

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

2026

№4 ^{Том}
32

ГЕНИЙ ОРТОПЕДИИ

Научно-теоретический
и практический журнал



Гений Ортопедии

Orthopaedic Genius

Том 32
№ 4
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. Baindurashvili (Russia, St. Petersburg)
 D.Yu. Borzunov (Russia, Ekaterinburg)
 E.A. Volokitina (Russia, Ekaterinburg)
 A.V. Gubin (Russia, St. Petersburg)
 G.V. Diachkova (Russia, Kurgan)
 N.A. Konovalov (Russia, Moscow)
 G.P. Kotel'nikov (Russia, Samara)
 S.M. Kutepov (Russia, Ekaterinburg)
 S.A. Linnik (Russia, St. Petersburg)
 A.M. Miromanov (Russia, Chita)
 A.V. Popkov (Russia, Kurgan)
 D.A. Popkov (Russia, Kurgan)
 S.O. Ryabykh (Russia, Moscow)
 E.G. Skryabin (Russia, Tyumen)
 A.A. Sufianov (Russia, Tyumen)
 R.M. Tikhilov (Russia, St. Petersburg)
 J.G. Birch (USA)
 M.A. Catagni (Italy)
 M.M. Chaudhary (India)
 J.F. Dubousset (France)
 V. Glatt (USA)
 G.A. Hosny (Egypt)
 A. Kirienko (Italy)
 P. Lascombes (Switzerland)
 S. Madan (UK)
 F. Monsell (UK)
 D. Paley (USA)
 M.S. Pinzur (USA)
 D.A. Podeszwa (USA)
 H.-R. Weiss (Germany)

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



Учредитель и издатель журнала:

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



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

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

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ

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

Журнал включен в библиографические и реферативные базы данных РИНЦ и SCOPUS

Журнал включен в электронные информационные ресурсы базы данных EBSCO

Электронная версия журнала размещена на сайтах

<https://ilizarov-journal.com>

<https://elibrary.ru>

<https://cyberleninka.ru>



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

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

Телефоны: (3522) 43-06-94 – редакция
(3522) 23-42-60 – реклама

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

Email: genius@ilizarov.ru

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

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

Территория распространения: Российская Федерация, зарубежные страны

Язык: русский, английский

Издается 6 раз в год

Цена свободная

© Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, 2026

Оригинальные статьи

- Особенности хирургического лечения при первичном повреждении сухожилий сгибателей трехфаланговых пальцев кисти во второй зоне: когортное ретроспективное исследование 439
А.Е. Чижов, Е.С. Цыбуль, Л.А. Родоманова, Н.В. Абдиба, А.О. Афанасьев
- Оценка показателей микроциркуляции у пациентов с переломами костей конечностей при стимуляции репаративной регенерации 448
А.М. Мироманов, К.А. Гусев, А.Н. Старосельников, О.Б. Миронова
- Исследование влияния препарата аминокислот с разветвленными боковыми радикалами на регенерацию передней большеберцовой мышцы после компрессионной травмы 459
Т.Н. Варсегова, М.В. Стогов, Н.А. Кононович
- Сравнительный анализ результатов клинко-инструментальных исследований при использовании стандартной и модифицированной стромально-васкулярной фракции в лечении пациентов с хондромализией надколенника 470
Г.М. Зверев, А.С. Судницын, С.В. Яковлев, А.В. Сайфулин, Ш.А. Моев
- Влияние глюкозамина-хондроитина, хитозана и фитоэстрогенов на воспалительные процессы, биомаркеры дегенерации хряща и клинические симптомы при остеоартрозе коленного сустава у женщин в постменопаузе 479
P. Kermawan, I.W.P.S. Yasa, M.B. Karna, S. Herawati, I.K. Suyasa, N.L.K.A. Arsani, K.E. Calisto, K.S.S. Yogananda, K.S.S. Wiwekananda, N.S.N. Wijaya, I.M. Jawi
- Диагностика качества жизни детей и подростков на этапе лечения корсетами типа Риго – Шено с использованием русскоязычной версии опросника Brace Questionnaire 488
Г.А. Леин, А.В. Бехтерева, И.В. Павлов, М.О. Демченко, А.Г. Магомедова
- Оценка состояния пациентов подросткового возраста со спастическими формами церебрального паралича, поступивших на оперативное ортопедическое лечение: кросс-секционное исследование 499
Э.Р. Мингазов, О.Ф. Насипжанов, Т.И. Долганова, О.И. Гатамов, У.Ф. Мамедов, Д.А. Попков
- Анализ причин осложнений при эндопротезировании локтевого сустава: опыт 622 операций и перспективы разработки имплантатов 510
Т.И. Александров, А.А. Иванова, В.М. Прохоренко
- Хирургическая коррекция плосковальгусной деформации стопы при остеоартрозе голеностопного сустава: клинко-функциональные результаты 520
А.А. Ширинов, Н.В. Загородний, Д.В. Бурков, М.А. Иманкулов, А.Р. Закирова, А.А. Неверова
- Остеоинтеграция новых чрескожных имплантатов типа Press-fit с цинк-содержащим кальций-фосфатным покрытием в культю конечности в эксперименте 529
А.А. Еманов, В.П. Кузнецов, М.В. Стогов, Е.Н. Горбач, Н.В. Тушина, Е.Г. Комарова, Т.В. Толкачева, Ю.П. Шаркеев
- Оценка применения костнозамещающего материала на основе полимеров полиуретанового ряда при лечении пациентов с хроническим остеомиелитом (экспериментально-морфологическое исследование) 540
А.С. Судницын, Т.А. Ступина, О.В. Дюрягина, Н.В. Тушина, Т.Н. Варсегова, Н.В. Кубрак

Новые технологии

- Оптимизация первого этапа двухэтапного эндопротезирования при инфекционных кокситях с использованием нового устройства для изготовления спейсера 552
Е.О. Перецманас, В.С. Зубиков, И.А. Герасимов, Е.Г. Соколов

Original Articles

- Features of surgical treatment for primary injury to the flexor tendons of the three-phalangeal fingers in the second zone: a retrospective cohort study 439
A.E. Chizhov, E.S. Tsybul, L.A. Rodomanova, N.V. Abdiba, A.O. Afanasiev
- Microcirculation measured in patients with limb fractures during stimulation of reparative regeneration 448
A.M. Miromanov, K.A. Gusev, A.N. Staroselnikov, O.B. Mironova
- Effect of a preparation of branched-chain amino acids on the regeneration of the anterior tibial muscle after compression injury 459
T.N. Varsegova, M.V. Stogov, N.A. Kononovich
- Comparative analysis of clinical and instrumental study of the results of using standard and modified stromal-vascular fractions in the treatment of patients with chondromalacia patellae 470
G.M. Zverev, A.S. Sudnitsyn, S.V. Yakovlev, A.V. Saifulin, Sh.A. Moev
- Effects of Glucosamine-Chondroitin, Chitosan, and Phytoestrogen on Knee Osteoarthritis Inflammatory and Cartilage Degeneration Biomarkers and Clinical Symptoms in Postmenopausal Women 479
P. Kermawan, I.W.P.S. Yasa, M.B. Karna, S. Herawati, I.K. Suyasa, N.L.K.A. Arsani, K.E. Calisto, K.S.S. Yogananda, K.S.S. Wiwekananda, N.S.N. Wijaya, I.M. Jawi
- Evaluation of quality of life in children and adolescents during treatment with Rigo – Cheneau type braces using the Russian version of the Brace Questionnaire 488
G.A. Lein, A.V. Behtereva, I.V. Pavlov, M.O. Demchenko, A.G. Magomedova
- Evaluation of the condition of adolescent patients with spastic types of cerebral palsy admitted for orthopedic surgery: a cross-sectional study 499
E.R. Mingazov, O.F. Nasipzhanov, T.I. Dolganova, O.I. Gatamov, U.F. Mamedov, D.A. Popkov
- Complications of total elbow arthroplasty: experience with 622 cases and implant developments 510
T.I. Alexandrov, A.A. Ivanova, V.M. Prokhorenko
- Surgical correction of pes planovalgus deformity in ankle osteoarthritis: clinical and functional outcomes 520
A.A. Shirinov, N.V. Zagorodniy, D.V. Burkov, M.A. Imankulov, A.R. Zakirova, A.A. Neverova
- Osseointegration of new percutaneous Press-fit implants coated with zinc-containing calcium phosphate in the limb stump: experimental study 529
A.A. Emanov, V.P. Kuznetsov, M.V. Stogov, E.N. Gorbach, N.V. Tushina, E.G. Komarova, T.V. Tolkacheva, Yu.P. Sharkeev
- Evaluation of bone substitute material based on polyurethane polymers for treatment of chronic osteomyelitis (experimental morphological study) 540
A.S. Sudnitsyn, T.A. Stupina, O.V. Dyuryagina, N.V. Tushina, T.N. Varsegova, N.V. Kubrak

