*. 2020;26(2):98-108. doi: 10.21823/2311-2905-2020-26-2-98-108.
23. Галиченко К.А., Сухов А.В., Тимошкин С.П. и др. Влияние топического применения наночастиц оксида церия на регенерацию тканей в эксперименте. *Медико-фармацевтический журнал «Пульс»*. 2023;25(5):96-100. doi: 10.26787/nudna-2686-6838-2023-25-5-96-100.
24. Legon'kova OA, Ushakova TA, Savchenkova IP, et al. Experimental Study of the Effects of Nanodispersed Ceria on Wound Repair. *Bull Exp Biol Med*. 2017;162(3):395-399. doi: 10.1007/s10517-017-3624-2.
25. Schubert D, Dargusch R, Raitano J, Chan SW. Cerium and yttrium oxide nanoparticles are neuroprotective. *Biochem Biophys Res Commun*. 2006;342(1):86-91. doi: 10.1016/j.bbrc.2006.01.129.
26. Ren L, Shi W, Tian Y, et al. A Two-Generation Reproductive Toxicity Study of Cerium Nitrate in Sprague-Dawley Rats. *Biol Trace Elem Res*. 2024;202(2):597-614. doi: 10.1007/s12011-023-03692-2.

27. Радцева Г.Л., Минаев Б.Д., Здорнова О.В., Пискарева Е.И. Изменения в тканях и органах при экспериментальном воздействии лантана. *Актуальні проблеми сучасної медицини: Вестник української медичинської стоматологічної академії*. 2011;11(4(36)):147-149.
28. Chen D, Liu Y, Chen AJ, Nie YX. Experimental study of subchronic toxicity of lanthanum nitrate on liver in rats. *Nonlinearity Biol Toxicol Med*. 2003;1(4):469-480. doi: 10.1080/15401420390271074.

Статья поступила 19.11.2025; одобрена после рецензирования 16.12.2025; принята к публикации 09.02.2026.

The article was submitted 19.11.2025; approved after reviewing 16.12.2025; accepted for publication 09.02.2026.

Информация об авторах:

Александр Сергеевич Анохин — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, aanokhin@imet.ac.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2847-1651>;

Наталья Андреевна Кононович — кандидат ветеринарных наук, ведущий научный сотрудник, n.a.kononovich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5990-8908>;

Александр Леонидович Шастов — кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, alshastov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7434-1404>;

Елена Николаевна Горбач — кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, gorbach.e@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9516-7481>;

Елена Анатольевна Ермакова — научный сотрудник, eadrshina@imet.ac.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1376-1004>;

Андрей Александрович Кирсанкин — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, akirsankin@imet.ac.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9206-7805>;

Мария Сергеевна Чувикина — младший научный сотрудник, mchuvikina@imet.ac.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3124-5356>;

Александр Сергеевич Лукьянов — инженер-исследователь, alukyanov@imet.ac.ru, <https://orcid.org/0009-0002-8770-909X>;

Светлана Сергеевна Стрельникова — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, sstrelnikova@imet.ac.ru;

Ирина Владимировна Шипицына — кандидат биологических наук; ведущий научный сотрудник, ivschimik@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5791-1989>;

Елена Анатольевна Киреева — кандидат биологических наук; ведущий научный сотрудник, ea_tkachuk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1006-5217>;

Наталья Владимировна Тушина — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ntushina76@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1322-608X>.

Information about the authors:

Alexander S. Anokhin — Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, aanokhin@imet.ac.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2847-1651>;

Natalia A. Kononovich — Candidate of Veterinary Sciences, Leading Research Fellow, n.a.kononovich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5990-8908>;

Alexander L. Shastov — Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher, alshastov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7434-1404>;

Elena N. Gorbach — Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, gorbach.e@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9516-7481>;

Elena A. Ermakova — Research Fellow, eadrshina@imet.ac.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1376-1004>;

Andrey A. Kirsankin — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, akirsankin@imet.ac.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9206-7805>;

Maria S. Chuvikina — Junior Research Fellow, mchuvikina@imet.ac.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3124-5356>;

Alexander S. Lukyanov — Research Engineer, alukyanov@imet.ac.ru; <https://orcid.org/0009-0002-8770-909X>;

Svetlana S. Strelnikova — Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, sstrelnikova@imet.ac.ru;

Irina V. Shipitsyna — Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, ivschimik@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5791-1989>;

Elena A. Kireeva — Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, ea_tkachuk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1006-5217>;

Natalya V. Tushina — Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, ntushina76@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1322-608X>.



Научная статья

УДК 616.71-004.8-018.46-002-089.844-74:615.33:616-092.4

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2026-32-2-237-243>

Элюция из различных костных цементов ванкомицина и меропенема при их комбинированном применении

М.В. Стогов ✉, **А.Л. Шастов**, **Е.А. Киреева**, **Н.В. Тушина**

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

Автор, ответственный за корреспонденцию: Максим Валерьевич Стогов, stogo_off@list.ru

Аннотация

Введение. Насыщение материалов для заполнения костных дефектов антибактериальными препаратами используют для лечения пациентов с инфекционными осложнениями костной ткани и профилактики.

Цель работы — провести оценку скорости элюции ванкомицина и меропенема из костных цементов на основе полиметилметакрилата и полимеров полиуретанового ряда, импрегнированных в материал в составе комплекса.

Материалы и методы. В исследовании *in vitro* проведен сравнительный анализ кинетики высвобождения ванкомицина и меропенема из двух материалов: на основе полимеров полиуретанового ряда (серия ПУ) и полиметилметакрилата (серия ПММА). Антибиотики вносили в материал до начала их полимеризации в следующих пропорциях: группа 1 — полимер : антибиотик 10 г : 1 г (по 0,5 г ванкомицина + 0,5 г меропенема); группа 2 — полимер : антибиотик 10 г : 0,5 г (по 0,25 г ванкомицина + 0,25 г меропенема). Для контроля использовали образцы, нагруженные одним антибиотиком: группа 1в — полимер : антибиотик 10 г : ванкомицин 0,5 г; группа 1м — полимер : антибиотик 10 г : меропенем 0,5 г; группа 2в — полимер : антибиотик 10 г : ванкомицин 0,25 г; группа 2м — полимер : антибиотик 10 г : меропенем 0,25 г.

Результаты. Элюция ванкомицина из материала как на основе ПММА, так и на основе ПУ, загруженных смесью ванкомицин+меропенем, была больше по конечному объему и более длительной по времени, чем из материалов, содержащих один ванкомицин. В свою очередь, высвобождение меропенема из ПММА и ПУ, загруженных смесью ванкомицин+меропенем, было по объему меньше, чем из материалов, содержащих один меропенем.

Обсуждение. Применение комплекса ванкомицина и меропенема в составе костных цементов обнаруживает следующую особенность, — меропенем способствует высвобождению ванкомицина из изученных материалов, при этом собственная элюция меропенема снижается.

Заключение. Комбинирование нескольких антибиотиков в материалах для заполнения костных дефектов влияет на кинетику высвобождения антибиотиков в отличие от кинетики высвобождения антибиотиков, загруженных в материал в случае монотерапии.

Ключевые слова: остеомиелит, костные дефекты, костный цемент, антибиотики, кинетика элюции

Для цитирования: Стогов М.В., Шастов А.Л., Киреева Е.А., Тушина Н.В. Элюция из различных костных цементов ванкомицина и меропенема при их комбинированном применении. *Гений ортопедии*. 2026;32(2):237-243. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-2-237-243.



Elution of vancomycin and meropenem and their combinations from various bone cement materials

M.V. Stogov✉, A.L. Shastov, E.A. Kireeva, N.V. Tushina

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

Corresponding author: Maksim V. Stogov, stogo_off@list.ru

Abstract

Introduction Saturation of bone defect filling materials with antibacterial agents is used for the treatment of patients with infectious bone complications and for their prevention.

The **purpose** of the work was to evaluate the elution rate of vancomycin and meropenem from bone cements based on polymethyl methacrylate and polyurethane polymers impregnated into the material in their combination.

Materials and methods In an *in vitro* study, a comparative analysis of the kinetics of vancomycin and meropenem release from two materials was performed that were based on polyurethane polymers (PU series) and polymethyl methacrylate (PMMA series). Antibiotics were added to the materials before their polymerization in the following proportions: group 1 – polymer : antibiotic 10 g : 1 g (0.5 g vancomycin + 0.5 g meropenem); group 2 – polymer : antibiotic 10 g : 0.5 g (0.25 g vancomycin + 0.25 g meropenem). Samples loaded with one antibiotic were used as a control: group 1v – polymer : antibiotic 10 g : vancomycin 0.5 g; group 1m – polymer : antibiotic 10 g : meropenem 0.5 g; group 2v – polymer: antibiotic 10 g: vancomycin 0.25 g; group 2m – polymer: antibiotic 10 g: meropenem 0.25 g.

Results Vancomycin elution from both PMMA- and PU-based materials loaded with a vancomycin+meropenem was greater in final volume and longer in time than from materials containing vancomycin alone. Conversely, meropenem release from PMMA and PU loaded with a vancomycin + meropenem mixture was less in volume than from the materials containing meropenem alone.

Discussion The use of a vancomycin-meropenem complex in bone cements reveals the following feature: meropenem promotes the release of vancomycin from the studied materials, while the elution of meropenem itself is reduced.

Conclusion Combining antibiotics for impregnation into materials for bone defect filling has an impact on the kinetics of antibiotics release, unlike the release kinetics of an antibiotic loaded into the material as monotherapy.

Keywords: osteomyelitis, bone defect, bone cement, antibiotics, elution kinetics

For citation: Stogov MV, Shastov AL, Kireeva EA, Tushina NV. Elution of vancomycin and meropenem and their combinations from various bone cement materials. *Genij Ortopedii*. 2026;32(2):237-243. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-2-237-243.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в ортопедической хирургии для профилактики и в комплексном лечении пациентов с перипротезной инфекцией и остеомиелитом достаточно широко используют эффективную практику насыщения материалов для заполнения костных полостей и дефектов (так называемый костный цемент) различными антибиотиками [1–3]. Принцип такого подхода состоит в постепенном высвобождении антибиотика из материала для достижения более эффективной локальной терапевтической концентрации антибиотиков, чем при исключительно их парентеральном введении, а также снижения токсического воздействия антибиотиков на организм [4–6]. Технология применения костного цемента с антибиотиками оказалась достаточно эффективной при первичном эндопротезировании суставов для профилактики глубоких инфекций [7]. Поэтому внесение в костные цементы антибиотиков становится рутинной практикой. Расширение практики применения этой технологии связано с использованием большего спектра различных антибиотиков [8–10]. Дополнительным стимулом развития данного направления является прогностически негативная ситуация с увеличением количества выделяемых штаммов при остеомиелите, нарастание их устойчивости к антибиотикам, а также рост доли ассоциаций микроорганизмов у пациентов с хроническим остеомиелитом [11–13]. Решение этих задач может быть связано как с расширением спектра используемых материалов для замещения дефектов [14–16], так с применением комплекса антибиотиков, тропных как к грамположительной, так и к грамотрицательной флоре [17].

Цель работы — провести оценку скорости элюции ванкомицина и меропенема из костных цементов на основе полиметилметакрилата и полимеров полиуретанового ряда, импрегнированных в материал в составе комплекса.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В исследовании *in vitro* проведен сравнительный анализ кинетики высвобождения ванкомицина и меропенема (оба антибиотика производства ООО Промомед, Россия) из двух материалов:

- рекост на основе полимеров полиуретанового ряда (Н. Новгород, РЗН 2014/1646 от 03.07.2014, бессрочно) (серия ПУ);
- костный цемент (ПУ № ФСЗ 2012/11622 от 19.03.2012, бессрочно) на основе полиметилметакрилата (серия ПММА).

Из тестируемых материалов (согласно инструкции к их применению) формировали цилиндры высотой 7 мм и диаметром 4 мм. Антибиотики вносили в материал до начала их полимеризации в следующих пропорциях:

- группа 1 — полимер : антибиотик 10 г : 1 г (0,5 г ванкомицина + 0,5 г меропенема);
- группа 2 — полимер : антибиотик 10г : 0,5г (0,25 г ванкомицина + 0,25 г меропенема);

Для контроля использовали образцы, нагруженные одним антибиотиком:

- группа 1в — полимер : антибиотик 10 г : 0,5 г ванкомицина;
- группа 1м — полимер : антибиотик 10 г : 0,5 г меропенема;
- группа 2в — полимер : антибиотик 10 г : 0,25 г ванкомицина;
- группа 2м — полимер : антибиотик 10 г : 0,25 г меропенема.

Цилиндры инкубировали в 10 мл физиологического раствора в термостате при 37 °С. Инкубационный раствор (элюат) в течение первой недели меняли ежедневно, в последующем — раз в неделю. В каждой группе инкубировали по шесть образцов. Параллельно инкубировали образцы без антибиотика (нулевой контроль).

В каждой пробе инкубационного раствора спектрофотометрически, относительно стандартной калибровочной кривой, по интенсивности поглощения определяли концентрацию тестируемых антибиотиков: ванкомицин — при 280 нм, меропенем — при 298 нм. При расчетах концентрации опытных проб вычитали значения экстинкции в пробах нулевого контрольного материала (без антибиотиков). Инкубацию прекращали, когда в пробах в течение двух недель отмечали следовые количества антибиотиков.

Исследования выполнены с учетом рекомендаций, обозначенных в ГОСТе ISO 10993-13-2016 «Изделия медицинские. Оценка биологического действия медицинских изделий. Часть 13. Идентификация и количественное определение продуктов деструкции полимерных медицинских изделий».

В параллелях рассчитывали медиану и интерквартильный размах (Q1–Q3). Достоверность различий между группами оценивали с помощью W-критерия Вилкоксона для независимых выборок.

Работа выполнена в формате *in vitro* исследования без участия животных или человека, поэтому разрешение этического комитета на ее проведение не требовалось.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Динамика высвобождения ванкомицина из материалов серии ПММА и ПУ, насыщенных комплексом ванкомицин-меропенем в соотношении 0,5 + 0,5 г (группа 1), была практически одинакова, с максимальным высвобождением антибиотиков после первых суток инкубации (рис. 1). При этом объем высвобождающегося ванкомицина из материала на основе ПУ, насыщенного комплексом антибиотиков, был выше, чем из этого же материала, насыщенного только ванкомицином (группа 1в). При содержании антибиотиков в соотношении 0,25 + 0,25 г (группа 2) высвобождение ванкомицина было выше в серии ПММА, при этом элюция ванкомицина из материала на основе ПУ в группе 2в была заметно выше, чем в группе 2.

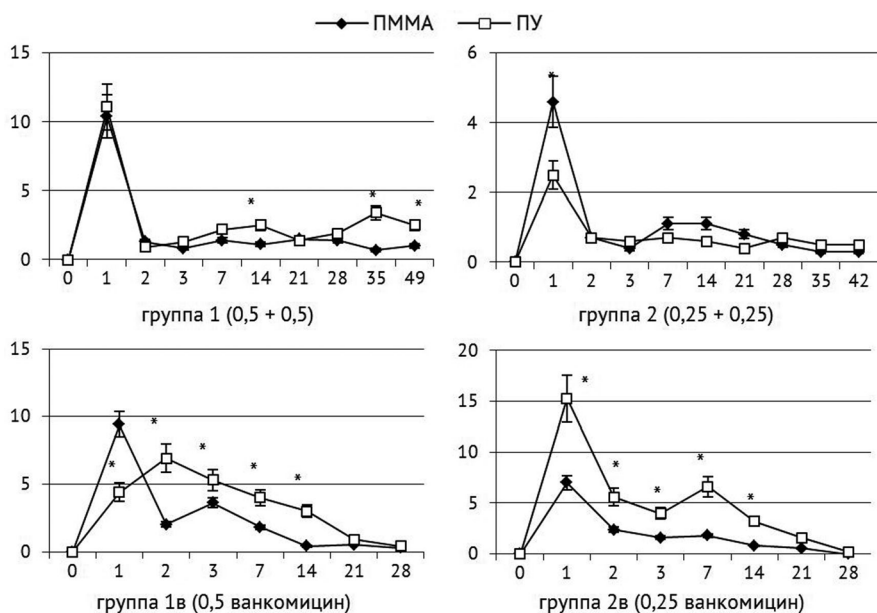


Рис. 1. Динамика высвобождения ванкомицина (% от общей массы введенного антибиотика) из тестируемых материалов (Me, интерквартильный размах); * — достоверность различий между сериями при $p < 0,05$. По оси абсцисс — сутки инкубации

Высвобождение меропенема из материалов на основе ПММА и ПУ, насыщенных комплексом ванкомицин-меропенем в соотношении 0,5 : 0,5 г (группа 1), было практически одинаково, однако общий объем высвобождающегося меропенема из обоих материалов, насыщенных смесью антибиотиков, был в 1,5–2,0 раза ниже, чем из материалов, загруженных только меропенемом (рис. 2). В группе 2 высвобождение меропенема было выше в серии ПММА, в группе 2м, наоборот, — в серии материалов на основе ПУ. В целом стоит отметить, что объемы элюированного меропенема из обоих материалов, содержащих комплекс антибиотиков, были существенно ниже, чем из материалов, насыщенных монопрепаратом.

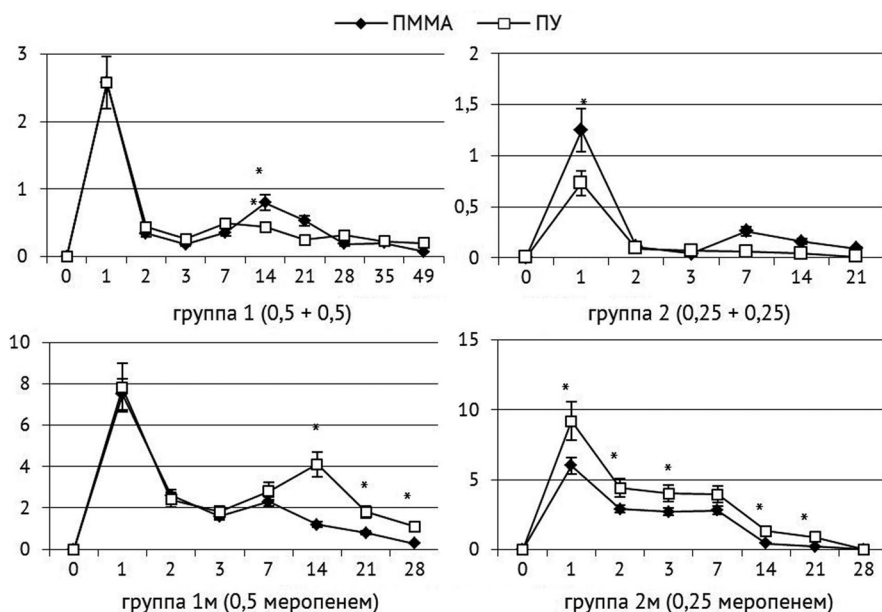


Рис. 2. Динамика высвобождения меропенема (% от общей массы введенного антибиотика) из тестируемых материалов (Me, интерквартильный размах); * — достоверность различий между сериями при $p < 0,05$. По оси абсцисс — сутки инкубации

В целом общие характеристики элюции ванкомицина и меропенема при загрузке исследуемых материалов смесью данных антибиотиков в равном весовом соотношении отличались относительно высвобождения в моноварианте (табл. 1). Элюция ванкомицина как из материала ПММА, так и из материала на основе ПУ, загруженных смесью ванкомицин+меропенем, была больше по конечному объему и более длительной по времени, чем из материалов, содержащих только один ванкомицин. В свою очередь, высвобождение меропенема из ПММА и ПУ, загруженных смесью ванкомицин+меропенем, было по объему меньше, чем из материалов, содержащих один меропенем.