New technologies

- Optimization of the first stage of hip revision in 2-stage surgery to replace infected artificial hips using a new molding spacer tool 552
E.O. Peretsmanas, V.S. Zubikov, I.A. Gerasimov, E.G. Sokolovich

Научная статья

УДК 617.577:616.74-018.38-001-089.84

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2026-32-4-439-447>

Особенности хирургического лечения при первичном повреждении сухожилий сгибателей трехфаланговых пальцев кисти во второй зоне: когортное ретроспективное исследование

А.Е. Чижов[✉], Е.С. Цыбуль, Л.А. Родоманова, Н.В. Абдиба, А.О. Афанасьев

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

Автор, ответственный за переписку: Александр Евгеньевич Чижов, Santillabox@mail.ru

Аннотация

Введение. Повреждения сухожилий сгибателей трехфаланговых пальцев кисти в зоне костно-фиброзных каналов представляет собой сложную ортопедическую проблему, требующую многокомпонентного лечения. Функциональный результат реконструкции сухожилий сгибателей зависит от хирургической стратегии, своевременного получения необходимого реабилитационного пособия и комплаентности пациентов. Нарушение комплексного подхода в лечении пациентов с данной травмой зачастую приводит к неудовлетворительным клиническо-функциональным исходам.

Цель работы — определение ключевых хирургических и реабилитационных факторов, влияющих на исходы первичной реконструкции сухожилий сгибателей трехфаланговых пальцев кисти во второй зоне.

Материалы и методы. Проанализированы результаты послеоперационного обследования 100 пациентов, которым выполнена первичная реконструкция сухожилия глубокого сгибателя одного трехфалангового пальца кисти при повреждении обоих сухожилий сгибателей во второй зоне по классификации Verdan: функция исследуемого пальца по критериям Strickland и шкале Boyes – Lister, клиническо-функциональная оценка исследуемой конечности по валидированным шкалам DASH и MHO. Оценивали влияние морфологической характеристики пациента, анатомической топографии повреждения, хирургической стратегии и реабилитационного пособия на послеоперационный исход.

Результаты. Выявлено статистически значимое улучшение функции по критерию Strickland при разрезе хирургического доступа, не превышающего 1,5 длины фаланги ($p < 0,05$). Функциональные результаты при применении четырехнитового внутрисуставного шва калибром 3/0 и шестинитового шва калибром 3/0 по критерию Strickland и шкале Boyes – Lister были статистически значимо лучше ($p < 0,05$). Неудовлетворительные результаты по критерию Strickland встречали статистически значимо чаще при отсутствии реабилитации, чем при любых видах реабилитации ($p < 0,05$). Разрыв шва при отсутствии реабилитации происходил чаще ($p < 0,001$), чем при реабилитации с кистевым терапевтом.