Таблица 1

Общие результаты кинетики высвобождения антибиотиков в разных концентрациях из материалов ПММА и ПУ (Медиана)

Антибиотик	Группа	L, сутки	V ₀ , %	
			ПММА/ПУ	Max, сутки (%)
Ванкомицин	1в (моно 0,5)	35/35	20,8/30,1	1(9,4)/1(4,4)
	1 (смесь 0,5)	77/63	45,7#/64,4**	1(10,4)/1(11,1)
	2в (моно 0,25)	21/21	13,8/33,6*	1(7,0)/1(14,7)
	2 (смесь 0,25)	42/42	42,0#/32,9	1(18,3)/1(10,0)
Меропенем	1м (моно 0,5)	28/28	16,5/21,5	1(7,5)/1(7,7)
	1 (смесь 0,5)	56/56	11,6#/12,5#	1(5,2)/1(5,2)
	2м (моно 0,25)	14/14	15,3/23,4	1(5,9)/1(9,1)
	2 (смесь 0,25)	21/14	8,1#/4,0**	1(5,0)/1(2,9)

Примечание: L — длительность высвобождения антибиотика; V₀ — суммарный объем высвободившегося антибиотика в % относительно всего импрегнированного объема; Max — срок наблюдения (в сутках) когда отмечался максимальный объем высвободившегося антибиотика и в скобках процент этого высвободившегося антибиотика относительно всего импрегнированного антибиотика; * — различия между ПММА и ПУ достоверны при $p < 0,05$; # — достоверные отличия от группы монотерапии при $p < 0,05$.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты настоящего исследования демонстрируют, что кинетика высвобождения ванкомицина и меропенема при загрузке материалов для замещения постостеомиелитических дефектов смесью данных антибиотиков в равном весовом соотношении отличалась от кинетики высвобождения в случае, когда в материал загружали один антибиотик. В частности, высвобождение ванкомицина из обоих изученных материалов в случае их загрузки смесью ванкомицин + меропенем было больше, чем из материалов, содержащих один ванкомицин. При этом высвобождение ванкомицина из материала на основе ПУ было более эффективным, чем из ПММА. В свою очередь, высвобождение меропенема из обоих изученных материалов в случае их загрузки смесью ванкомицин + меропенем было менее эффективно, чем из материалов, насыщенных только меропенемом.

Имеющиеся литературные данные в основном посвящены элюции монопрепаратов антибиотиков, импрегнированных в костный цемент на основе ПММА [8–10]. Нами встречена единственная работа, в которой изучена элюция исследуемой нами смеси антибиотиков. Отмечено, что элюирование ванкомицина из акрилового цемента не зависело от присутствия меропенема [18]. Эти результаты близки к нашим данным, поэтому можно констатировать, что применение комплекса ванкомицина и меропенема в составе костных цементов обнаруживает следующую особенность, — один антибиотик (меропенем) способствует высвобождению другого (ванкомицин), при этом собственная элюция меропенема снижается.

В целом, практически все аналогичные исследования кинетики высвобождения различных комбинаций антибиотиков в составе костных цементов отмечают общее правило, — комбинация антибиотиков в составе материалов для замещения инфицированных дефектов кости изменяет характеристики высвобождения всех входящих в состав антибактериальных компонентов, как усиливая, так и ослабляя их элюцию [19, 20]. Показано, что при сочетании гентамицина и ванкомицина отмечается синергетический эффект, — элюция обоих антибиотиков при совместной загрузке в костный цемент увеличивается [21]. При сочетании тобрамицина и ванкомицина увеличивается высвобождение ванкомицина по сравнению с высвобождением ванкомицина в чистом виде [22]. Случаи усиления/ослабления элюции отдельных антибиотиков описаны и для комплексов, состоящих из трех антибиотиков (цефазолина, гентамицин, ванкомицин) [23].

Дозозависимые особенности элюции антибиотиков по результатам нашего исследования следующие: для обоих использованных материалов наблюдали прямую зависимость между исходной концентрацией импрегнированных антибиотиков и объемами их элюции, при этом зависимость доза/элюция носила нелинейный характер, что также согласуется с литературными данными [24].

Кинетика высвобождения антибиотиков в зависимости от исходного соотношения масс комбинируемых антибиотиков в цементе изучена достаточно слабо, хотя и здесь сохраняется общая закономерность, — повышение доли отдельного антибиотика может менять (усиливать или снижать) профиль кинетики другого антибиотика [25].

Кроме того, на кинетику элюции антибиотиков, как показывают наши исследования и литературные данные, может влиять состав материала, используемого для замещения костных дефектов [26, 27], и его вязкость [28].

Поэтому в целом можно заключить, что каждое сочетание антибиотиков и каждая марка цемента демонстрирует свой уникальный профиль высвобождения антибиотиков [24]. Эти обстоятельства серьезно затрудняют выбор материала и комбинации антибиотиков на практике. С учетом того, что профиль кинетики антибиотиков определяется также составом цемента, выбор материала и используемых антибиотиков в клинических условиях может представлять существенную сложность и нести достаточные риски того, что антибактериальная эффективность применения импрегнированных антибиотиками костных цементов для замещения постостеомиелитических дефектов будет ниже ожидаемой. Поэтому на данном этапе наиболее доступным выглядит подход, при котором образец костного цемента с антибиотиками перед применением в клинике тестируют по показателям эффективности (элюция и антибактериальная чувствительность) в исследовании *in vitro*, чтобы убедиться в том, что комбинация антибиотиков подходит для выбранного цемента [24].

Для повышения элюции антибиотиков из костных цементов свое применение могут найти подходы, связанные с дополнительной модификацией материала за счет его химической модификации, использования различных армирующих элементов, насыщения материала антимикробными средствами, не относящимися к антибиотикам [29–32].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комбинирование нескольких антибиотиков в материалах для заполнения костных дефектов как на основе полиметилметакрилата, так и полимеров полиуретанового ряда влияет на скорость элюции антибиотиков в отличие от скорости высвобождения антибиотиков, загруженных в материал в случае монотерапии. В частности, меропенем в составе комплекса с ванкомицином увеличивает скорость высвобождения ванкомицина.

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

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках темы государственного задания на осуществление научных исследований «Разработка временных биорезорбируемых антибактериальных носителей для замещения постостеомиелитических дефектов костей нижних конечностей» (2024–2026 гг.).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Сергеев Г.К., Кирпичев И.В., Мальчевский В.А. и др. Современные направления стратегии профилактики и лечения перимплантатной инфекции и послеоперационного остеомиелита. *Медицинская наука и образование Урала*. 2024;25(1):137–144. doi: 10.36361/18148999.2024.25.1.137.
- Wassif RK, Elkayal M, Shamma RN, Elkheshen SA. Recent advances in the local antibiotics delivery systems for management of osteomyelitis. *Drug Deliv*. 2021;28(1):2392–2414. doi: 10.1080/10717544.2021.1998246.
- Xu T, Wu KL, Jie K. Comprehensive meta-analysis of antibiotic-impregnated bone cement versus plain bone cement in primary total knee arthroplasty for preventing periprosthetic joint infection. *Chin J Traumatol*. 2022;25(6):325–330. doi: 10.1016/j.cjtee.2022.06.001.
- Cara A, Ferry T, Laurent F, Josse J. Prophylactic Antibiofilm Activity of Antibiotic-Loaded Bone Cements against Gram-Negative Bacteria. *Antibiotics (Basel)*. 2022;11(2):137. doi: 10.3390/antibiotics11020137.
- Dantas LR, Ortis GB, Suss PH, Tuon FF. Advances in Regenerative and Reconstructive Medicine in the Prevention and Treatment of Bone Infections. *Biology (Basel)*. 2024;13(8):605. doi: 10.3390/biology13080605.
- Jiang C, Zhu G, Liu Q. Current application and future perspectives of antimicrobial degradable bone substitutes for chronic osteomyelitis. *Front Bioeng Biotechnol*. 2024;12:1375266. doi: 10.3389/fbioe.2024.1375266.
- Martínez-Moreno J, Merino V, Nacher A, et al. Antibiotic-loaded Bone Cement as Prophylaxis in Total Joint Replacement. *Orthop Surg*. 2017;9(4):331–341. doi: 10.1111/os.12351.
- Стогов М.В., Шастов А.Л., Киреева Е.А., Тушина Н.В. Высвобождение антибиотиков из материалов для замещения постостеомиелитических дефектов кости. *Гений ортопедии*. 2024;30(6):873–880. doi: 10.18019/1028-4427-2024-30-6-873-880.
- Levack AE, Turajane K, Yang X, et al. Thermal Stability and *in Vitro* Elution Kinetics of Alternative Antibiotics in Polymethylmethacrylate (PMMA) Bone Cement. *J Bone Joint Surg Am*. 2021;103(18):1694–1704. doi: 10.2106/JBJS.20.00011.
- Wang LH, Feng YD, Zhang XW, et al. Elution and Biomechanical Properties of Meropenem-Loaded Bone Cement. *Orthop Surg*. 2021;13(8):2417–2422. doi: 10.1111/os.13139.
- Ермаков А.М., Богданова Н.А., Матвеева Е.Л., Гасанова А.Г. Анализ микробного пейзажа у пациентов с перипротезной инфекцией тазобедренного сустава. *Гений ортопедии*. 2025;31(3):307–313. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-3-307-313.
- Цискарашвили А.В., Меликова Р.Э., Назаренко А.Г. Результаты микробиологического мониторинга ведущих возбудителей при инфицированных переломах длинных костей в условиях чрескостного остеосинтеза. *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова*. 2025;32(2):457–475. doi: 10.17816/vto655983.
- Шипицына И.В., Осипова Е.В. Роль анаэробной микрофлоры в этиологии хронического остеомиелита. *Клиническая лабораторная диагностика*. 2024;69(2):92–96. doi: 10.51620/0869-2084-2024-69-2-92-96.

14. Судницын А.С., Шастов А.Л., Ключин Н.М., Рашидов Г.Х. Первый опыт применения частично биорезорбируемого костно-замещающего материала у больного хроническим остеомиелитом большеберцовой кости 34-летней давности заболевания. *Гений ортопедии*. 2025;31(1):60-65. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-60-65.
15. Smith M, Roberts M, Al-Kassas R. Implantable drug delivery systems for the treatment of osteomyelitis. *Drug Dev Ind Pharm*. 2022;48(10):511-527. doi: 10.1080/03639045.2022.2135729.
16. Zegre M, Poljańska E, Caetano LA, et al. Research progress on biodegradable polymeric platforms for targeting antibiotics to the bone. *Int J Pharm*. 2023;648:123584. doi: 10.1016/j.ijpharm.2023.123584.
17. Lin H, Gao Z, Shan T, et al. A review on the promising antibacterial agents in bone cement-From past to current insights. *J Orthop Surg Res*. 2024;19(1):673. doi: 10.1186/s13018-024-05143-7.
18. Andollina A, Bertoni G, Zolezzi C, et al. Vancomycin and meropenem in acrylic cement: elution kinetics of *in vitro* bactericidal action. *Chir Organi Mov*. 2008;91(3):153-158. doi: 10.1007/s12306-007-0025-0.
19. Funk GA, Burkes JC, Cole KA, et al. Antibiotic Elution and Mechanical Strength of PMMA Bone Cement Loaded With Borate Bioactive Glass. *J Bone Jt Infect*. 2018;3(4):187-196. doi: 10.7150/jbji.27348.
20. Slane J, Gietman B, Squire M. Antibiotic elution from acrylic bone cement loaded with high doses of tobramycin and vancomycin. *J Orthop Res*. 2018;36(4):1078-1085. doi: 10.1002/jor.23722.
21. Hsieh PH, Tai CL, Lee PC, Chang YH. Liquid gentamicin and vancomycin in bone cement: a potentially more cost-effective regimen. *J Arthroplasty*. 2009;24(1):125-130. doi: 10.1016/j.arth.2008.01.131.
22. Penner MJ, Masri BA, Duncan CP. Elution characteristics of vancomycin and tobramycin combined in acrylic bone-cement. *J Arthroplasty*. 1996;11(8):939-944. doi: 10.1016/s0883-5403(96)80135-5.
23. Paz E, Sanz-Ruiz P, Abenojar J, et al. Evaluation of Elution and Mechanical Properties of High-Dose Antibiotic-Loaded Bone Cement: Comparative "In Vitro" Study of the Influence of Vancomycin and Cefazolin. *J Arthroplasty*. 2015;30(8):1423-1429. doi: 10.1016/j.arth.2015.02.040.
24. Fraval A, Zhou Y, Parvizi J. Antibiotic-loaded cement in total joint arthroplasty: a comprehensive review. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2024;144(12):5165-5175. doi: 10.1007/s00402-024-05328-z.
25. von Hertzberg-Boelch SP, Luedemann M, Rudert M, Steinert AF. PMMA Bone Cement: Antibiotic Elution and Mechanical Properties in the Context of Clinical Use. *Biomedicines*. 2022;10(8):1830. doi: 10.3390/biomedicines10081830.
26. Coraça-Huber D, Humez M, Kühn KD. A Comparative Study of Extended Gentamicin and Tobramycin Release and Antibacterial Efficacy from Palacos and Simplex Acrylic Cements. *Microorganisms*. 2025;13(9):2174. doi: 10.3390/microorganisms13092174.
27. Si L, Zhang W, Jiang H, et al. Dual antibiotic PLGA microspheres for the treatment of traumatic osteomyelitis. *Sci Rep*. 2025;15(1):30694. doi: 10.1038/s41598-025-14824-0.
28. Dietz MJ, McGowan BM, Thomas DD, et al. Does Cement Viscosity Impact Antibiotic Elution and *In Vitro* Efficacy Against Common Prosthetic Joint Infection Pathogens? *Clin Orthop Relat Res*. 2025;483(3):488-497. doi: 10.1097/CORR.0000000000003272.
29. Божкова С.А., Гаджимогомедов М.Ш., Гордина Е.М. и др. Экспериментальное обоснование комбинаций антимикробных препаратов для импрегнации костного цемента. *Травматология и ортопедия России*. 2025;31(1):76-84. doi: 10.17816/2311-2905-17665.
30. Kazmi SAD, Soomro T, Soomro R, et al. Impact of Biofilms on Surface Properties of Polymethyl Methacrylate (PMMA) Resins. *J Basic Microbiol*. 2024;64(12):e2400460. doi: 10.1002/jobm.202400460.
31. Kreve S, Cândido Dos Reis A. Antibiofilm capacity of PMMA surfaces: A review of current knowledge. *Microb Pathog*. 2025;202:107426. doi: 10.1016/j.micpath.2025.107426.
32. Tseng TH, Chang CH, Chen CL, et al. A simple method to improve the antibiotic elution profiles from polymethylmethacrylate bone cement spacers by using rapid absorbable sutures. *BMC Musculoskelet Disord*. 2022;23(1):916. doi: 10.1186/s12891-022-05870-0.

Статья поступила 19.01.2025; одобрена после рецензирования 26.01.2025; принята к публикации 09.02.2026.

The article was submitted 19.01.2025; approved after reviewing 26.01.2025; accepted for publication 09.02.2026.

Информация об авторах:

Максим Валерьевич Стогов — доктор биологических наук, доцент, руководитель отдела, stogo_off@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8516-8571>;

Александр Леонидович Шастов — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, старший научный сотрудник, alshastov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7434-1404>;

Елена Анатольевна Киреева — кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, ea_tkachuk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1006-5217>;

Наталья Владимировна Тушина — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ntushina76@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1322-608X>.

Information about the authors:

Maksim V. Stogov — Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Head of Department, stogo_off@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8516-8571>;

Alexander L. Shastov — Candidate of Medical Sciences, orthopaedic surgeon, Senior Researcher, alshastov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7434-1404>;

Elena A. Kireeva — Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, ea_tkachuk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1006-5217>;

Natalia V. Tushina — Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, ntushina76@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1322-608X>.

Научная статья

УДК 616.718.51-089.843-77-092.9:616.72-018.3:612.086

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2026-32-2-244-253>



Особенности ремоделирования суставных структур при протезировании смежного сегмента конечности имплантатом с кальций-фосфатным покрытием

Т.А. Ступина^{1✉}, А.А. Еманов¹, В.П. Кузнецов^{1,2}

¹ Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова, Курган, Россия

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

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

Аннотация

Введение. Изучение особенностей реорганизации компонентов смежного с протезом сустава и определение предикторов артроза являются залогом успешного восстановления функции протезируемой конечности.

Цель работы — оценить структурную реорганизацию основных компонентов сустава в отдаленные сроки после протезирования голени имплантатом с кальций-фосфатным покрытием.

Материалы и методы. Исследование проведено на пяти интактных и шести опытных беспородных самцах собак, возраст — $(1,8 \pm 0,5)$ лет, вес — $(19,0 \pm 1,2)$ кг. Моделировали культю большеберцовой кости на уровне верхней трети диафиза. Через 2,5 месяца устанавливали имплантат из Ti6Al4V с кальций-фосфатным покрытием. Этапы исследования — шесть и 12 месяцев после протезирования. Гистоморфометрия синовиальной оболочки и остеохондрального компонента большеберцового плато выполнена по полутонким и парафиновым срезам на микроскопе AxioScope.A1 с ПО Zenblue (CarlZeissMicroImagingGmbH, Германия).

Результаты. Слабо выраженный синовит, выявленный через шесть месяцев (гиперплазия покровного слоя, преобладание макрофагоподобных синовиоцитов, плазматические, тучные клетки), через 12 месяцев имел обратимый характер в 70 % наблюдений. Регистрировали признаки нарушения кровоснабжения синовиальной оболочки. Изменения суставного хряща по шкале OARSI через шесть месяцев соответствовали степени 0–1, через 12 месяцев — степени 1–2 (в одном наблюдении — синовиальный паннус). Отмечали нарушение базофильной линии: частота встречаемости сосудов (количество сосудов на единицу анализируемых полей зрения) через шесть месяцев — $(0,35 \pm 0,02)$, через 12 месяцев — $(0,30 \pm 0,02)$, различия между сроками статистически незначимы, $p = 0,736$. Толщина субхондральной костной пластинки через шесть месяцев значимо ($p = 0,0105$) меньше контроля. Через 12 месяцев медиана толщины субхондральной костной пластинки больше контроля на 33 %, костного индекса — на 31 %, различия на уровне статистической тенденции. На всех этапах отмечены активные остеообласты, выстилающие костные трабекулы, при окраске по Массону в костном матриксе преобладали фуксинофильные структуры.

Обсуждение. Выявленные гистологические признаки воспаления и нарушения кровоснабжения синовиальной оболочки, истончение суставного хряща, инвазия синовиального паннуса в поверхностную зону и сосудов в глубокую зону хряща являются прогностическими маркерами остеоартрита.

Заключение. Структурные изменения костно-хрящевого компонента большеберцового плато через год после протезирования голени имплантатом с кальций-фосфатным покрытием соответствовали начальной стадии остеоартрита. Неинфекционный синовит слабой степени выраженности имел обратимый характер. Применение имплантатов с кальций-фосфатным покрытием способствовало активации процессов репаративного остеогенеза и минерализации костного матрикса в субхондральной зоне.

Ключевые слова: экзопротезирование, имплантат с кальций-фосфатным покрытием, синовиальная оболочка, остео-хондральный компонент, морфометрия

Для цитирования: Ступина Т.А., Еманов А.А., Кузнецов В.П. Особенности ремоделирования суставных структур при протезировании смежного сегмента конечности имплантатом с кальций-фосфатным покрытием. *Гений ортопедии*. 2026;32(2):244-253. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-2-244-253.