Обсуждение. Полученные результаты имеют показатели как отличающиеся от опубликованных в литературных источниках, так и подтверждающие их. Использование конфигураций четырех- или шестинитового сухожильного шва калибром 3/0 и выполнение реабилитационного протокола с профильным специалистом улучшает функциональные результаты при лечении пациентов с повреждениями сухожилий сгибателей трехфаланговых пальцев кисти и снижает риск разрыва шва. Сочетание повреждения сухожилий сгибателей и собственного пальцевого нерва не имеет функционально значимых различий в сравнении с изолированным повреждением сухожилий.

Заключение. В результате проведенного анализа ретроспективной когорты пациентов определены ключевые хирургические и реабилитационные факторы, влияющие на исходы первичной реконструкции сухожилий сгибателей трехфаланговых пальцев кисти во второй зоне: конфигурация и калибр внутрисуставного шва, размер хирургического доступа, а также наличие и вид реабилитационного пособия. Данные факторы оказывали значимое влияние на клиническо-функциональные результаты лечения.

Ключевые слова: сухожилия сгибателей, шов сухожилия, лечение сухожилий

Для цитирования: Чижов А.Е., Цыбуль Е.С., Родоманова Л.А., Абдиба Н.В., Афанасьев А.О. Особенности хирургического лечения при первичном повреждении сухожилий сгибателей трехфаланговых пальцев кисти во второй зоне: когортное ретроспективное исследование. *Гений ортопедии*. 2026;32(4):439-447. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-4-439-447.



Features of surgical treatment for primary injury to the flexor tendons of the three-phalangeal fingers in the second zone: a retrospective cohort study

A.E. Chizhov✉, E.S. Tsybul, L.A. Rodomanova, N.V. Abdiba, A.O. Afanasiev

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

Corresponding author: Alexander E. Chizhov, Santillabox@mail.ru

Abstract

Introduction Three-phalanx finger flexor tendon injuries in the fibrous-osseous canals of the fingers represent a complex orthopedic problem requiring multifaceted treatment. The functional outcome of flexor tendon reconstruction depends on the surgical strategy, timely provision of necessary rehabilitation support, and patient compliance. Failure to adopt a comprehensive approach to treating patients with this injury often leads to poor clinical and functional outcomes.

The **purpose** was to determine key surgical and rehabilitation factors that have impact on the outcomes of primary reconstruction of the flexor tendons of the three-phalangeal fingers in the second zone.

Materials and Methods We analyzed the postoperative results of 100 patients who underwent primary reconstruction of the deep flexor tendon of one three-phalangeal finger after damage to both flexor tendons in zone 2 according to the Verdan classification. These included finger function using the Strickland criteria and the Boyes – Lister scale, and clinical and functional assessment of the limb using the validated DASH and MHQ scales. The impact of patient morphological characteristics, anatomical topography of the injury, surgical strategy, and rehabilitation protocol on postoperative outcome was assessed.

Results A statistically significant improvement in function was found according to the Strickland criterion with a surgical incision size not exceeding 1.5 phalanx lengths ($p < 0.05$). Functional results with the use of a four-thread 3/0 intrasegmental suture and a six-thread 3/0 suture according to the Strickland criterion and the Boyes Lister scale were statistically significantly better ($p < 0.05$). Poor results according to the Strickland criterion were observed statistically significantly more often in the absence of rehabilitation than with any type of rehabilitation ($p < 0.05$). Suture ruptured more frequently without rehabilitation ($p < 0.001$) than if rehabilitation with a hand therapist was provided.