Features of adjacent joint structures remodeling after prosthetic application of a tibial calcium-phosphate coated implant

T.A. Stupina¹✉, A.A. Emanov¹, V.P. Kuznetsov^{1,2}

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

² Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

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

Abstract

Introduction Studying the reorganization of adjacent joint components due to prosthesis application and identifying predictors of arthrosis are key factors to successful functional restoration of a prosthetic limb.

The **aim** of this study was to evaluate the structural reorganization of the basic joint components after prosthetic application of a calcium phosphate-coated implant at long term.

Materials and Methods The study was conducted on five intact and six experimental mongrel male dogs, aged 1.8 ± 0.5 years and weighing 19.0 ± 1.2 kg. A tibial stump was modeled at the level of the upper third of the diaphysis. A Ti6Al4V calcium-phosphate coated implant was used 2.5 months later. The study was conducted at six and 12 months after prosthesis application. Histomorphometry of the synovial membrane and osteochondral component of the tibial plateau was performed on semithin and paraffin sections using an AxioScope.A1 microscope with Zenblue software (CarlZeissMicroImagingGmbH, Germany).

Results Mild synovitis detected at six months (hyperplasia of the integumentary layer, predominance of macrophage-like synoviocytes, plasma cells, and mast cells) was reversible in 70 % of cases at 12 months. Signs of impaired synovial blood supply were recorded. Articular cartilage changes according to the OARSI scale corresponded to grades 0–1 at six months and grades 1–2 at 12 months (in one case, synovial pannus). Basophilic line abnormalities were noted: vessel density (number of vessels per unit of visual field analyzed) was (0.35 ± 0.02) at six months and (0.30 ± 0.02) at 12 months. Differences between time points were statistically insignificant, $p = 0.736$. Subchondral bone plate thickness was significantly ($p = 0.0105$) lower than in the control. At 12 months, the median subchondral bone plate thickness was 33 % higher than the one in the control animals, and the bone index was 31 % higher; differences were statistically significant. Active osteoblasts that were lining bone trabeculae were noted at all stages; fuchsinophilic structures predominated in the bone matrix when stained with Masson's method.

Discussion The histological signs of inflammation and impaired blood supply to the synovial membrane, thinning of the articular cartilage, and invasion of the synovial pannus into the superficial zone and vessels into the deep cartilage zone were prognostic markers of osteoarthritis.

Conclusion Structural changes in the osteochondral component of the tibial plateau one year after application of a tibial calcium phosphate-coated implant were consistent with the initial stage of osteoarthritis. Mild non-infectious synovitis was reversible. The use of calcium phosphate-coated implants promoted the activation of reparative osteogenesis and mineralization of the bone matrix in the subchondral zone.

Keywords: exoprosthesis, calcium phosphate-coated implant, synovial membrane, osteochondral component, morphometry

For citation: Stupina TA, Emanov AA, Kuznetsov VP. Features of adjacent joint structures remodeling after prosthetic application of a tibial calcium-phosphate coated implant. *Genij Ortopedii*. 2026;32(2):244-253. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-2-244-253.

ВВЕДЕНИЕ

Остеоинтегративное экзопротезирование конечностей представляет собой передовую технологию восстановления утраченных конечностей путем интеграции металлического имплантата с костной тканью культы, обеспечивая стабильное и функциональное соединение [1, 2, 3, 4]. Преимущества данного метода включают улучшение функциональности и качества жизни пациентов, сенсорной обратной связи (остеоперцепция и остеопроприорецепция), долгосрочное функционирование и устранение проблем, связанных с традиционными гильзовыми протезами (раздражение кожи, плохое прилегание, высокая частота боли в костях и/или мягких тканях, аллергические реакции, снижение функции и дальнейшее ухудшение качества жизни) [5, 6, 7, 8, 9].

Современные исследования по улучшению остеоинтегративных свойств имплантатов направлены на повышение эффективности сращения костной ткани с имплантатом путем модификации его поверхности (микротекстурирование, наноструктурные и биологически активные покрытия), стимуляции остеогенеза (электростимуляция, применение препаратов, стимулирующих минерализацию) [10, 11, 12, 13].

Установлено, что имплантаты с кальций-фосфатным покрытием обладают высокой биосовместимостью, ускоряют процесс остеоинтеграции [14, 15].

Исследования на животных показали, что в смежном суставе через шесть месяцев после протезирования голени имплантатом типа PressFit структурные изменения суставного хряща соответствовали степени 0–1 по классификации Международного общества изучения остеоартроза OARSI [16]. Структурные изменения субхондральной зоны по классификации O-M. Aho et al. [17] соответствовали стадии 0, — «очень ранние признаки остеоартроза» [18]. При установке имплантатов с кальций-фосфатным покрытием в выше расположенном суставе процессы резорбции субхондральной кости и истончение суставного хряща были выражены в меньшей степени по сравнению с имплантатами без покрытия [19].

У пациентов, перенесших ампутацию конечности, распространенным осложнением после протезирования являются контрактуры и артроз в смежном суставе, возникающие из-за таких факторов как повышенная нагрузка на сустав, нарушение биомеханики, длительная неподвижность суставов, мышечная слабость и воспалительная реакция организма на имплантаты [20, 21].

Нарушение нормальной биомеханики сустава, наличие очагов инфекции, которые встречаются после протезирования конечности [5], относятся к основными причинами развития синовита [22].

Изучение особенностей структурной реорганизации компонентов смежного с протезом сустава и определение предикторов артроза являются залогом успешного восстановления функции протезируемой конечности и долгой службы протеза.

Цель работы — оценить структурную реорганизацию основных компонентов сустава в отдаленные сроки после протезирования голени имплантатом с кальций-фосфатным покрытием.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Исследование выполнено на 11 беспородных собаках (самцы) в возрасте ($1,8 \pm 0,5$) лет, с массой тела ($19,0 \pm 1,2$) кг. Опытным животным ($n = 6$) моделировали культю большеберцовой кости на уровне верхней трети диафиза. Через 2,5 месяца устанавливали имплантат из сплава Ti6Al4V с кальций-фосфатным покрытием (Патент на полезную модель РФ № 194912, [23]). Затем с помощью аппарата Илизарова и специального устройства (Патент РФ № 185647, [24]) имплантат фиксировали и создавали компрессию на кость ($F_n = 20$ Н) в течение 35 дней после операции, затем устанавливали экзопротез. Этапы исследования — шесть и 12 месяцев после протезирования.

Объекты исследования: синовиальная оболочка, суставной хрящ и субхондральная зона большеберцового плато.

В качестве контроля исследовали синовиальную оболочку, суставной хрящ и субхондральную зону большеберцового плато пяти интактных собак.

Этические принципы

Исследование проведено в соответствии с правилами Европейской конвенцией (ETS № 123) о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях и межгосударственным стандартам (ГОСТ 33044-2014). Исследование одобрено локальным этическим комитетом (протокол от 29.11.2024 № 1(76)).

Эвтаназия

Эвтаназию осуществляли после миорелаксации раствором димедрола 1 % (0,02 мг/кг) и рометара 2 % (5 мг/кг) введением летальной дозы барбитуратов.

Гистологические методы исследования

Для гистоморфометрического исследования вскрывали коленный сустав, иссекали фрагменты синовиальной оболочки, с нагружаемых участков большеберцового плато вырезали образцы суставного хряща с подлежащей субхондральной костью. Вырезанные костно-хрящевые блоки фиксировали в 10 % растворе нейтрального формалина, затем декальцинировали в смеси растворов муравьиной и соляной кислот (применяли стандартный протокол щадящей декальцинации, при котором декальцинация значительно не влияла на тинкториальные свойства костного матрикса). Дальнейшие этапы парафиновой проводки костно-хрящевых блоков осуществляли в аппарате для вакуумной проводки тканей HISTOSAFETM INFILTRATM (ООО «ЭргоПродакшн», Россия). Срезы толщиной 5–7 мкм с парафиновых блоков изготавливали на микротоме HM 450 Thermo Scientific (США), затем окрашивали гематоксилином и эозином, для выявления степени минерализации костного матрикса применяли специальную окраску трехцветным методом по Массону [25].

Для анализа ангиогенеза проводили иммуногистохимическое исследование на определение наличия маркера CD34 (моноклональные антитела кролика к CD34 [EP373Y]) (Abcam, Великобритания). Для визуализации реакции применяли набор реагентов для иммуногистохимической детекции HRP/DAB (ab236469 – Rabbit specific HRP/DAB Detection IHC Detection Kit-Micropolymer, Abcam, Великобритания). Все этапы постановки реакции проводили согласно протоколу фирмы-производителя антител. Срезы докрашивали гематоксилином.

Образцы синовиальной оболочки после альдегидно-осмиевой фиксации обезвоживали и заключали в двухкомпонентную эпоксидную смолу. Полутонкие (0,5–1,0 мкм) срезы (4–8 мм²) готовили на ультрамикротоме Nova (LKB, Швеция), окрашивали метиленовым синим и основным фуксином.

Исследование на светооптическом уровне производили с помощью микроскопа AxioScope.A1 с цифровой камерой AxioCam (CarlZeissMicroImagingGmbH, Германия).

При гистоморфометрии с использованием ПО Zenblue (CarlZeissMicroImagingGmbH, Германия) в суставном хряще определяли параметры: толщина некальцифицированного хряща ($h_{uncal.cr}$, мкм), толщина кальцифицированного хряща ($h_{cal.cr}$, мкм). В глубокой зоне некальцифицированного хряща оценивали частоту встречаемости сосудов (отношение суммы сосудов в полях зрения к количеству всех анализируемых полей зрения), от каждого животного анализировали в среднем 20 полей при увеличении 400×. В субхондральной зоне определяли толщину субхондральной костной пластики (h_{crtb} , мкм), рассчитывали костный индекс как отношение толщины трабекул ($TbTh$, мкм) к ширине межтрабекулярных пространств ($ItTh$, мкм).

Выраженность структурных изменений суставного хряща оценивали согласно гистологической классификации OARSI [16], структурные изменения субхондральной зоны — по классификации O-M. Aho et al. [17], выраженность воспалительного процесса в синовиальной оболочке — по шкале V. Krenn et al. [26].

Статистические методы

Количественные данные обрабатывали в табличном процессоре Microsoft Excel. Оценку типа распределения выборок проводили с помощью критерия Колмогорова. Мера центральной тенденции параметров представлена в виде медианы и квартилей, минимальных и максимальных значений ($Me (p25-p75) [min-max]$) и в виде средней и ошибки средней ($M \pm m$). Для анализа различий сравниваемых групп использовали критерий Манна – Уитни, для частотных показателей — критерий Барнарда, значимыми считали различия при $p < 0,05$ (программа AtteStat, версия 9.3.1).

РЕЗУЛЬТАТЫ**Структурная реорганизация синовиальной оболочки**

Через шесть месяцев эксперимента в синовиальной оболочке в покровном слое синовиальные клетки располагались в один–три слоя, преобладали макрофагоподобные синовиоциты, такие клетки имели овоидное ядро, цитоплазматические выросты, базофильную цитоплазму, содержащую множество гранул и вакуолей (рис. 1, а). В поверхностном коллагеново-эластическом слое преобладали коллагеновые волокна, клеточность была умеренно повышена, наряду с фиброцитами и фибробластами регистрировали плазматические клетки, скопления тучных клеток (рис. 1, б). В глубоком коллагеново-эластическом слое регистрировали сосуды с утолщенными стенками за счет гипертрофии гладкомышечных клеток, в отдельных сосудах набухшие ядра эндотелиальных клеток перекрывали внутрисосудистое пространство (рис. 1, в).

Через 12 месяцев эксперимента отмечали участки утолщения покровного слоя, в которых синовиальные клетки располагались в три–четыре слоя, основная часть синовиоцитов — с признаками деструкции, аномальной формы с пикнотичными ядрами (рис. 1, г). В поверхностном коллагеново-эластическом слое сохранялись нормальная клеточность и единично расположенные фибробласты, фиброциты (рис. 1, д), отмечено увеличение оптических пустот между волокнами. В глубоком коллагеново-эластическом слое сосуды — с утолщенными стенками и стенозом (рис. 1, е).

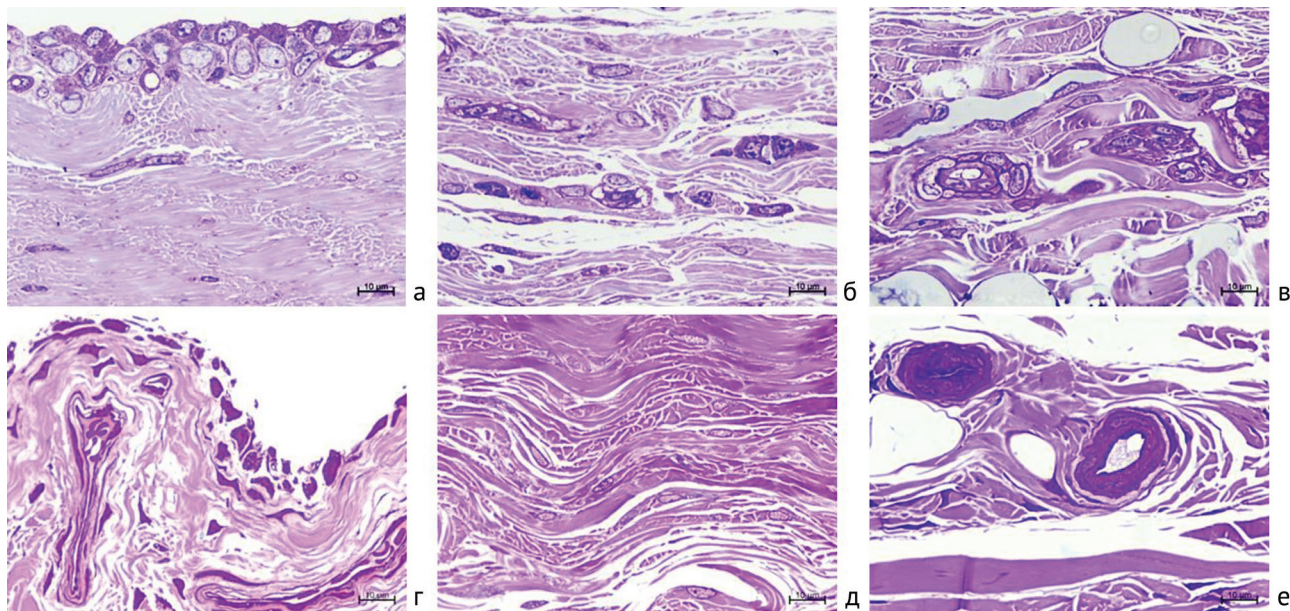


Рис.1. Синовиальная оболочка коленного сустава. Срок эксперимента: а, б, в — шесть месяцев; г, д, е — 12 месяцев. В покровном слое преобладают макрофагоподобные синовиоциты (а), деструктивно измененные синовиоциты (г). В верхнем коллагеново-эластическом слое фибробласты, фиброциты, тучные и плазматические клетки (б), фиброциты (д). Изменения сосудов в глубоком коллагеново-эластическом слое (в, е). Полутонкие срезы. Окраска метиленовым синим и основным фуксином. Увеличение $\times 1000$

Структурная реорганизация суставного хряща

Суставной хрящ мыщелков большеберцовой кости в эксперименте, как и в контроле, сохранял зональное строение, четко определялись все зоны хряща. В поверхностной зоне через шесть месяцев эксперимента в большей части наблюдений отмечено уменьшение доли клеточного компонента и увеличение доли бесклеточных полей, нарушение гомогенности межклеточного вещества (рис. 2, б). Через 12 месяцев эксперимента в одном наблюдении из трех отмечена инвазия синовиального паннуса в поверхностную зону хряща, пустые клеточные лакуны (рис. 2, в).

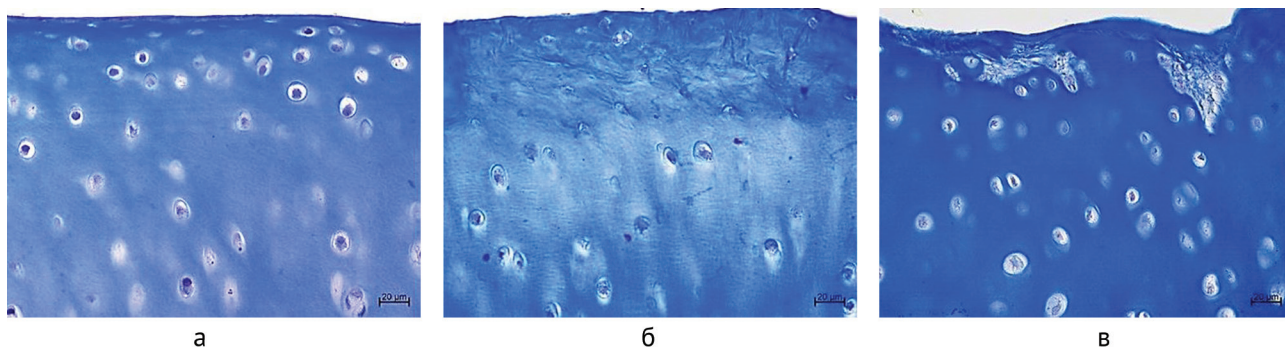


Рис. 2. Поверхностная и часть промежуточной зоны латерального мыщелка большеберцовой кости: а — контроль (интактная норма); б — шесть месяцев эксперимента, демаскировка коллагеновых волокон, бесклеточные поля в поверхностной и промежуточной зонах; в — 12 месяцев эксперимента, прорастание синовиального паннуса. Парафиновые срезы, окраска трехцветным методом по Массону. Увеличение $\times 400$

На протяжении всего эксперимента в промежуточной и глубокой зонах сохранена цитоархитектоника, отмечены бесклеточные поля, часть клеток — с признаками хондроптоза. Регистрировали участки нарушения непрерывности базофильной линии и инвазию сосудов и костно-мозгового паннуса в глубокую зону некальцифицированного хряща (рис. 3). Частота встречаемости сосудов в глубокой зоне через шесть месяцев эксперимента составила $(0,35 \pm 0,02)$, через 12 месяцев — $(0,30 \pm 0,02)$, различия статистически незначимы ($p = 0,736$).

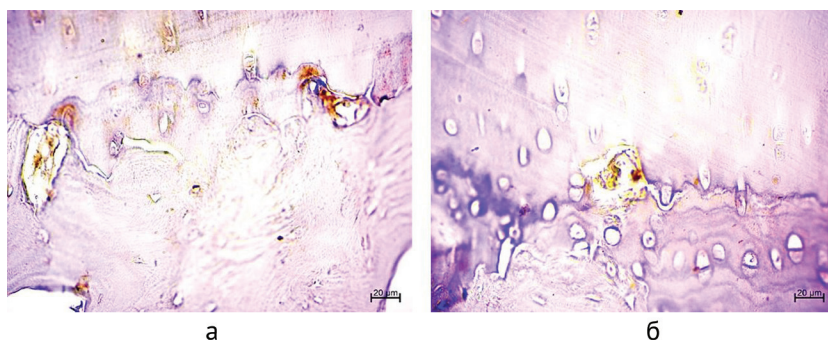


Рис. 3. Экспрессия CD34 в эндотелии сосудов (коричневый цвет осадка). Нарушение непрерывности базофильной линии, инвазия сосудов в глубокую зону хряща: а — шесть месяцев эксперимента; б — 12 месяцев эксперимента. Парафиновые срезы. Увеличение $\times 400$

Структурная реорганизация субхондральной зоны

У интактных животных (контроль) субхондральная костная пластинка — неравномерной толщины, непрерывна, в костном матриксе при окрашивании трехцветным методом по Массону преобладали фуксинофильные структуры (рис. 4, а). В экспериментальной серии толщина субхондральной костной пластинки варьировала, в шесть месяцев эксперимента чаще выявляли участки истончения, в 12 месяцев эксперимента — участки утолщения. При окраске трехцветным методом по Массону через шесть месяцев отмечали снижение доли фуксинофильных структур (рис. 4, б), а через 12 месяцев доля фуксинофильных структур вновь возрастала (рис. 4, в), что косвенно свидетельствовало о повышении минерализации костного матрикса.

На протяжении всего эксперимента регистрировали участки субхондральной костной пластинки, выстланные активными остеобластами, продуцирующими основное вещество (рис. 4, б, в).

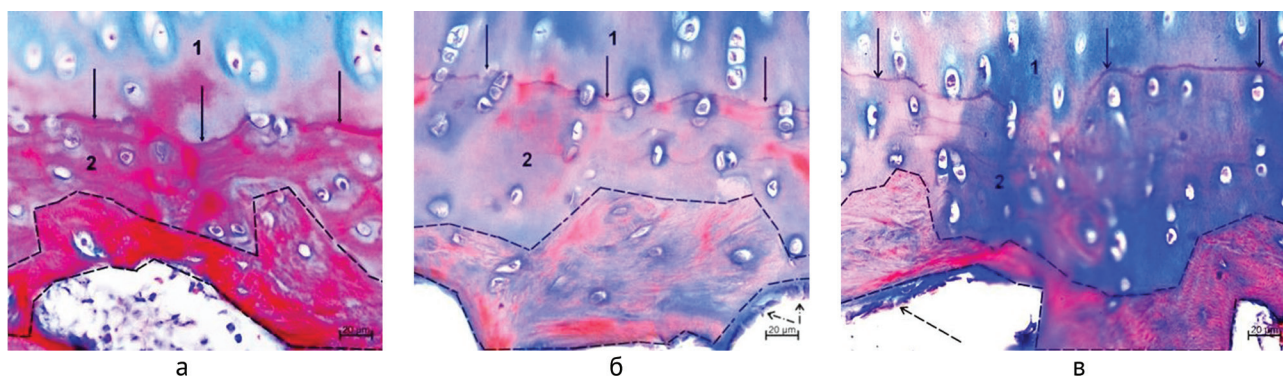


Рис. 4. Контакт кальцифицированного хряща с субхондральной костной пластинкой: а — контроль; б — шесть месяцев эксперимента; в — 12 месяцев эксперимента. Обозначения: 1 — глубокая зона некальцифицированного хряща; 2 — кальцифицированный хрящ; пунктирная линия — границы субхондральной костной пластинки; сплошные стрелки — базофильная линия; пунктирные стрелки — остеобласты. Парафиновые срезы. Окраска трехцветным методом по Массону. Увеличение $\times 400$

В субхондральной трабекулярной кости на всех этапах эксперимента отмечены признаки репаративного остеогенеза, — активные остеобласты, выстилающие поверхности костных трабекул (рис. 5). Сеть костных трабекул — разряженная, поверхности трабекул частично выстланы остеобластами (рис. 5, а). При окрашивании трехцветным методом по Массону матрикс костных трабекул имеет преимущественно красный цвет (рис. 5, б). Костных трабекулы и субхондральная костная пластинка утолщены (рис. 5, в). На поверхности костной трабекулы присутствуют остеобласты (рис. 5, г).

Гистоморфометрический анализ через шесть месяцев эксперимента не выявил относительно контроля статистически значимых различий значений параметров толщины некальцифицированного и кальцифицированного хряща, отмечено статистически значимое снижение толщины субхондральной костной пластинки, различия значений костного индекса в субхондральной трабекулярной кости — на уровне статистической тенденции (табл. 1).

Через 12 месяцев эксперимента при сравнении с контролем регистрировали статистически значимое снижение значений толщины некальцифицированного хряща, увеличение значений толщины кальцифицированного хряща на уровне статистической тенденции. В субхондральной зоне медиана толщины субхондральной костной пластинки больше контроля на 33 %, медиана костного индекса в субхондральной трабекулярной кости на 31 %, различия с контролем — на уровне статистической тенденции, различия между сроками эксперимента статистически значимы (табл. 1).

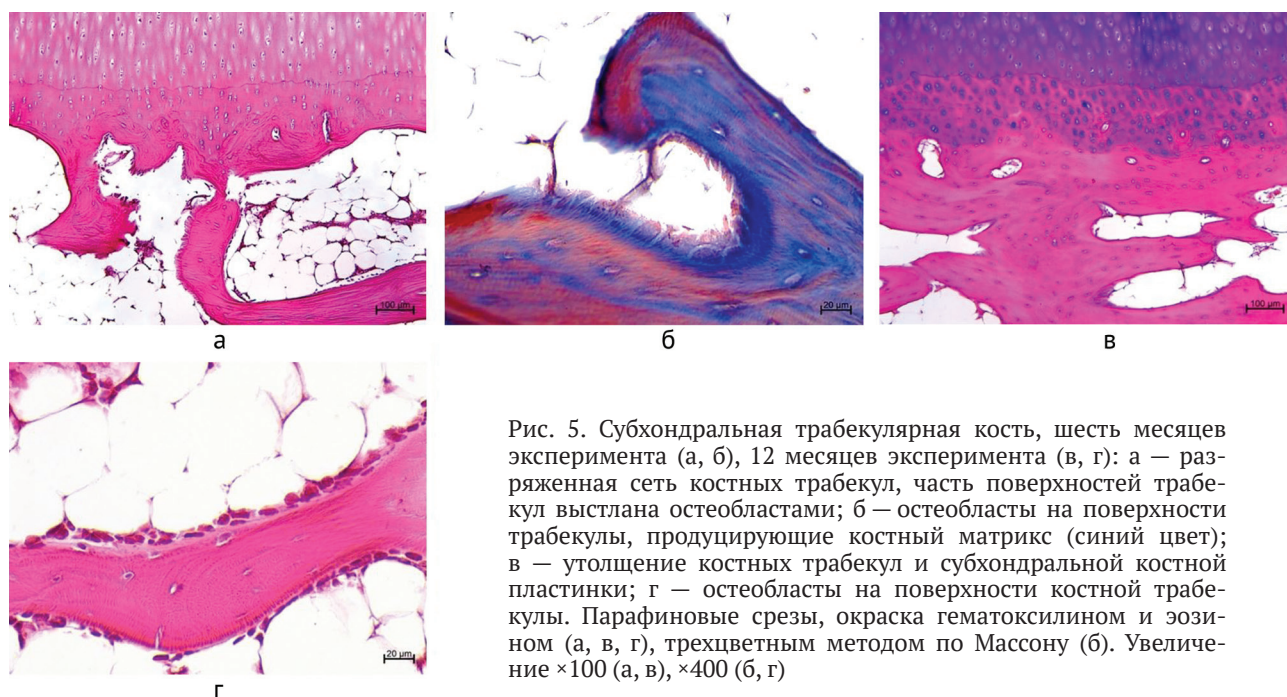


Рис. 5. Субхондральная трабекулярная кость, шесть месяцев эксперимента (а, б), 12 месяцев эксперимента (в, г): а — разреженная сеть костных трабекул, часть поверхностей трабекул выстлана остеобластами; б — остеобласты на поверхности трабекулы, продуцирующие костный матрикс (синий цвет); в — утолщение костных трабекул и субхондральной костной пластинки; г — остеобласты на поверхности костной трабекулы. Парафиновые срезы, окраска гематоксилином и эозином (а, в, г), трехцветным методом по Массону (б). Увеличение $\times 100$ (а, в, г), $\times 400$ (б, г)

Таблица 1

Гистоморфометрические характеристики суставного хряща и субхондральной зоны большеберцовой кости на этапах эксперимента и в контроле (Me (Q1; Q3) [min-max])

Параметры	Показатели		
	Контроль	6 мес. эксперимента	12 мес. эксперимента
Толщина некальцифицированного хряща ($h_{uncal.cr}$, мкм)	1,28 (1,21; 1,33) [1,16–1,66]	1,24 (1,18; 1,32) [1,15–1,79] $p = 0,5823$	1,15 (1,09; 1,18) [1,01–1,24] $p = 0,0013$; $p^1 = 0,0045$
Толщина кальцифицированного хряща ($h_{cal.cr}$, мкм)	125,93 (104,68; 135,66) [95,98–173,84]	120,34 (105,43; 129,24) [75,36–189,76] $p = 0,9081$	154,46 (132,39; 155,83) [89,14–190,83] $p = 0,0576$; $p^1 = 0,1552$
Толщина субхондральной костной пластинки ($h_{сстп}$, мкм)	144,11 (87,55; 205,31) [60,92–223,87]	97,44 (87,97; 172,96) [60,92–167,86] $p = 0,0105$	195,21 (125,77; 216,51) [69,52–284,78] $p = 0,1293$; $p^1 = 0,0068$
Толщина трабекул (TbTh, мкм)	156,47 (81,95; 234,91) [28,23–281,94]	112,91 (70,35; 140,54) [56,82–195,12] $p = 0,2801$	189,69 (163,06; 195,93) [64,36–436,09] $p = 0,0556$; $p^1 = 0,0113$
Ширина межтрабекулярных пространств (ItTh, мкм)	267,09 (175,78; 311,26) [105,65–729,22]	312,69 (176,28; 402,02) [54,13–718,13] $p = 0,9181$	216,58 (160,04; 230,24) [62,92–429,26] $p = 0,0552$; $p^1 = 0,0598$
TbTh / ItTh	0,69 (0,31; 0,75) [0,26–2,66]	0,56 (0,25; 0,73) [0,14–1,97] $p = 0,3284$	0,91 (0,48; 0,82) [0,27–2,82] $p = 0,0571$; $p^1 = 0,0261$

Примечание: p — уровень значимости отличий при сравнении с контролем, p^1 — уровень значимости отличий между сроками эксперимента по критерию Манна – Уитни, при $p \leq 0,05$. Жирным шрифтом выделены статистически значимые отличия, курсивом — отличия на уровне статистической тенденции.

При использовании морфологических шкал оценка синовиальной оболочки по шкале V. Krenn et al. [26] указывала на слабо выраженный синовит у всех животных через шесть месяцев эксперимента и в 30 % наблюдений через 12 месяцев эксперимента (в 70 % наблюдений синовит не выявлен). Структурные изменения суставного хряща по шкале OARSI [16] через шесть месяцев эксперимента в большей части наблюдений соответствовали 1 степени (в 30 % — нулевой степени), через 12 месяцев в 70 % наблюдений — 1 степени, в 30 % — 2 степени. Структурные изменения субхондральной зоны по шкале O-M. Aho et al. [17] через шесть месяцев эксперимента соответствовали нулевой степени, — «очень ранние изменения», когда субхондральный склероз отсутствует, а субхондральная костная пластинка истончена. Через 12 месяцев эксперимента увеличение медианы толщины субхондральной костной пластинки и увеличение объема трабекулярной кости свидетельствовали об очаговом субхондральном склерозе и соответствовали 1 степени (табл. 2).

Анализ результатов оценки структурных изменений компонентов сустава на этапах эксперимента

№ опытного животного	Срок эксперимента	Показатели		
		Шкала V. Krenn et al., баллы	Шкала OARSI, степень	Шкала O-M Aho et al., степень
1	6 мес.	2	0	0
2	6 мес.	2	1	0
3	6 мес.	3	1	0
4	12 мес.	2	2	1
5	12 мес.	1	1	1
6	12 мес.	1	1	1

ОБСУЖДЕНИЕ

В выполненном исследовании впервые проведена комплексная оценка структурной реорганизации основных компонентов сустава при экзопротезировании смежного сегмента конечности имплантатом с кальций-фосфатным покрытием в отдаленные сроки после протезирования.

Согласно современным представлениям, первоначальные изменения при остеоартрите, возникающие при макро- или микроповреждениях, происходят на молекулярном уровне, активируют патологические адаптивные восстановительные ответы, включая провоспалительные пути иммунной системы [27]. Известно, что синовиальная среда при остеоартрите характеризуется гиперплазией синовиальной оболочки, формированием синовиального паннуса, увеличением представительства макрофагоподобных синовиоцитов, повышенной инфильтрацией иммунных клеток. М1-поляризованные макрофаги и активированные фибробластоподобные синовиоциты и фибробласты продуцируют провоспалительные цитокины, которые, в свою очередь, отвечают за повышенный синтез и экспрессию матриксных металлопротеиназ, разрушающих суставной хрящ [28, 29]. Одновременно с изменениями в хряще регистрируют структурные изменения в подлежащей субхондральной зоне, склероз субхондральной кости, обширное ремоделирование трабекул, образование очагов некроза и остеофитов в краевых участках сустава [30].

Как показало данное исследование, через шесть месяцев после протезирования в смежном суставе в большей части наблюдений выявлен слабо выраженный синовит, который выражался гиперплазией кровяного слоя, увеличением представительства макрофагоподобных синовиальных клеток, наличием в субсиновиальном слое плазматических и тучных клеток. На протяжении всего эксперимента регистрировали гистологические признаки нарушения кровоснабжения синовиальной оболочки (сужение просветов сосудов микроциркуляторного русла). Слабо выраженный синовит, выявленный в шесть месяцев эксперимента, через 12 месяцев в большей части наблюдений имел обратимый характер (сохранялся в одном наблюдении и сопровождался инвазией синовиального паннуса в поверхностную зону суставного хряща).

Гистологические признаки воспаления синовиальной оболочки в данных условиях эксперимента характерны для неинфекционного синовита [26] и могут быть обусловлены повреждением нервных волокон и/или нарушением биомеханики сустава.

При изучении биомеханических факторов остеоартрита коленного сустава E.R. Esposito et al. показали, что у пациентов с транстибиальной ампутацией повышен риск развития данного заболевания [31].

Воспаление и нарушение кровоснабжения синовиальной оболочки оказывают негативное влияние на структуру суставного хряща посредством нескольких механизмов, включая высвобождение воспалительных медиаторов, нарушение транспорта питательных веществ и вывода продуктов обмена веществ посредством диффузии [32].

На протяжении всего эксперимента отмечено вращение сосудов со стороны субхондральной зоны в глубокую зону некальцифицированного хряща. Проникновение кровеносных сосудов в хрящ является патологическим процессом, который может привести к его разрушению и замещению фиброзной и/или костной тканью. Антиангиогенные факторы, вырабатываемые хондроцитами, помогают предотвратить этот процесс. Установлено, что тяжесть повреждения суставного хряща коррелирует с количеством вновь образованных кровеносных сосудов [33, 34].

Гистоморфометрически к концу эксперимента зарегистрировано статистически значимое относительно контроля снижение значений толщины некальцифицированного хряща, при этом статистически значимо больше были значения толщины кальцифицированного хряща. В субхондральной зоне значения морфометрируемых параметров широко варьировали как в контроле, так и на протяжении всего эксперимента. К концу эксперимента медианы параметров «толщина субхондральной костной пластинки», «костный индекс в субхондральной трабекулярной кости» были больше контроля. Обнаруженная разница значений параметров толщины субхондральной костной пластинки и костного ин-

декса субхондральной зоны по сравнению с контролем не является статистически значимой, но имеет тенденцию к проявлению ($p < 0,1$), что требует проведения дальнейших исследований большего размера выборки для подтверждения или опровержения этой тенденции.

При окраске трехцветным методом по Массону в субхондральной костной пластинке и субхондральной трабекулярной кости преобладали фуксинофильные структуры, поверхности костных трабекул выстилали активные остеобласты, что косвенно свидетельствовало о положительном влиянии кальций-фосфатного покрытия имплантата на процессы репаративного остеогенеза и минерализацию костного матрикса.

Субхондральный склероз при остеоартрите является результатом компенсаторно-адаптационных реакций в ответ на снижение минерализации костного матрикса, направленных на поддержание структуры гиалинового хряща при механической нагрузке и предотвращение его дальнейшей деструкции [35, 36]. Ключевым фактором остеоартрита является не сам субхондральный склероз, а усиленное ремоделирование костной ткани, снижение минерализации костного матрикса [35, 37]. Выявленные в данном исследовании гистологические признаки воспаления и нарушения кровоснабжения синовиальной оболочки, инвазия синовиального паннуса в поверхностную зону хряща, истончение суставного хряща, проникновение сосудов в глубокую зону некальцифицированного хряща со стороны субхондральной зоны являются прогностическими гистологическими маркерами остеоартрита.

Полученные знания о структурной реорганизации основных компонентов смежного с протезом сустава в отдаленные сроки после протезирования имеют большое значение для разработки оптимальной терапевтической стратегии, направленной на замедление прогрессирования остеоартрита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Структурные изменения костно-хрящевого компонента большеберцового плато через год после протезирования голени имплантатом с кальций-фосфатным покрытием соответствовали начальной стадии остеоартрита. Неинфекционный синовит слабой степени выраженности в большей части наблюдений имел обратимый характер. Применение имплантатов с кальций-фосфатным покрытием способствовало активации процессов репаративного остеогенеза и минерализации костного матрикса в субхондральной зоне.

Конфликт интересов. Не заявлен.

Источник финансирования. Работа поддержана программой МЗ РФ в рамках государственного задания ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. акад. Г.А. Илизарова» для выполнения НИР на 2024–2026 гг.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Li Y, Felländer-Tsai L. The bone anchored prostheses for amputees - Historical development, current status, and future aspects. *Biomaterials*. 2021;273:120836. doi: 10.1016/j.biomaterials.2021.120836.
- Hoellwarth JS, Tetsworth K, Rozbruch SR, et al. Osseointegration for Amputees: Current Implants, Techniques, and Future Directions. *JBJS Rev*. 2020;8(3):e0043. doi: 10.2106/JBJS.RVW.19.00043.
- Wnuk-Scardaccione A, Bilski J. Breaking Barriers-The Promise and Challenges of Limb Osseointegration Surgery. *Medicina (Kaunas)*. 2025;61(3):542. doi: 10.3390/medicina61030542.
- Stock L, Seyboldt LF, Wilkens P, Braatz F. Osseointegration in amputation surgery : Representative studies. *Unfallchirurgie (Heidelb)*. 2025;128(4):248-255. (In German) doi: 10.1007/s00113-025-01542-5.
- Синегуб А.В., Коваленко Д.А., Чупряев В.А. и др. Осложнения при использовании остеоинтегративных экзопротезов и сравнение качества жизни пациентов при различных системах протезирования: обзор литературы. *Травматология и ортопедия России*. 2025;31(2):178-189. doi: 10.17816/2311-2905-17663.
- Örgel M, Schwarze F, Graulich T, et al. Comparison of functional outcome and patient satisfaction between patients with socket prosthesis and patients treated with transcutaneous osseointegrated prosthetic systems (TOPS) after transfemoral amputation. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2022;48(6):4867-4876. doi: 10.1007/s00068-022-02018-6.
- Tropf JG, Potter BK. Osseointegration for amputees: Current state of direct skeletal attachment of prostheses. *Orthoplast Surg*. 2023;12:20-28. doi: 10.1016/j.orthop.2023.05.004.
- Tereshenko V, Giorgino R, Eberlin KR, et al. Emerging Value of Osseointegration for Intuitive Prosthetic Control after Transhumeral Amputations: A Systematic Review. *Plast Reconstr Surg Glob Open*. 2024;12(5):e5850. doi: 10.1097/GOX.0000000000005850.
- Mortazavi SMJ, Abbaspour A, Seyedtabaei SMM, et al. Improving quality of life for transfemoral amputees: results from a two-year study of the OPRA implant system and rehabilitation protocol. *Eur J Orthop Surg Traumatol*. 2025;35(1):85. doi: 10.1007/s00590-025-04221-8.
- Hou C, An J, Zhao D, et al. Surface Modification Techniques to Produce Micro/Nano-scale Topographies on Ti-Based Implant Surfaces for Improved Osseointegration. *Front Bioeng Biotechnol*. 2022;10:835008. doi: 10.3389/fbioe.2022.835008.
- Pettersen E, Anderson J, Ortiz-Catalan M. Electrical stimulation to promote osseointegration of bone anchoring implants: a topical review. *J Neuroeng Rehabil*. 2022;19(1):31. doi: 10.1186/s12984-022-01005-7.
- Łosiewicz B, Osak P, Nowińska D, Maszybrocka J. Developments in dental implant surface modification. *Coatings*. 2025;15(1):109. doi: 10.3390/coatings15010109.
- Ziegelmeyer T, Martins de Sousa K, Liao TY, et al. Multifunctional micro/nano-textured titanium with bactericidal, osteogenic, angiogenic and anti-inflammatory properties: Insights from *in vitro* and *in vivo* studies. *Mater Today Bio*. 2025;32:101710. doi: 10.1016/j.mtbio.2025.101710.
- Korytkin AA, Orlinskaya NY, Novikova YS, et al. Biocompatibility and Osseointegration of Calcium Phosphate-Coated and Non-Coated Titanium Implants with Various Porosities. *Sovrem Tekhnologii Med*. 2021;13(2):52-57. doi: 10.17691/stm2021.13.2.06.
- Стогов М.В., Еманов А.А., Кузнецов В.П., и др. Влияние цинксодержащего кальций-фосфатного покрытия на остеоинтеграцию чрескожных имплантатов для протезирования конечностей. *Гений ортопедии*. 2024;30(5):677-686. doi: 10.18019/1028-4427-2024-30-5-677-686.