Discussion The obtained results both differ from the published ones in the literature and confirm some parameters. The use of four- or six-thread 3/0 tendon suture configurations and a rehabilitation protocol with a specialist improves functional outcomes in the treatment of flexor tendon injuries of the triphalangeal fingers and reduces the risk of suture rupture. Combined flexor tendon and digital nerve injuries do not show functionally significant differences compared to isolated tendon injuries.

Conclusion A retrospective cohort analysis identified key surgical and rehabilitation factors that influence the outcomes of primary zone 2 flexor tendon reconstruction of the three-phalangeal fingers: the configuration and caliber of the intra-articular suture, the size of the surgical incision, and the availability and type of rehabilitation provided. These factors significantly had a significant impact on the clinical and functional outcomes of treatment.

Keywords: flexor tendons, tendon suture, tendon treatment

For citation: Chizhov AE, Tsybul ES, Rodomanova LA, Abdiba NV, Afanasiev AO. Features of surgical treatment for primary injury to the flexor tendons of the three-phalangeal fingers in the second zone: a retrospective cohort study. *Genij Ortopedii*. 2026;32(4):439-447. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-4-439-447.

ВВЕДЕНИЕ

Первичная реконструкция сухожилий сгибателей пальцев кисти при их повреждении в зоне костно-фиброзных каналов остается актуальной ортопедической проблемой по причине большого количества неудовлетворительных функциональных результатов в послеоперационном периоде [1, 2]. Получение хорошей функции после сухожильного шва возможно при комплексном лечении, которое заключается в правильной хирургической стратегии, получении раннего реабилитационного пособия у профильного специалиста (врача кистевого реабилитолога), а также высокой комплаентности самого пациента [3, 4].

Одной из проблем реконструктивной хирургии сухожилий остается высокая частота несостоятельности шва в раннем послеоперационном периоде, что зачастую обусловлено применением двухнитевых осевых конфигураций [5]. Согласно современным данным, для профилактики разрывов количество внутрисуставных нитей при формировании шва должно быть не менее четырех [6]. К числу значимых хирургических факторов, определяющих успех реабилитации и функциональный результат, относятся малоинвазивность и выбор оперативного доступа. Обширные доступы, а также отсутствие прецизионной техники при извлечении сухожилий сгибателей из костно-фиброзного канала способствуют формированию обширных спаек и рубцов. Это осложняет процесс восстановления и повышает риск несостоятельности сухожильного шва [7–9].

Выполнение ранней активной реабилитации должно осуществляться профильным специалистом, — врачом — кистевым реабилитологом. При отсутствии реабилитационного протокола неудовлетворительный результат возникает в 100 % случаев [10]. В настоящее время существуют различные варианты реабилитационных протоколов при лечении пациентов с травмами сухожилий сгибателей, которые подбирают индивидуально для каждого клинического случая [11–13].

Существенной проблемой в достижении хороших функциональных результатов лечения при повреждениях сухожилий сгибателей является низкая комплаентность пациентов. Несоблюдение пациентами послеоперационных рекомендаций и реабилитационного протокола связано с длительной потерей работоспособности, а также большой долей пациентов, имеющих низкий социально-экономический статус [14, 15]. Анализ факторов, влияющих на исход реабилитации, указывает на парадоксальную зависимость: приверженность пациентов к лечению возрастает пропорционально тяжести травмы. В то же время при повреждении лишь одного пальца низкий потенциал комплаентности зачастую нивелирует усилия хирурга, что диктует необходимость поиска новых подходов к ведению данной группы больных [16]. Кроме вышеперечисленных факторов на уровень комплаентности пациентов также влияют разный страховой статус, расовая принадлежность, наличие вредных привычек [17–19].

Функциональный результат при реконструкции повреждений сухожилий сгибателей пальцев кисти во второй зоне зависит от большого количества факторов, возникающих на каждом этапе лечебного процесса. Данное клиническое исследование проведено с целью анализа исходов хирургического лечения, выявления ключевых факторов риска, критически значимых в лечении данной когорты пациентов и влияющих на отдаленный функциональный исход, и выделения наиболее значимых аспектов в лечении сухожилий сгибателей.