16. 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.
17. Aho O-M, Finnila M, Thevenot J, et al. Subchondral bone histology and grading in osteoarthritis. *PLoS One*. 2017;12(3):e0173726. doi: 10.1371/journal.pone.0173726.
18. Ступина Т.А., Еманов А.А., Кузнецов В.П., Овчинников Е.Н. Оценка риска развития остеоартроза коленного сустава при протезировании голени (пилотное экспериментально-морфологическое исследование). *Гений ортопедии*. 2021;27(6):795-799. doi: 10.18019/1028-4427-2021-27-6-795-799.
19. Ступина Т.А., Еманов А.А., Кузнецов В.П., Овчинников Е.Н. Ремоделирование суставного хряща и субхондральной зоны большеберцовой кости при экзопротезировании конечности. *Гений ортопедии*. 2025;31(3):341-349. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-3-341-349.
20. Bowker HK, Michael JW. *Atlas of Limb Prosthetics: Surgical, Prosthetic, and Rehabilitation Principles*. St. Louis: Mosby Year Book; 1992:930
21. Суляев В.Г., Щербина К.К., Смирнова Л.М. и др. Ранняя протезно-ортопедическая помощь как основа медицинской реабилитации детей с врожденными и ампутированными дефектами нижних конечностей. *Гений ортопедии*. 2020;26(2):198-205. doi: 10.18019/1028-4427-2020-26-2-198-205.
22. Mathiessen A, Conaghan PG. Synovitis in osteoarthritis: current understanding with therapeutic implications. *Arthritis Res Ther*. 2017;19(1):18. doi: 10.1186/s13075-017-1229-9.
23. Кузнецов В.П., Горгоц В.Г., Анникеев А.В. и др. *Имплантат культуры трубчатой кости*. Патент РФ на полезную модель № 194912. 30.12.2019, Бюл. № 1. Доступно по: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=194912&TypeFile=html. Ссылка активна на 16.01.2026.
24. Кузнецов В.П., Губин А.В., Горгоц В.Г. и др. *Устройство для остеоинтеграции имплантата в кость культуры нижней конечности*. Патент РФ на полезную модель № 185647. 13.12.2018. Бюл. № 35. Доступно по: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=185647&TypeFile=html. Ссылка активна на 16.01.2026.
25. Zhang C, Yan B, Cui Z, et al. Bone regeneration in minipigs by intrafibrillarly-mineralized collagen loaded with autologous periodontal ligament stem cells. *Sci Rep*. 2017;7(1):10519. doi: 10.1038/s41598-017-11155-7
26. Krenn V, Morawietz L, Burmester GR, et al. Synovitis score: discrimination between chronic low-grade and high-grade synovitis. *Histopathology*. 2006;49(4):358-364. doi: 10.1111/j.1365-2559.2006.02508.x.
27. Алексеева Л.И., Таскина Е.А., Кашеварова Н.Г. Остеоартрит: эпидемиология, классификация, факторы риска и прогрессирования, клиника, диагностика, лечение. *Современная ревматология*. 2019;13(2):9-21. doi: 10.14412/1996-7012-2019-2-9-21.
28. Раймуев К.В., Ищенко А.М., Малышев М.Е. Провоспалительные и противовоспалительные цитокины в патогенезе остеоартрита. *Вестник Северо-Западного государственного медицинского университета им. И.И. Мечникова*. 2018;10(3):19-27. doi: 10.17816/mechnikov201810319-27.
29. Дыдыкина И.С., Арутюнова Е.В., Коваленко П.С. и др. Синовит при остеоартрите: современное состояние проблемы. *Современная ревматология*. 2021;15(2):120-125. doi: 10.14412/1996-7012-2021-2-120-125.
30. Donell S. Subchondral bone remodelling in osteoarthritis. *EFORT Open Rev*. 2019;4(6):221-229. doi: 10.1302/2058-5241.4.180102.
31. Russell Esposito E, Wilken JM. Biomechanical risk factors for knee osteoarthritis when using passive and powered ankle-foot prostheses. *Clin Biomech (Bristol)*. 2014;29(10):1186-1192. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2014.09.005.
32. van der Kraan PM. The Interaction between Joint Inflammation and Cartilage Repair. *Tissue Eng Regen Med*. 2019;16(4):327-334. doi: 10.1007/s13770-019-00204-z.
33. Fransès RE, McWilliams DF, Mapp PI, Walsh DA. Osteochondral angiogenesis and increased protease inhibitor expression in OA. *Osteoarthritis Cartilage*. 2010;18(4):563-571. doi: 10.1016/j.joca.2009.11.015.
34. Zhao Z, Sun X, Tu P, et al. Mechanisms of vascular invasion after cartilage injury and potential engineering cartilage treatment strategies. *FASEB J*. 2024;38(6):e23559. doi: 10.1096/fj.202302391RR.
35. Cox LG, van Donkelaar CC, van Rietbergen B, et al. Decreased bone tissue mineralization can partly explain subchondral sclerosis observed in osteoarthritis. *Bone*. 2012;50(5):1152-1161. doi: 10.1016/j.bone.2012.01.024.
36. Stewart HL, Kawcak CE. The Importance of Subchondral Bone in the Pathophysiology of Osteoarthritis. *Front Vet Sci*. 2018;5:178. doi: 10.3389/fvets.2018.00178.
37. Goetzen M, Hofmann-Fliri L, Arens D. et al. Subchondral screw abutment: does it harm the joint cartilage? An *in vivo* study on sheep tibiae. *Int Orthop*. 2017;41(8):1607-1615. doi: 10.1007/s00264-017-3404-7.

Статья поступила 17.12.2025; одобрена после рецензирования 23.12.202; принята к публикации 09.02.2026.

The article was submitted 17.12.2025; approved after reviewing 23.12.202; accepted for publication 09.02.2026.

Информация об авторах:

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

Андрей Александрович Еманов — кандидат ветеринарных наук, ведущий научный сотрудник, a_eman@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2890-3597>;

Виктор Павлович Кузнецов — доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией, wpkuzn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8949-6345>.

Information about the authors:

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

Andrey A. Emanov — Candidate of Veterinary Sciences, Leading Researcher, a_eman@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2890-3597>;

Viktor P. Kuznetsov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Laboratory, wpkuzn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8949-6345>.

Научная статья

УДК 616.596-007.44-089.81

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2026-32-2-254-261>

Обеспечение дозированного и адаптивного натяжения в коррекции деформаций ногтя: новая методика на основе стальной проволоки и эластичных компонентов

Д.О. Розов

Салон красоты RoziRoz, Апатин, Сербия

✉ Дмитрий Олегович Розов, droziroz@gmail.com**Аннотация**

Введение. Деформации ногтевой пластины относятся к числу наиболее распространённых патологий в подологии, затрагивающих 15–20 % населения в различные периоды жизни. Эти состояния не только вызывают хронический болевой синдром, но и повышают риск инфекционных осложнений, существенно ограничивая повседневную активность пациентов. Сохраняется потребность в малоинвазивных и экономически доступных решениях. Ключевое отличие предложенной методики от аналогов заключается в замене жёстких проволочных элементов на эластичные компоненты, что позволяет обеспечить дозированное, адаптивное натяжение ногтевой пластины при сохранении стабильности фиксации.

Цель работы — определить эффективность малоинвазивной методики коррекции деформаций ногтевой пластины с применением комбинации стальной проволоки и элементов из эластичных ортодонтических цепочек из медицинского полиуретана (эластофорс) или никель-титанового металлического сплава в виде нитиноловых пружин для обеспечения дозированного и адаптивного натяжения.

Материалы и методы. Разработанная методика предусматривает создание индивидуальных коррекционных систем на основе стальной проволоки и выбранного активного элемента. Системы фиксируют к ногтевой пластине с помощью крючков, обеспечивая постоянное контролируемое натяжение. В исследование включены пациенты с различными видами деформаций ногтей, исключая пациентов с острыми воспалительными процессами. Использованы стандартные инструменты для ортониксии, а также эластичные элементы (эластофорс и никель-титановые пружины). Результаты оценивали измерением ширины ногтевой пластины и силы натяжения каждые две недели на протяжении двух месяцев.

Результаты и обсуждение. Методика продемонстрировала высокую эффективность в коррекции различных видов деформаций ногтей, ширина ногтевой пластины увеличивалась от 2 мм до 4,1 мм за восемь недель. Методика — малоинвазивна и не вызывает дискомфорта у пациентов. Эластичные элементы обеспечивают мягкое и комфортное воздействие на ноготь, не влияя на работоспособность пациента и повседневную деятельность. Методика — универсальна, применима для различных типов деформаций. Перспективы дальнейших исследований: внедрение адгезивных платформ для равномерного распределения давления; исследование альтернативных сплавов (титан-молибден, кобальт-хром); оптимизация фиксации эластофорса без использования проволоки.

Заключение. Предложенная методика демонстрирует высокую эффективность при коррекции деформаций ногтевой пластины, сочетая малоинвазивность, адаптивность и эстетичность. Результаты открывают перспективы для внедрения в клиническую практику с акцентом на персонализацию лечения.

Ключевые слова: ортониксия, деформации ногтей, вросший ноготь, коррекционные системы, подология, эластофорс, нитинол

Для цитирования: Розов Д.О. Обеспечение дозированного и адаптивного натяжения в коррекции деформаций ногтя: новая методика на основе стальной проволоки и эластичных компонентов. *Гений ортопедии*. 2026;32(2):254-261. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-2-254-261.

Original article

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2026-32-2-254-261>



Gradual correction of nail deformity with adjustable tension: a new technique using steel wire and elastic components

D.O. Rozov

RoziRoz Beauty Salon, Apatin, Serbia

✉ Dmitry O. Rozov, droziroz@gmail.com

Abstract

Introduction Nail deformity is a common condition in podiatry, affecting 15–20 % of the population at different stages of their life. The disorder can cause chronic pain with a greater risk of infectious complications and significant limitations in activities of daily living. Minimally invasive and affordable solutions are needed for the problem. The key difference between the technique proposed and similar approaches lies in a rigid wire to be replaced with elastic components to allow adjustable gradual nail tensioning and stable fixation.

The **objective** was to determine the effectiveness of a minimally invasive technique using a steel wire combined with elements of elastic orthodontic chains made of medical polyurethane (elastofors) or nickel-titanium metal alloy in the form of nitinol springs to provide adjustable gradula tension for nail deformity correction.

Material and methods The method suggests creating customized corrective systems based on a steel wire and a selected active element. The systems are secured to the nail with hooks, ensuring constant, controlled tension. The study included patients with various types of nail deformities, excluding those with acute inflammatory processes. Standard orthonyxia instruments and elastic elements (Elastofors and nickel-titanium springs) were used. Results were assessed by measuring the nail width and tension force every two weeks for two months.

Results and discussion The technique demonstrated high efficacy in correcting different types of nail deformities, with the nail width increasing from 2 mm to 4.1 mm over eight weeks. The technique is minimally invasive and causes no discomfort to patients. Elastic elements provide a gentle and comfortable pressure on the nail without affecting the patient's ability to function or perform daily activities. The technique is universal and applicable to different types of deformities. Prospects for further research might include introduction of adhesive platforms for uniform pressure distribution; the study of alternative alloys (titanium-molybdenum, cobalt-chromium) and optimization of wire-free Elastofors fixation.

Conclusion The technique was shown to be effective in the nail deformity correction, combining minimal invasiveness, adaptability and aesthetics. The results offer potential for implementation in clinical practice with an emphasis on personalized treatment.

Keywords: orthonyxia, nail deformity, ingrown toenail, correction systems, podology, Elastoforce, nitinol

For citation: Rozov DO. Gradual correction of nail deformity with adjustable tension: a new technique using steel wire and elastic components. *Genij Ortopedii*. 2026;32(2):254-261. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-2-254-261.

ВВЕДЕНИЕ

Деформации ногтевой пластины, такие как онихокриптоз, онихогрифоз и поперечная/продольная искривлённость, относятся к числу наиболее распространённых патологий в подологии, затрагивающих 15–20 % населения в различные периоды жизни [1]. Эти состояния не только вызывают хронический болевой синдром, но и повышают риск инфекционных осложнений, что существенно ограничивает повседневную активность пациентов [2]. Несмотря на широкий спектр методов коррекции вросших ногтей, от консервативных (тампонада, ортониксия с использованием скоб) до хирургических (резекция с фенолизацией матрикса), сохраняется потребность в малоинвазивных и экономически доступных решениях [2, 3]. Это связано с высокой частотой рецидивов (до 70 % при консервативном лечении) и послеоперационных осложнений [3].

Одним из перспективных направлений является ортониксия — нехирургическая коррекция деформаций ногтей с помощью механических систем. Метод коррекции вросшего ногтя с использованием металлических скоб берёт начало в середине XX века. Один из первых примеров — скоба Фрезера (*англ.*: Fraser brace), разработанная в 1940-х годах. Однако документальные подтверждения её авторства и даты создания ограничены, так как патентные записи и публикации того периода не содержат прямых ссылок на Росса Фрезера. Современные источники чаще связывают популяризацию метода с работами подологов 1960–1970-х годов. Современные методики, такие как ЗТО (трехкомпонентная точечная ортониксия), основаны на комбинации опорных элементов и проволоки для создания направленного натяжения [4].

Ключевое отличие предложенной в данной работе методики от аналогов, таких как ЗТО, заключается в замене жёстких проволочных элементов на эластичные компоненты, что позволяет обеспечить дозированное, адаптивное натяжение ногтевой пластины при сохранении стабильности фиксации.

Цель работы — определить эффективность малоинвазивной методики коррекции деформаций ногтевой пластины с применением комбинации стальной проволоки и элементов из эластичных ортодонтических цепочек из медицинского полиуретана (эластофорс) или никель-титанового металлического сплава в виде нитиноловых пружин для обеспечения дозированного и адаптивного натяжения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследование включены шесть пациентов (возраст 40–60 лет, женского пола) с деформациями ногтевой пластины и степенью врастания не выше I степени по классификации Mozena [5].

Критерии включения: наличие искривлений ногтевой пластины, отсутствие противопоказаний к ортониксии.

Критерии невключения: острые воспалительные процессы в области ногтевого ложа (паронихия, панариций), онихомикоз в активной стадии, системные заболевания (например, сахарный диабет с признаками диабетической стопы).

Все пациенты проинформированы о целях и методике исследования и дали письменное согласие на публикацию результатов.

Инструменты и материалы

Для реализации методики использовали следующий набор инструментов и материалов:

- стальная проволока диаметром 0,4 мм — базовый элемент фиксации, обеспечивающий стабильность конструкции;
- инструменты для работы с проволокой:
 - кусачки для проволоки — резка и подгонка длины;
 - круглогубцы — формирование петель и изгибов;
 - иглодержатель — точная установка элементов;
- адгезивные материалы:
 - адгезив — для подготовки поверхности ногтевой пластины перед нанесением композита;
 - светоотверждаемый вязкотекучий композит — фиксация активных элементов;
 - полимеризационная лампа (длина волны 420–480 нм) — активация композита;
- подготовка ногтевой пластины:
 - кусачки для педикюра;
 - фреза с алмазным напылением.

Активный элемент

В качестве активных элементов в предложенной методике использовали эластофорс (чейн) и закрытые пружины из никель-титанового сплава. Выбор этих материалов обусловлен их доказанной эффективностью в ортодонтии и доступностью [6, 7, 8]. Для пружин выбраны следующие параметры: диаметр — 0,3556 мм (0,014 дюйма), длина варьировалась от 3 до 4 мм в зависимости от индивидуальных потребностей пациента.

Использование эластичных элементов позволило обеспечить плавное и контролируемое воздействие на ногтевую пластину, минимизируя риск травматизации и гиперкоррекции. Подбор конкретного типа активного элемента осуществлял подолог с учетом индивидуальных особенностей деформации ногтя и требуемой силы коррекции.

Принцип крепления. Обе коррекционные системы фиксируют к латеральным краям ногтевой пластины посредством крючков, изготовленных из стальной проволоки. Конструкция обеспечивает равномерное распределение нагрузки в точках крепления за счёт симметричного расположения элементов и использования эластичных элементов.

Принцип корректирующего воздействия. Коррекция достигается за счёт комбинированного действия рычага и эластичного элемента. Рычажный механизм, создаваемый изогнутой проволокой, усиливает направленное воздействие, а эластичный компонент (эластофорс / нитиноловая пружина) обеспечивает дозированное и адаптивное натяжение по мере изменения ногтевой пластины.

Принцип контролируемости воздействия на ногтевую пластину до установки коррекционной системы. Сила воздействия на ногтевую пластину может регулироваться подологом при установке коррекционной системы за счет контролируемого натяжения пластичных элементов. Измерение силы натяжения может производиться с помощью стоматологического динамометра.

Метод установки коррекционной системы

Для создания коррекционной системы использовали стальную проволоку, из которой формировали два крючка. Крючки фиксировали под ногтевой пластиной с двух сторон, при этом длину проволоки и угол ее изгиба подбирали таким образом, чтобы создать рычажный механизм. В точке приложения силы на каждой проволоке формировали дополнительное звено для надежного крепления активного элемента (рис. 1). Свободные концы проволоки минимизировали для предотвращения излишнего натяжения и возможных повреждений ногтевой пластины во время установки активного элемента.

Силу натяжения эластофорса регулировали путем выбора необходимого количества звеньев цепочки и использования нескольких слоев эластофорса для достижения необходимой силы натяжения при малой длине активного элемента. Для пружин силу натяжения подбирали варьированием длины, диаметра и непосредственно силы натяжения при установке. Важно было соблюдать баланс: избыточное натяжение могло привести к обратной деформации ногтя или его отслоению от ногтевого ложа.

Точку соединения активного элемента и стальной проволоки фиксировали небольшим количеством светоотверждаемого композитного материала для обеспечения надежности конструкции. Все выступающие элементы проволоки аккуратно подрезали и шлифовали для повышения комфорта пациента.

Полный цикл установки одной коррекционной системы, включая подготовку ногтевой пластины, занимал в среднем 15 минут. Для контроля эффективности коррекции и при необходимости внесения корректировок рекомендуется проводить осмотр и проводить переустановку системы каждые четыре недели.

Измерение силы натяжения осуществляли от первой точки фиксации активного элемента до второй с применением стоматологического динамометра. Поскольку показания прибора выражены в граммах, полученные значения были преобразованы в Ньютон согласно формуле $F = m \cdot g$, где m — масса в килограммах ($1 \text{ г} = 0,001 \text{ кг}$), а g — ускорение свободного падения ($\approx 9,81 \text{ м/с}^2$). Измерения ширины ногтевой пластины производили от валика до валика штангенциркулем с электронным табло.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Каждые две недели после установки коррекционных систем проводили оценку результатов лечения (табл. 1). Каждый четыре недели коррекционную систему заменяли на новую.

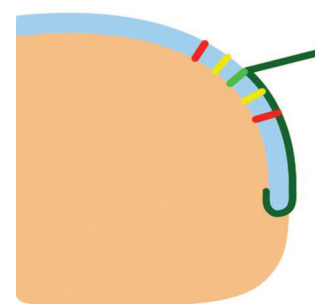


Рис. 1. Схема с указанием точек оптимального приложения силы при установке стального крючка

Таблица 1

Динамика изменения ширины ногтевой пластины и параметры коррекции

Пациент	Палец	Ширина ногтя, мм					Активный элемент		Сила натяжения, Н	
		Исходная	2 недели	4 недели	6 недель	8 недель	Исходный	2 недели	Исходная	2 недели
№ 1	Левый первый	15	16	16	17	17	Пружина 0,014 inch 3 мм	Пружина 0,014 inch 3 мм	3,434	3,434
	Правый первый	14	15,5	15,5	16	16	Пружина 0,014 inch 3 мм	Пружина 0,014 inch 3 мм	2,943	4,415
№ 2	Левый первый	14	15,5	15,5	16,5	17	Эластофорс, два слоя, две ячейки	Эластофорс, два слоя, две ячейки	1,962	2,943
№ 3	Левый первый	14	17	17	18,1	18,1	Пружина 0,014 inch 3 мм	Эластофорс, один слой, две ячейки	3,924	2,943
№ 4	Левый первый	15,5	17,9	18	19,5	19,5	Пружина 0,014 inch 4 мм	Пружина 0,014 inch 3 мм	4,905	4,905
	Правый первый	16	17,5	17,6	19	19	Пружина 0,014 inch 3 мм	Эластофорс, два слоя, две ячейки	3,924	2,453
№ 5	Левый первый	14	14,5	14,5	16	16	Пружина 0,014 inch 4 мм	Пружина 0,014 inch 3 мм	4,415	4,905
	Правый первый	14,5	15	15	16	16	Титановая нить 0,014 inch	Титановая нить 0,014 inch		
№ 6	Левый первый	14	15	15	17	17	Эластофорс, два слоя, две ячейки	Эластофорс, два слоя, две ячейки	3,924	3,434
	Правый первый	13	14,5	14,5	16,8	16,9	Эластофорс, три слоя, две ячейки	Эластофорс, два слоя, две ячейки	2,453	3,434

Для пациента № 5 на правом первом пальце использована проволока Ni-Ti в рамках контрольного протокола динамики исправления ногтевой пластины со стандартной методикой исправления с помощью проволоки Ni-Ti. Данные по силе натяжения не фиксировали.

Динамика коррекции

У всех пациентов зафиксировано увеличение ширины ногтевой пластины (от 1,5 до 4,1 мм за два месяца), что связано с устранением деформации и восстановлением физиологической формы.

Наибольший прогресс отмечен у пациентов с использованием нитиноловых пружин (пациенты № 1, № 3, № 4), — прирост ширины до 4,5 мм (рис. 2, 3, 4).

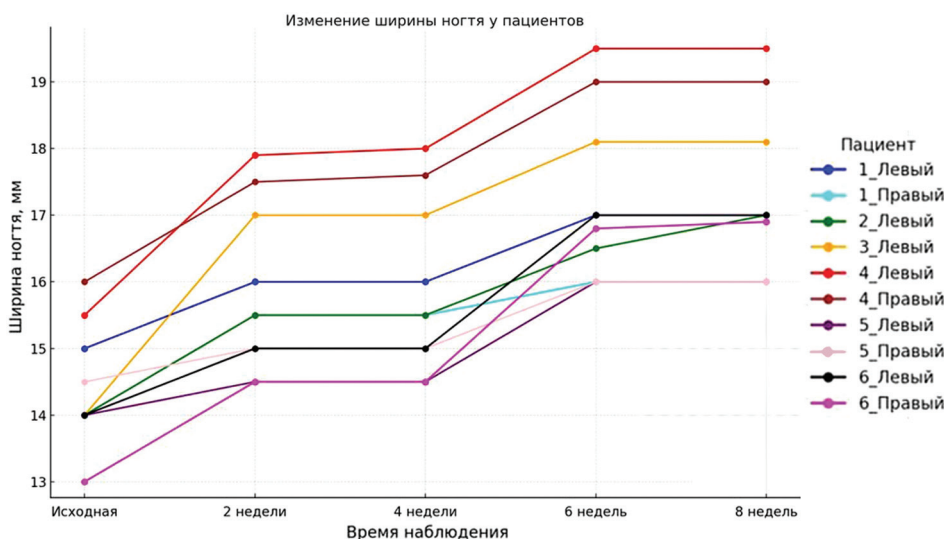


Рис. 2. График изменения ширины ногтя у пациентов

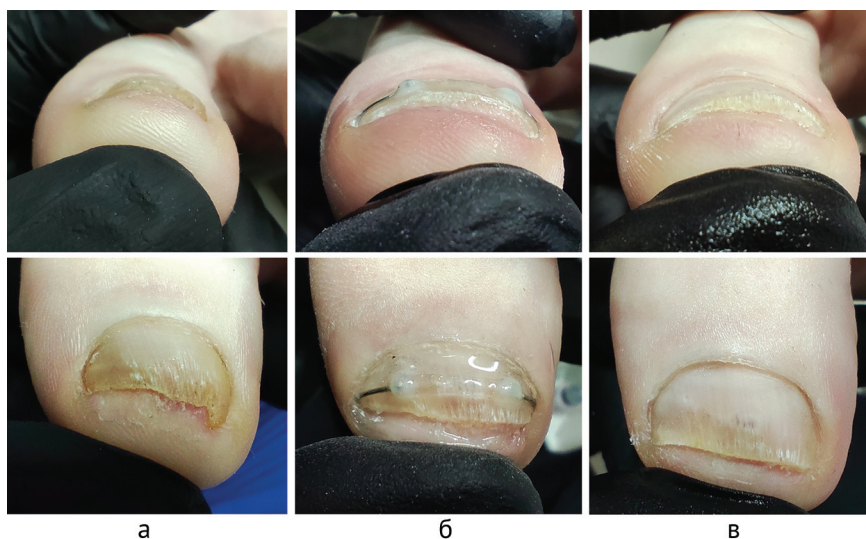


Рис. 3. Фото левого первого пальца пациента № 3, активный элемент «эластофорс», динамика: а — при первичном посещении; б — через четыре недели; в — через восемь недель



Рис. 4. Фото левого первого пальца пациента № 4, активный элемент «пружина», динамика: а — при первичном посещении; б — через четыре недели; в — через восемь недель

Использование активных элементов

При работе с тонкими и хрупкими ногтевыми пластинами использовали эластичные элементы типа «эластофорс», обеспечивающие возможность точной регулировки силы натяжения. При необходимости материал накладывали в два и более слоя, что позволяло варьировать силу натяжения.

Закрытые пружины применяли при коррекции более выраженных деформаций, что позволяло создавать значительное корректирующее усилие.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные подтверждают эффективность разработанной методики коррекции деформаций ногтевой пластины с использованием эластичных элементов (эластофорс, нитиноловые пружины). Предложенный подход сочетает преимущества традиционной ортониксии и инновационных материалов, обеспечивая персонализированное воздействие на ногтевую пластину. Сравнительный анализ ключевых аспектов представлен ниже с опорой на актуальные научные исследования.

Преимущества предложенной методики:

- Высокая эффективность при различных видах деформаций. Методика демонстрирует снижение частоты рецидивов, что согласуется с результатами исследования Н.Н. Wang и Y.C. Huang [9], в котором использование скоб для коррекции ногтей привело к успешному исходу в 89 % случаев. Важным преимуществом является адаптивность системы к анатомическим особенностям, что минимизирует риск осложнений, характерных для хирургических методов [3].
- Возможность точной регулировки силы натяжения. Использование нитиноловых пружин и эластофорса в качестве активных элементов коррелирует с трендом на индивидуализацию лечения, описанную в исследовании E. Pelant et al. [10], в котором комбинация материалов повышала адаптивность

коррекции. В отличие от стандартных скоб, таких как Podofix, у которых сила натяжения фиксирована конструкцией, предложенная методика позволяет регулировать усилие за счет варьирования длины пружин и слоев эластофорса. Это согласуется с рекомендациями С. Dressler et al., в которых 72 % опрошенных дерматологов отметили необходимость гибкой настройки силы для сложных случаев [11]. В отличие от жестких конструкций, эластичные элементы снижают риск гиперкоррекции, что критично для пациентов с истонченной ногтевой пластиной.

- Комбинация двух типов скоб улучшала стабильный рост ногтевой пластины, как в работе Н.Н. Wang et al. [12].
- Отсутствие дискомфорта подтверждается данными о 94 % удовлетворенности пациентов, использовавших неинвазивные методы коррекции [13]. Прозрачный эластофорс и малый размер систем обеспечивают эстетичность, что критично для соблюдения терапии [14].
- Отсутствие необходимости в дополнительных инструментах. Методика доступна всем специалистам, владеющим методиками установки самых популярных скоб в ортониксии (Фрейзера, ЗТО, ОРА) без необходимости приобретения специализированного инструментария. Важным преимуществом данного подхода является отсутствие потребности в дорогостоящих инвестициях в новые технические средства, что принципиально отличает его от системы UniBrace, предполагающей использование уникального инструментального комплекса [15].

Перспективы развития методики

- Улучшение фиксации. Внедрение адгезивных платформ, аналогичных используемым в дерматологических патчах, позволит распределять давление более равномерно, снижая риск отслоения композита [16].
- Оптимизация методики иммобилизации эластофорса в коррекции ногтевых структур. Разработка альтернативного подхода к фиксации эластофорса, исключающего применение стальной проволоки, на произвольных участках ногтевой пластины, может стать основой для создания инновационного протокола коррекции. Данный метод предполагает реализацию контролируемого дозированного воздействия с возможностью точной калибровки мягкого механического влияния на ногтевые ткани, что способствует минимизации травматизации и повышению эффективности терапевтического вмешательства.
- Использование альтернативных сплавов в активных элементах:
 - титан-молибденовые сплавы — высокая биосовместимость и устойчивость к коррозии [17];
 - кобальто-хромовые сплавы — повышенная прочность для коррекции гипертрофических деформаций [18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика позволяет осуществлять прецизионную настройку силы воздействия на ногтевую пластину с каждой стороны. Это достигается за счет возможности регулировки, как угла наклона рычага, так и уровня натяжения активного элемента в каждой конкретной коррекционной системе.

Отсутствие необходимости в сложных манипуляциях с проволокой существенно сокращает время изготовления индивидуальной коррекционной системы. Высокая эластичность и универсальность активных элементов позволяют применять разработанные системы для коррекции различных видов деформаций ногтевой пластины.

Конфликт интересов отсутствует.

Этические нормы. Исследование проводилось в соответствии с этическими принципами, закреплёнными в Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации (редакция 2013 г.).

Информированное согласие. Все пациенты были проинформированы о целях и методике исследования и предоставили письменное согласие на участие и публикацию результатов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Baran R, Lipner S. Diseases of the Nails. In: Karadag AS, Parish LC, Wang JV. (Eds.). *Roxburgh's Common Skin Diseases* (19th ed.). CRC Press; 2022;298–309. doi: 10.1201/9781003105268.
2. Heidelbaugh JJ, Lee H. Management of the ingrown toenail. *Am Fam Physician*. 2009;79(4):303–308.
3. Park DH, Singh D. The management of ingrowing toenails. *BMJ*. 2012;344:e2089. doi: 10.1136/bmj.e2089.
4. de Berker DAR, Baran R. Disorders of Nails. In: Burns T, Breathnach S, Cox N, Griffiths C. (Eds.). *Rook's Textbook of Dermatology*. Blackwell Publishing Ltd, Oxford, United Kingdom; 2010:1–57. doi: 10.1002/9781444317633.ch65.
5. Mozena JD. The Mozena Classification System and treatment algorithm for ingrown hallux nails. *J Am Podiatr Med Assoc*. 2002;92(3):131–135. doi: 10.7547/87507315-92-3-131.

6. Ferreira M do A, Luersen MA, Borges PC. Nickel-titanium alloys: a systematic review. *Dental Press J Orthod.* 2012;17(3):71-82.
7. Bokas J, Woods M. A clinical comparison between nickel titanium springs and elastomeric chains. *Aust Orthod J.* 2006;22(1):39-46.
8. Eliades T, Eliades G, Silikas N, Watts DC. Tensile properties of orthodontic elastomeric chains. *Eur J Orthod.* 2004;26(2):157-162. doi: 10.1093/ejo/26.2.157.
9. Wang HH, Huang YC. Risk factors for poorly controlled and recurrence-prone ingrown toenails treated with nail braces: A retrospective observational study of 238 cases. *Indian J Dermatol Venereol Leprol.* 2022;88(5):636-640. doi: 10.25259/IJDVL_529_20.
10. Liu CW, Huang YC. Combination of two types of nail brace for the treatment of complicated ingrown toenails. *Indian J Dermatol Venereol Leprol.* 2017;83(6):722-725. doi: 10.4103/ijdv.IJDVL_908_16.
11. Dressler C, Nast A, Heuer R, Löser CR. Ingrown Toenails: A Survey Among Dermatologists on Current Treatments. *Dermatol Surg.* 2024;50(3):260-266. doi: 10.1097/DSS.0000000000004060.
12. Wang HH, Yang TH, Liu CW, et al. Efficacy of Nail Braces for Acute and Chronic Ingrown Toenails: A Prospective Study. *Dermatol Surg.* 2020 Feb;46(2):258-266. doi: 10.1097/DSS.0000000000001905.
13. Abid K, Algu L, Kamran R, et al. Content Analysis of Patient-Reported Outcome Measures Used in Patients With Nail Conditions: A Systematic Review. *JAMA Dermatol.* 2021;157(12):1509-1511. doi: 10.1001/jamadermatol.2021.4539.
14. Stewart CR, Algu L, Kamran R, et al. Patient Satisfaction with Treatment for Onychocryptosis: A Systematic Review. *Skin Appendage Disord.* 2020;6(5):272-279. doi: 10.1159/000508927.
15. Petrova A, Bakardzhiev I. UniBrace: An Innovative Approach in Orthonychia. *Varna Medical Forum.* 2022;11(0):293-295. doi: 10.14748/vmf.v11i0.8974.
16. Márquez-Reina S, Palomo-Toucedo I, Reina-Bueno M, et al. Polyethylene Nail Brace for Ingrown Toenails Treatment: A Randomized Clinical Trial. *Int J Environ Res Public Health.* 2020;17(21):7741. doi: 10.3390/ijerph17217741.
17. Pelant E, Pawlaczyk M, Urbańska M, et al. Titanium-molybdenum brace in the treatment of ingrown toenails. *J Cosmet Dermatol.* 2022;21(6):2674-2676. doi: 10.1111/jocd.14419.
18. Hildebrand HF, Veron C, Martin P. Nickel, chromium, cobalt dental alloys and allergic reactions: an overview. *Biomaterials.* 1989;10(8):545-548. doi: 10.1016/0142-9612(89)90060-4.

Статья поступила 08.09.2025; одобрена после рецензирования 07.10.2025; принята к публикации 09.02.2026.

The article was submitted 08.09.2025; approved after reviewing 07.10.2025; accepted for publication 09.02.2026.

Информация об авторе:

Дмитрий Олегович Розов — подолог, droziroz@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-2648-0754>.

Information about the author:

Dmitrij O. Rozov — Podologist, droziroz@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-2648-0754>.

Обзорная статья

УДК 616.717.46-001.5-089.85-08-035

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2026-32-2-262-270>



Роль доступов и видов остеосинтеза локтевого отростка в хирургическом лечении пациентов с переломами дистального отдела плечевой кости

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

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

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

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

Аннотация

Введение. Переломы дистального отдела плечевой кости составляют около 2 % всех переломов с ростом частоты до 5,7–8,3 случаев на 100 000 в год. Продолжается поиск оптимальных методов хирургического лечения. Несмотря на широкое применение остеотомии локтевого отростка для доступа плечевой кости, выбор типа остеотомии и фиксатора для сращения искусственного перелома остаётся за хирургом.

Цель работы — оценить результаты остеотомии локтевого отростка при выполнении доступа к блоку плечевой кости при переломах дистального отдела плечевой кости.

Материал и методы. Поиск публикаций осуществлен в электронных базах PubMed, Google Scholar, eLibrary за период с 2020 по 2025 гг. Отобраны исследования с описанием остеотомии локтевого отростка при хирургическом лечении пациентов с переломами дистального отдела плечевой кости (ДОПК). Систематизированы статьи, анализирующие виды остеотомий, типы фиксаторов и характер осложнений. После оценки согласно критериям PRISMA 595 статей в систематический обзор включено 18 статей с общим числом выборки 640 пациентов.

Результаты и обсуждение. При оценке результатов лечения выявлено, что замедленная консолидация встречалась в пяти из 112 случаев (4,46 %), формирование ложного сустава — в 24 из 416 (5,76 %), перелом металлоконструкции — в 10 из 150 (6,6 %). Развитие инфекции области хирургического вмешательства в раннем послеоперационном периоде отмечено у 37 из 473 пациентов (7,82 %). Частота удаления металлоконструкции в послеоперационном периоде составила 55 из 297 случаев (18,51 %). Расчет производили по имеющимся данным для каждого описанного осложнения. Утверждать об оптимальном доступе, виде остеотомии и типе фиксации затруднительно ввиду ограниченности полученных данных. Продолжение экспериментальных и проспективных исследований остается актуальным.

Заключение. Несмотря на частоту применения и воспроизводимость общепринятых методов фиксации искусственного перелома, результаты выполнения остеотомии локтевого отростка при выполнении доступа к блоку плечевой кости при переломах ДОПК остаются неудовлетворительными.

Ключевые слова: локтевой сустав, локтевой отросток, остеотомия локтевого отростка, внутрисуставные переломы дистального отдела плеча, перелом плечевой кости

Для цитирования: Прокопович Т.Е., Медведчиков А.Е., Анастасиева Е.А., Кирилова И.А. Роль доступов и видов остеосинтеза локтевого отростка в хирургическом лечении пациентов с переломами дистального отдела плечевой кости. *Гений ортопедии*. 2026;32(2):262-270. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-2-262-270.

Review article

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2026-32-2-262-270>



Role of olecranon osteosynthesis types and approaches in surgical treatment of patients with distal humerus fractures: a systematic review

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

¹ Tsivyan Novosibirsk Research Institute of Traumatology and Orthopaedics, Novosibirsk, Russian Federation

² Clinical Hospital MD Group Michurinsky, Moscow, Russian Federation

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

Abstract

Introduction Distal humerus fractures account for about 2 % of all fractures, with annual fracture incidence up to 5.7–8.3 cases per 100,000 population. In this regard, optimal surgical treatment methods continue to be sought. Despite the widespread use of olecranon osteotomy to approach the humerus, the choice of an osteotomy type and fixator for an artificial fracture consolidation remains with the surgeon. This paper systematizes the available literature related to types of osteotomies, types of fixators, and characteristics of complications.

Purpose To evaluate the results of performing olecranon osteotomy to approach the humeral trochlea in the treatment of distal humerus fractures, to determine the optimal type of approach, type of osteotomy and type of fixators for an artificial olecranon fracture in the surgical treatment of distal humerus fractures.

Material and methods The search for publications was carried out in the PubMed, Google Scholar, eLibrary databases for the period from 2020 to 2025. Studies that described olecranon osteotomy in the surgical treatment of distal humerus fractures (DHF) were selected. After evaluating 595 articles, 18 studies with a total sample size of 640 patients were included in the systematic review according to the PRISMA criteria.

Results and discussion The results of the review are: the overall incidence of delayed consolidation was 5 out of 112 cases (4.46 %), pseudarthrosis developed in 24 out of 416 (5.76 %), and metal implant broke in 10 out of 150 (6.6 %). Development of surgical site infection in the early postoperative period was described in 37 out of 473 (7.82 %). Metal implants were removed in the postoperative period in 55 out of 297 cases (18.51 %). The incidence was calculated based on the available data for each described complication.

Conclusion The results of olecranon osteotomy used to approach to the humeral trochlea in distal humerus fracture treatment have been evaluated. Based on the results of this systematic review, it is impossible to indicate the optimal approach, type of osteotomy and type of fixation due to the limited data. However, given the available statistics, it is possible to assume the advantage of the Tension Band Wiring (TBW) method. Therefore, the issue of conducting experimental and prospective studies remains open.

Keywords: elbow joint, olecranon, olecranon osteotomy, distal humerus intra-articular fractures, humerus fracture

For citation: Prokopovich TE, Medvedchikov AE, Anastasieva EA, Kyrilova IA. Role of olecranon osteosynthesis types and approaches in surgical treatment of patients with distal humerus fractures: a systematic review. *Genij Ortopedii*. 2026;32(2):262-270. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-2-262-270.

ВВЕДЕНИЕ

Переломы дистального отдела плечевой кости (ДОПК) составляют около 2 % всех переломов, при этом наблюдают высокую частоту встречаемости таких переломов, — до 5,7–8,3 случаев на 100 000 населения в год [1, 2]. Переломы ДОПК, как правило, имеют бимодальное распределение: они возникают либо у молодых мужчин при высокоэнергетических повреждениях, либо у пожилых женщин при низкоэнергетических травмах [1].

Успешная хирургическая фиксация переломов ДОПК представляет собой сложную задачу. При выборе наилучшей хирургической стратегии для выполнения открытой репозиции и внутренней фиксации (*англ.*: open reduction internal fixation, ORIF) необходимо учитывать множество факторов. В последние 25 лет результаты хирургического лечения пациентов с переломами ДОПК значительно улучшились. Принципы, сформулированные группой АО-ASIF (*англ.*: Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen — Ассоциация по изучению внутреннего остеосинтеза), включают анатомическую репозицию суставной поверхности и жёсткую внутреннюю фиксацию, обеспечивая быстрое заживление и раннюю реабилитацию [3]. При этом за последние два десятилетия сформировалось лучшее понимание анатомии локтевого сустава, усовершенствованы хирургические доступы [4–11], появились инновационные фиксирующие устройства, эволюционировали протоколы реабилитации, разработанные АО. Преконтурированные блокирующие пластины для задней и медиальной колонн, а также для фиксации артифициального перелома локтевого отростка являются новыми, эффективными средствами фиксации, особенно на фоне остеопороза [12].

Тем не менее, остеотомия локтевого отростка может приводить к повреждению суставного хряща с риском развития осложнений, например постоперационного остеоартрита [13–16]. Для минимального воздействия на суставную поверхность локтевого сустава рекомендуют выполнять остеотомию в пределах допустимой зоны, на впадине проксимального отдела локтевой кости. Авторы описывают этот участок как оголенную область (*англ.*: bare area — голый участок) [17, 18], которая служит подходящим местом для остеотомии локтевого отростка, однако анатомическая ее узость создает сложности для правильного выполнения остеотомии. А.А. Wang et al. в исследовании на кадаверном материале описали 39 локтевых суставов, измерили оголенную область и получили следующие данные: средняя ширина — 0,53 см (диапазон: 0,13–0,97 см), а среднее расстояние от места прикрепления дистального сухожилия трицепса до соответствующей зоны — 2,1 см (диапазон: 1,4–2,5 см) [19]. М. Nakl et al. получили высоту оголенной области, равную $(4,92 \pm 0,81)$ мм. Кроме того, место прикрепления дистального сухожилия трицепса оказалось широким и допускало разные варианты прикрепления к локтевому отростку, что могло привести к неточному расположению инструмента для остеотомии при его использовании в качестве ориентира [20]. Это послужило поиску метода повышения точности остеотомий в данной области.

При остеотомии локтевого отростка стандартный подход заключается в выполнении шевронной остеотомии с фиксацией артифициального перелома с помощью спиц Киршнера и натянутой проволоки или ленты, либо интрамедуллярного винта с шайбой или без нее. Поперечная остеотомия проще в исполнении и наносит минимальный ущерб кости по сравнению с шевронной остеотомией. Биомеханические исследования продемонстрировали сопоставимую стабильность поперечной и шевронной остеотомий [21], но влияние остеотомий на незащищенную область с целью уменьшения повреждения хряща остается неизученной. Анатомических и биомеханических исследований, посвященных морфологическим характеристикам оголенной области, в настоящее время недостаточно, что приводит к отсутствию достоверного описания точных анатомических ориентиров начала и завершения остеотомии локтевого отростка. Однако представлено множество вариантов остеотомии локтевого отростка с широким выбором типов фиксации: шевронная остеотомия, поперечная или косая остеотомии, L-образная остеотомия, SCOOT-остеотомия (*англ.*: step-cut olecranon osteotomy) [22]. Кроме того, по-прежнему сохраняется интерес исследователей в структурировании профиля осложнений.

Цель работы — оценить результаты остеотомии локтевого отростка при выполнении доступа к блоку плечевой кости при переломах дистального отдела плечевой кости.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Источники данных

Поиск тематических публикаций осуществлен в электронных базах eLIBRARY, PubMed, Google Scholar за период с 2020 по 2025 гг. Всего в соответствии с ключевыми словами после удаления дубликатов обнаружено 595 полнотекстовых публикаций. После проведения скрининга по критериям PRISMA отобрано 36 публикаций, 18 из которых не содержали необходимых количественных данных. В систематический обзор и количественный анализ включены 18 публикаций [23].

Отбор исследований и извлечение данных**Критерии включения:**

- возраст 18 лет и старше;
- наличие выполненной остеотомии локтевого отростка при переломе дистального отдела плечевой кости;
- фиксация искусственного перелома различными типами фиксаторов.

Критерии невключения:

- описания клинических случаев;
- биомеханические исследования;
- педиатрические исследования и возраст пациентов до 18 лет;
- изолированные переломы локтевого отростка;
- исследования, проведенные на кадаверном материале.

Критерием исключения являлось отсутствие данных о пролеченных пациентах.

Алгоритм формирования выборки согласно критериям PRISMA для последующего систематического обзора представлен на рис. 1. Данные проанализированы и представлены в описательном виде.

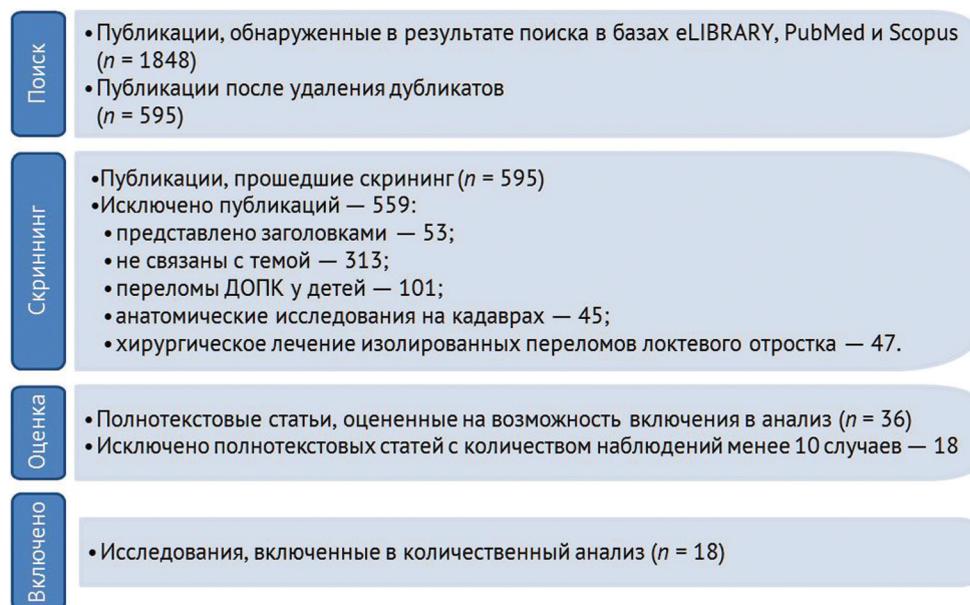


Рис. 1. Блок-схема поиска и этапного отбора публикаций для систематического обзора

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По данным всех исследований, включенных в систематический обзор, изучено 640 клинических случаев, при которых авторы выполняли остеотомию локтевого отростка (табл. 1). Средний возраст пациентов составил $(46,18 \pm 8,5)$ лет. В одном исследовании не указан возраст исследуемой популяции [24]. Пол пациентов указан в 14 исследованиях, причем $(51,4 \pm 12,2)$ % составляли мужчины.

Период наблюдения составил $(22,56 \pm 17,7)$ мес. (от 1,5 до 74,4). В 17 исследованиях приняли участие 536 пациентов, которым была выполнена шевронная остеотомия, в одном исследовании описаны 73 случая выполнения поперечной остеотомии [25]. В двух исследованиях 57 пациентам выполняли поперечную либо шевронную остеотомию, но без указания количества остеотомий [26, 27].

Чаще всего применяли спице-петлевой метод фиксации с использованием спиц Киршнера и металлической проволоки: 286 пациентов в 11 статьях. Следующей по частоте использования была фиксация искусственного перелома пластиной и винтами: 95 пациентов в пяти статьях. Спонгиозный винт со спице-петлевым методом использовали у 55 пациентов в четырех статьях. P. Cañete San Pastor et al. осуществили фиксацию локтевого отростка винтом 6,5 мм [28].

Таблица 1

Распределение полученных данных при анализе литературы за период с 2020 по 2025 гг.

Источник	УД	Кол-во пациентов (n)	ВО	Тип фиксации	ЗК		ЛС		Перелом или миграция МК		Удаление МК		ИОХВ		СВ, лет	М, %	Ж, %	СН, мес.
					n	%	n	%	n	%	n	%	n	%				
Haglin JM et al, 2021 [24]	IV	48	III	TBW – 27, plate – 21	2	4,17	2	4,17	N/A	N/A	3	6,25	1	2,08	N/A	N/A	N/A	21
Zhou M et al, 2024 [25]	IV	73	II	TBW	N/A		N/A		N/A	N/A	N/A		N/A		40	60	40	37
Somerson JS et al, 2022 [26]	III	43	III – 41, II – 2	TBW, plate, screw & TBW, screw	N/A		2	4,65	N/A	N/A	N/A		9	20,93	59	61	39	17
Weber M.B. et al, 2022 [27]	III	14	III – 13, II – 2	TBW – 2, plate – 5, screw & TBW – 7	N/A		5	35,71	N/A	N/A	N/A		0	0,00	58	47	53	10
Cañete San Pastor P. et al, 2021 [28]	IV	26	III	screw	2	7,69	1	3,85	N/A	N/A	8	30,77	1	3,85	54,8	N/A	N/A	12
Phadnis J.S. et al, 2020 [29]	IV	30	III	TBW – 8, plate – 5, suture – 17	N/A		1/17 (suture)	3,33	N/A	1 (plate), 3 (TBW)	13,33		N/A		55	N/A	N/A	12
Kellam P.J. et al, 2024 [30]	IV	38	III	mini plate	N/A		0	0,00	N/A	3	7,89		N/A		50	42	58	10
Sinkler M.A. et al, 2025 [31]	III	36	III	TBW, plate, screw & TBW, screw	N/A		7	19,44	3	8,33	N/A		1	2,78	58	44	56	12
Wilson E.S. et al, 2021 [32]	III	64	III	N/A	N/A		0	0,00	N/A	3	4,69		9	14,06	45	41	59	13
Ailani R. et al, 2024 [33]	IV	20	III	TBW	N/A		N/A		5	25,00	N/A		2	10,00	37,5	55	45	12
Meldrum A. et al, 2021 [34]	IV	91	III	TBW – 65, plate – 18, screw & TBW – 1, screw – 9	N/A		2/63 (TBW), 1/18 (plate)	8,73	N/A	34	37,36		3	3,30	55,1	41	59	74
Jamoh K. et al, 2022 [35]	IV	30	III	TBW	N/A		N/A		1	3,33	N/A		8/	26,67	38,1	N/A	N/A	12
Ding J. et al, 2022 [37]	IV	27	III, II	screw & TBW	N/A		N/A		0	0,00	N/A		0	0,00	51,4	41	59	16
Ansari M.F. et al, 2020 [38]	IV	28	III	TBW	1	3,57	1	3,57	N/A	N/A	N/A		3	10,71	37,5	64	36	46
Yildiz V. et al, 2021 [39]	III	37	III	screw & TBW – 20, plate – 8, nail – 9	N/A		2	5,41	1	2,70	N/A		1	2,70	37	51	49	44
Butala R.R. et al, 2022 [40]	IV	15	III	TBW	N/A		N/A		N/A	N/A	N/A		N/A		44,6	53	47	6
Kumar D. et al, 2024 [41]	IV	10	III	TBW	0	0,00	0	0,00	N/A	N/A	N/A		N/A		36	60	40	13
Song Z.F. et al, 2025 [42]	IV	10	III	TBW	N/A		N/A		N/A	N/A	N/A		N/A		51,4	60	40	40

Примечание: УД – уровень доказательности; ВО – вид остеотоми; ЗК – задержка консолидации; ЛС – ложный сустав; МК – металлоконструкция; ИОХВ – инфекция области хирургического вмешательства; СВ – средний возраст СН – срок наблюдения TBW (англ.: tension band wiring) – метод напряженной петли; plate – пластина; screw – винт; srew and TBW – винт с методом напряженной петли; nail – гвоздь; suture – шов; mini plate – мини-пластины; М – мужской пол; Ж – женский пол; Ш – шевронная остеотомия; П – поперечная остеотомия; N/A – нет данных.

За последние пять лет только в одном исследовании описана успешная фиксация искусственного перелома костным швом в 17 случаях [29]. В одном исследовании авторы сообщают о 38 успешных случаях использования мини-пластин 2,7 мм [30]. В остальных статьях авторы включали в исследование группы пациентов с несколькими типами фиксации. В трех исследованиях у 143 пациентов нет распределения по типу и методу фиксации [26, 31, 32]. Распределение осложнений после выполнения остеотомии локтевого отростка при переломах дистального отдела плечевой кости отобрано на рис. 2.

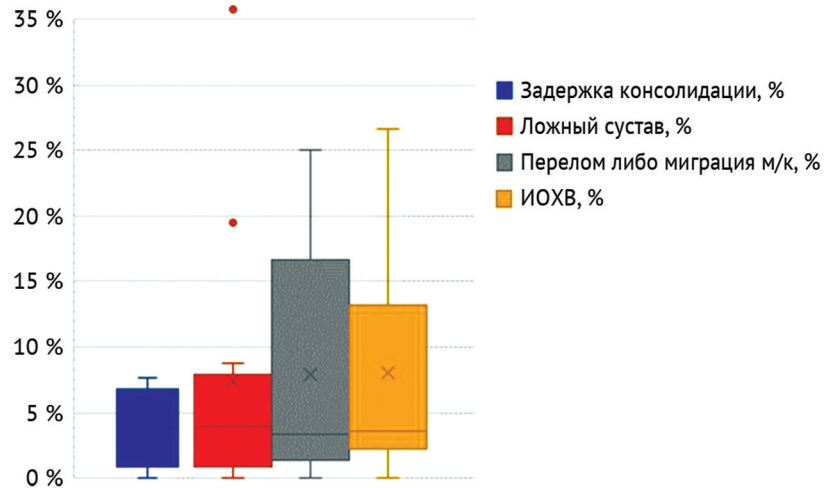


Рис. 2. Распределение осложнений после выполнения остеотомии локтевого отростка при переломах ДОПК (ИОХВ — инфекция области хирургического вмешательства)

При анализе 112 пациентов в четырех исследованиях после остеотомии выявлено пять (4,46 %) случаев замедленной консолидации локтевого отростка. Наибольший процент описан в статье P. Cañete San Pastor et al., — два пациента из 26 (7,69 %) [28]. В 24 (5,76 %) случаях из 416 сформирован ложный сустав искусственного перелома локтевого отростка. M.B. Weber et al. указали на образование ложного сустава у пяти (35,71 %) из 15 пациентов [27], M.A. Sinkler et al. [31] обнаружили ложный сустав в семи случаях (19,44 %) из 36.

В 10 из 150 случаев (6,6 %) произошли переломы фиксирующей металлоконструкции либо ее миграция в мягкие ткани. R. Ailani et al. описали повторные вмешательства по причине перелома металлоконструкции у пяти пациентов (25,0 %) из 20 [33].

В позднем послеоперационном периоде после полной консолидации искусственного перелома локтевого отростка металлоконструкции удаляли в 55 (18,51 %) из 297 случаев. A. Meldrum et al. удаляли металлоконструкции более чем в трети случаев, — 34 (37,36 %) случая из 91 [34].

Инфицирование раны в раннем послеоперационном периоде встречались в 37 (7,82 %) из 473 случаев: K. Jamoh et al. в своем исследовании выявили восемь случаев (26,67 %) из 30 [35], такой же высокий показатель представлен J.S. Somerson et al., — 20,93 % (9 случаев из 43) [26].

По данным литературы шевронную остеотомию локтевого отростка применяли гораздо чаще, клинические результаты при ее использовании были лучше, чем при поперечной остеотомии. При выполнении шевронной остеотомии в большинстве исследований использовали осциллирующую пилу, выполняя распил кости только до $\frac{3}{4}$ её глубины. Для завершения остеотомии использовали остеотом, избегая тем самым повреждение суставного хряща и образуя рельефную поверхность для лучшей консолидации искусственного перелома. Увеличенная площадь поверхности опилов концов кости при выполнении шевронной остеотомии способствует эффективному прилеганию отломков друг к другу, дополнительно приводя к повышению ротационной и трансляционной стабильности искусственного перелома.

J.S. Somerson et al. сообщили о выполнении двух поперечных остеотомий с замедленной консолидацией отломков [26]. M.B. Weber et al. после выполнения шевронной и поперечной остеотомий зарегистрировали пять случаев образования ложного сустава, но не указали при каком типе остеотомии они были получены [27]. В каждом исследовании со смешанной техникой остеотомии был сделан вывод о том, что шевронная остеотомия более надежна и дает лучшие результаты [36].

При наличии различных типов и методов фиксации спице-петлевой метод отдельно и в сочетании с одним спонгиозным винтом (с шайбой или без нее) использовали чаще, чем другие фиксирующие конструкции.

Результаты фиксации области искусственного перелома пластинами с винтами показали различия между исследованиями. Представлено пять различных типов пластин или способов их использования у 92 пациентов. P.J. Kellam et al. использовали мини-пластины размером 2,7 мм, в результате у трех (7,89 %) из 38 пациентов имплантаты были удалены [30]. J.S. Phadnis et al. выполняли фиксацию искусственного перелома костным швом, в исследовании 30 пациентов отмечен только один случай образования ложного сустава и четыре случая последующего удаления имплантата [29]. P. Cañete San Pastor et al. использовали спонгиозный винт для фиксации искусственного перелома у 26 пациентов, в результате в двух случаях обнаружена замедленная консолидация, в одном случае сформировался ложный сустав, у восьми пациентов фиксатор был удален в позднем послеоперационном периоде в плановом порядке [28].

Протокол послеоперационной реабилитации во всех анализируемых исследованиях включал короткий (до 14 дней) период иммобилизации оперированной верхней конечности при помощи шины или гипсовой повязки, а выполнение комплекса двигательных упражнений начинали на первые–седьмые сутки после оперативного вмешательства. В большинстве исследований после снятия гипсовой повязки назначали ношение ортеза, в то время как в других поддерживающие устройства не использовали.

Ограничения исследования

У данного систематического обзора есть несколько ограничений. Исследование было задумано как описательное, мы объединили аналогичные группы для расчета заболеваемости, чтобы продемонстрировать тенденции, эти результаты следует трактовать с осторожностью (рис. 3). Вероятно, при большем объеме выборки показатели были бы более достоверными.

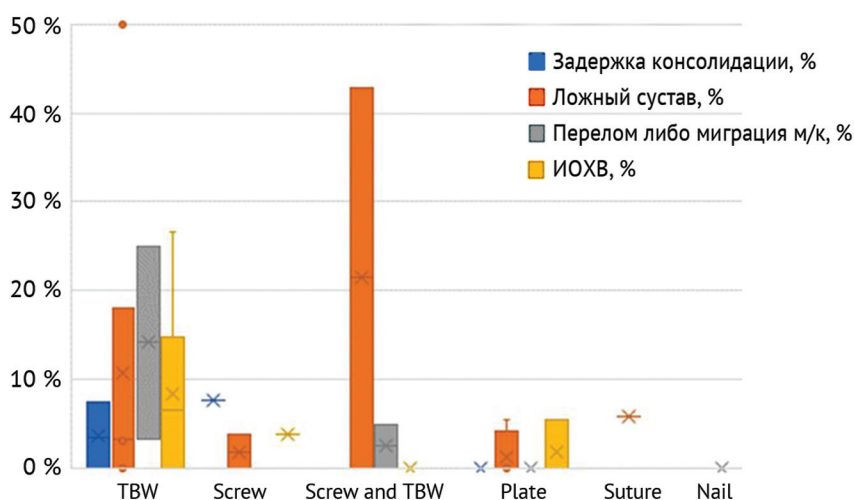


Рис. 3. Сравнительная диаграмма осложнений в зависимости от использования различных техник по данным литературы за 2020–2025 гг. (ИОХВ — инфекция области хирургического вмешательства)

Мы исключили биомеханические исследования и исследования с участием пациентов, у которых был диагностирован изолированный перелом локтевого отростка, и которым не выполняли остеотомию для доступа к блоку плечевой кости при переломе ДОПК. Биомеханические исследования дают ценную информацию, недоступную для когортных исследований пациентов, однако нашей целью в этом исследовании было изучение клинических результатов. Также мы наблюдали неоднородность между группами. Например, при использовании спице-петлевого метода (проволока и спицы Киршнера) различные типы пластин были сгруппированы в общую группу.

Мы были ограничены информацией для расчетов, представленной в каждом исследовании. Пациентов исключали из обзора, если не было понимания, как их классифицировать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на частоту применения и воспроизводимость общепринятых методов фиксации искусственного перелома, результаты выполнения остеотомии остаются неудовлетворительными. По результатам проведенного систематического обзора утверждать об оптимальных доступах, видах остеотомии и типах фиксации затруднительно ввиду ограниченности полученных данных. Таким образом, необходимость проведения экспериментальных и проспективных исследований остается актуальной.

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

Источник финансирования. Не заявлен.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Nauth A, McKee MD, Ristevski B, et al. Distal humeral fractures in adults. *J Bone Joint Surg Am.* 2011;93(7):686-700. doi: 10.2106/JBJS.J.00845.
- Robinson CM, Hill RM, Jacobs N, et al. Adult distal humeral metaphyseal fractures: epidemiology and results of treatment. *J Orthop Trauma.* 2003;17(1):38-47. doi: 10.1097/00005131-200301000-00006.
- Helfet DL, Haas NP, Schatzker J, et al. AO philosophy and principles of fracture management-its evolution and evaluation. *J Bone Joint Surg Am.* 2003;85(6):1156-1160.
- Schildhauer TA, Nork SE, Mills WJ, Henley MB. Extensor mechanism-sparing paratricipital posterior approach to the distal humerus. *J Orthop Trauma.* 2003;17(5):374-378. doi: 10.1097/00005131-200305000-00009.
- Scolaro JA, Voleti P, Makani A, et al. Surgical fixation of extra-articular distal humerus fractures with a posterolateral plate through a triceps-reflecting technique. *J Shoulder Elbow Surg.* 2014;23(2):251-257. doi: 10.1016/j.jse.2013.09.020.
- Ziran BH. A true triceps-splitting approach for treatment of distal humerus fractures: a preliminary report. *J Trauma.* 2005;58(6):1306. doi: 10.1097/01.ta.0000169955.61747.5b.
- Bryan RS, Morrey BF. Extensive posterior exposure of the elbow. A triceps-sparing approach. *Clin Orthop Relat Res.* 1982;(166):188-192.
- O'Driscoll SW. The triceps-reflecting anconeus pedicle (TRAP) approach for distal humeral fractures and nonunions. *Orthop Clin North Am.* 2000;31(1):91-101. doi: 10.1016/s0030-5898(05)70130-9.
- Deakin DE, Deshmukh SC. The triceps-flexor carpi ulnaris (TRIFCU) approach to the elbow. *Ann R Coll Surg Engl.* 2010;92(3):240-242. doi: 10.1308/003588410X12628812458536.
- WC Campbell. Incision for exposure of the elbow joint. *Am J Surg.* 1932;15(1):65-67. doi: 10.1016/S0002-9610(32)90997-0.
- MacAusland WR. Ankylosis of the elbow: With report of four cases treated by arthroplasty. *JAMA.* 1915;64:312-318.
- Athwal GS, Raniga S. Distal humerus fractures. In Tornetta III P, Ricci WM, Ostrum RF, et al. (eds.) *Rockwood and Green's Fractures in Adults.* 7th ed. Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkins. 2010;1:945-972.
- Coles CP, Barei DP, Nork SE, et al. The olecranon osteotomy: a six-year experience in the treatment of intraarticular fractures of the distal humerus. *J Orthop Trauma.* 2006;20(3):164-171. doi: 10.1097/00005131-200603000-00002.
- Nauth A, McKee MD, Ristevski B, et al. Distal humeral fractures in adults. *J Bone Joint Surg Am.* 2011;93(7):686-700. doi: 10.2106/JBJS.J.00845.
- Zalavras CG, Pappasoulis E. Intra-articular fractures of the distal humerus-a review of the current practice. *Int Orthop.* 2018;42(11):2653-2662. doi: 10.1007/s00264-017-3719-4.
- Zlotolow DA, Catalano LW 3rd, Barron OA, Glickel SZ. Surgical exposures of the humerus. *J Am Acad Orthop Surg.* 2006;14(13):754-765. doi: 10.5435/00124635-200612000-00007.
- Morrey BF. The elbow and its disorders. In: Morrey BF. (ed.) *Anatomy of the elbow joint.* 3rd ed. Philadelphia: Saunders; 2000:13-42.
- Xiong C, Ju J, Huang B, et al. Morphological map of the proximal ulna bare area: a computer-assisted anatomical study in relation to olecranon osteotomy. *J Shoulder Elbow Surg.* 2025;S1058-2746(25)00072-2. doi: 10.1016/j.jse.2024.12.012.
- Wang AA, Mara M, Hutchinson DT. The proximal ulna: An anatomic study with relevance to olecranon osteotomy and fracture fixation. *J Shoulder Elbow Surg.* 2003;12(3):293-296. doi: 10.1016/s1058-2746(02)86803-3.
- Hackl M, Lappen S, Neiss WF, et al. The bare area of the proximal ulna : An anatomical study on optimizing olecranon osteotomy. *Orthopade.* 2016;45(10):887-894. (In German) doi: 10.1007/s00132-016-3332-z.
- Petraco DM, Koval KJ, Kummer FJ, Zuckerman JD. Fixation stability of olecranon osteotomies. *Clin Orthop Relat Res.* 1996;(333):181-185.
- Hess S, Bürki A, Moor BK, et al. A biomechanical study comparing the mean load to failure of two different osteosynthesis techniques for step-cut olecranon osteotomy. *JSES Rev Rep Tech.* 2021;1(4):414-420. doi: 10.1016/j.xrrt.2021.07.004.
- Кулакова Е.Н., Настаушева Т.Л., Кондратьева И.В. Систематическое обзорное исследование литературы по методологии scoring review: история, теория и практика. *Вопросы современной педиатрии.* 2021;20(3):210-222. doi: 10.15690/vsp.v20i3/2271.
- Haglin JM, Lott A, Kugelman DN, et al. Olecranon Osteotomy Fixation Following Distal Humerus Open Reduction and Internal Fixation: Clinical Results of Plate and Screws Versus Tension Band Wiring. *Orthopedics.* 2021;44(1):e107-e113. doi: 10.3928/01477447-20201007-03.
- Zhou M, Xue Y, Jia X, et al. Treatment of the terrible triad of the elbow by olecranon osteotomy: a retrospective cohort study. *PeerJ.* 2024;12:e18469. doi: 10.7717/peerj.18469.
- Somerson JS, Morrey ME, Sanchez-Sotelo J, Morrey BF. Predictors of reoperation after internal fixation of intra-articular distal humerus fractures. *Shoulder Elbow.* 2022;14(1):76-83. doi: 10.1177/1758573219895972.
- Weber MB, Cho E, Evans PJ, et al. Triceps tongue versus olecranon osteotomy for intra-articular distal humeral fractures: a matched-cohort study. *J Shoulder Elbow Surg.* 2022;31(6):1215-1223. doi: 10.1016/j.jse.2022.01.128.
- Cañete San Pastor P, Lopez Valenciano J, Copete I, Prosper Ramos I. Fixation of olecranon osteotomy only with 6'5 mm partially threaded cancellous screw is a safe an effective method used in surgical management of distal humerus fractures. *J Exp Orthop.* 2021;8(1):4. doi: 10.1186/s40634-020-00317-8.
- Phadnis JS, Vaughan A, Luokkala T, et al. Comparison of all suture fixation with tension band wiring and plate fixation of the olecranon. *Shoulder Elbow.* 2020;12(6):414-421. doi: 10.1177/1758573219831662.
- Kellam PJ, Amin AA, Anthony RT, et al. Mini-fragment plate fixation after olecranon osteotomy for distal humerus fractures. *J Shoulder Elbow Surg.* 2025;34(5):1254-1261. doi: 10.1016/j.jse.2024.08.036.
- Sinkler MA, Adelstein JM, Kodsy MM, et al. Postoperative dorsal step-off predicts olecranon osteotomy union: a retrospective cohort study. *Eur J Orthop Surg Traumatol.* 2024;35(1):49. doi: 10.1007/s00590-024-04169-1.
- Wilson ES, Buckwalter JA 5th, Henning G, et al. Inclusion of Olecranon Osteotomy With the Posterior Approach for Fixation of Distal Humerus Fractures (OTA/AO 13) Does Not Increase Surgical Complications. *J Orthop Trauma.* 2021;35(7):e223-e227. doi: 10.1097/BOT.0000000000002006.
- Ailani R, Bhuyan SK, Prasad BK, et al. Clinical outcomes of triceps reflecting anconeus pedicle and olecranon osteotomy approach for distal humerus intercondylar fractures. *World J Orthop.* 2024;15(6):570-577. doi: 10.5312/wjo.v15.i6.570.
- Meldrum A, Kwong C, Archibold K, et al. Olecranon Osteotomy Implant Removal Rates and Associated Complications. *J Orthop Trauma.* 2021;35(5):265-270. doi: 10.1097/BOT.0000000000001979.
- Jamoh K, Tonk G. How to Choose Between the Transolecranon and Triceps-Reflecting Approaches to Treat Distal Humerus Fractures in Adults: A Prospective Study. *Rev Bras Ortop (Sao Paulo).* 2022;57(2):301-307. doi: 10.1055/s-0041-1741444.
- Jupiter JB, Neff U, Holzach P, Allgöwer M. Intercondylar fractures of the humerus. An operative approach. *J Bone Joint Surg Am.* 1985;67(2):226-239.

37. Ding J, Yin WJ, Zhang BK, et al. Bilateral triceps tendon approach is flexible and efficient in the treatment of type C distal humerus fractures. *Chin J Traumatol*. 2022;25(3):145-150. doi: 10.1016/j.cjtee.2021.12.001.
38. Ansari MF, Khan NA, Atif AM. Management of type 13C2 distal humerus fractures by olecranon osteotomy approach versus triceps sparing approach-our experience with sixty cases. *Int Orthop*. 2020;44(12):2735-2742. doi: 10.1007/s00264-020-04785-6.
39. Yıldız V, Köse A, Aydın A, et al. Clinical and radiological results of three different techniques for fixation of the olecranon osteotomy in the surgical treatment of distal humerus fractures: A retrospective comparison of plate-screw, tension band and intramedullary nail. *Acta Orthop Traumatol Turc*. 2021;55(5):410-416. doi: 10.5152/j.aott.2021.20440.
40. Butala RR, Samant PD, Mehra S. Olecranon Osteotomy by a Gigli Saw versus Chevron's Osteotomy for Exposure of Intra-articular Distal Humerus: A Comparative Study. *Malays Orthop J*. 2022;16(3):61-69. doi: 10.5704/MOJ.2211.011.
41. Kumar D, Kataria M, Srivastava A, et al. Outcome of Complex Coronal Shear Fractures of the Distal Humerus (Dubberley Type 3) Managed by the Transolecranon Approach. *Indian J Orthop*. 2024;58(8):1118-1125. doi: 10.1007/s43465-024-01153-z.
42. Song ZF, Zhao WQ, Zhang ZL, Huang JF. Surgical Outcomes of Olecranon Osteotomy Approach Combined With Submerged Kirschner Wires and Plate Fixation for Duckerley IIIB Distal Humeral Coronal Shear Fractures. *Orthop Surg*. 2025;17(4):1255-1264. doi: 10.1111/os.70005.

Статья поступила 19.05.2025; одобрена после рецензирования 08.07.2025; принята к публикации 09.02.2026.

The article was submitted 19.05.2025; approved after reviewing 08.07.2025; accepted for publication 09.02.2026.

Информация об авторах:

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

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

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

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

Information about the authors:

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

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

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

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

Вклад авторов:

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

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

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

Кирилова И.А. — редактирование статьи.

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

Член-корреспондент РАН, д.м.н. Назаренко Антон Герасимович



В марте 2026 года отмечает 50-летний юбилей известный российский ученый, директор Национального медицинского исследовательского центра травматологии и ортопедии имени Н.Н. Приорова член-корреспондент РАН, доктор медицинских наук Антон Герасимович Назаренко.

Антон Герасимович окончил Московскую медицинскую академию им. И.М. Сеченова, прошел обучение в ординатуре по специальностям «травматология и ортопедия» и «нейрохирургия» и в аспирантуре в НИИ нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко РАМН, защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата медицинских наук на тему: «Разработка технологии объективной оценки эффективности хирургического лечения дегенеративных заболеваний межпозвонковых дисков пояснично-крестцового отдела позвоночника» и диссертацию на соискание ученой степени доктора медицинских наук на тему: «Выбор оптимальной хирургической тактики при дегенеративных заболеваниях пояснично-крестцового отдела позвоночника с использованием информационно-аналитической системы и компьютерного моделирования».

Общий стаж научной деятельности А.Г. Назаренко составляет более 20 лет. Основные направления его научных исследований находятся на пересечении клинической медицины (нейрохирургии, травматологии-ортопедии) с прикладной

математикой, информатикой и технологиями искусственного интеллекта (ИИ). В 2015 году д.м.н. А.Г. Назаренко присвоено звание «Профессор РАН» по специальности «прикладная математика и информатика», а в 2025 году — звание «Член-корреспондент РАН» по специальности «информационные технологии и автоматизация».

Антон Герасимович Назаренко разработал систему количественной оценки тяжести дегенеративных заболеваний позвоночника с помощью многомерных шкал и методику оценки эффективности лечения. Он впервые в нейрохирургии применил математические методы распознавания образов для прогнозирования исходов хирургического лечения с точностью выше 90 %. Созданная им система межгоспитального виртуального тестирования моделей ИИ для клинических задач является прорывом в области объективной оценки «зрелости» ИИ. Методология автоматизированного мониторинга нежелательных событий и анализа осложнений в хирургии с использованием ИИ позволяет повысить безопасность пациентов. В настоящее время А.Г. Назаренко руководит проектом, поддержанным грантом РФФИ, по применению методов ИИ для диагностики раневой инфекции в травматологии и ортопедии. Является автором 166 научных публикаций, в том числе 10 монографий, соавтором трех национальных руководств. В 2025 году Антону Герасимовичу присуждена Премия Правительства РФ в области нейротехнологий за разработку и внедрение инновационных систем стабилизации позвоночника.

А.Г. Назаренко ведет масштабную работу по развитию травматолого-ортопедической службы России, являясь главным внештатным специалистом травматологом-ортопедом Минздрава России, вице-президентом Ассоциации травматологов и ортопедов России, членом научно-практического совета Минздрава России.

Большое внимание Антон Герасимович уделяет научно-педагогической деятельности, — он заведует кафедрой травматологии, ортопедии и смежных дисциплин НМИЦ ТО им. Н.Н. Приорова, руководит выполнением кандидатских и докторских диссертаций.

Несмотря на высокую административную нагрузку, А.Г. Назаренко продолжает активную клиническую практику как высококвалифицированный спинальный хирург, владеющий всем спектром операций на позвоночнике и спинном мозге.

Редакционная коллегия журнала «Гений ортопедии» поздравляет Антона Герасимовича с юбилеем и желает здоровья, сил для реализации задуманных проектов, поддержки единомышленников, новых научных достижений.

Главный редактор А.В. Бурцев

Компьютерная верстка М.А. Беляева

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

Территория распространения: Российская Федерация, зарубежные страны

Подписано в печать 14.04.2026. Дата выхода 27.04.2026

Формат 60 × 84 1/8. Усл. печ. л. 14.88

Тираж 75 экз. Заказ № 19456. 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