Цель работы — определение ключевых хирургических и реабилитационных факторов, влияющих на исходы первичной реконструкции сухожилий сгибателей трехфаланговых пальцев кисти во второй зоне.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования. Одноцентровое когортное ретроспективное исследование, выполненное в соответствии с рекомендациями STROBE.

Этическое одобрение. Исследование одобрено локальным этическим комитетом НМИЦ ТО им. Р.Р. Вредена (протокол от 20.09.2024 № 4). Информированное согласие на обработку персональных данных и включение в исследование получено от всех пациентов.

Условия и сроки проведения. Включены данные ретроспективного анализа историй болезни, клинического и инструментального обследования 100 пациентов после выполнения первичного шва сухожилия глубокого сгибателя одного трехфалангового пальца кисти. Все пациенты получили хирургическое лечение в экстренном порядке в условиях НМИЦ ТО им. Р.Р. Вредена в период с 2022 по 2023 гг.

Критерии соответствия: пациенты с повреждением сухожилий поверхностного и глубокого сгибателей одного трехфалангового пальца кисти во второй зоне по классификации Verdan, которым выполнена первичная реконструкция сухожилия глубокого сгибателя.

Критерии не включения: повреждение обоих сосудисто-нервных пучков пальца; давность повреждения более 24 часов; пациенты с врожденными пороками развития кисти, тяжелыми травмами кисти в анамнезе (минно-взрывные, огнестрельные и пр.), системными заболеваниями, в том числе аутоиммунными.

Методы сбора и анализа данных

С целью оценки отдаленных результатов хирургического лечения проводили клиническое и инструментальное обследование пациентов в амбулаторных условиях, а также опрос с помощью стандартных анкет. Оценку функции пальца выполняли путём измерения диапазона движений в проксимальном и дистальном межфаланговых суставах пальца на основе шкалы Boyes – Lister и критериев Strickland, а также с использованием валидированных опросников DASH (*англ.*: Disability of the Arm, Shoulder and Hand) и MHQ (*англ.*: Michigan Hand outcomes Questionnaire). Измерение длины хирургического доступа проводили ортопедической линейкой по оси исследуемого пальца. Длина половины фаланги равнялась 0,5 ед. измерения, тогда как длина одной фаланги равнялась 1 ед. измерения. Силу захвата кисти исследовали при помощи электронного динамометра.

Описание медицинского вмешательства

Все хирургические вмешательства проводили хирурги, имеющие опыт в лечении пациентов с травмами сухожилий сгибателей пальцев, в условиях операционной, в положении пациента лежа на спине с укладкой поврежденной верхней конечности на приставном столике, под проводниковой анестезией в зоне плечевого сплетения или местной инфильтрационной анестезией. После установки кровоостанавливающего жгута в области средней трети плеча проводили расширение первичной раны в проксимальном и дистальном направлениях с использованием Z-образного доступа по Bruner или срединно-бокового доступа (mid-lateral). Осуществляли выведение проксимального и дистального концов сухожилия глубокого сгибателя в рану и выполняли шов сухожилия с использованием монофиламентного или полифиламентного шовного материала с калибром нити 3/0, 4/0 с различной конфигурацией внутривольного шва (двух-, четырех- или шестинитевой). Далее выполняли наложение адаптирующего шва. При наличии повреждения собственного пальцевого нерва выполняли эпиневральный шов с помощью монофиламентной нити калибром 8/0, 9/0 с использованием оптического увеличения. Восстановление повреждений осуществляли в индивидуальном порядке на усмотрение хирурга. Шов кожи осуществляли монофиламентным шовным материалом нитью с калибрами 3/0 или 4/0. После наложения асептической повязки проводили гипсовую иммобилизацию верхней конечности в положении физиологического сгибания на уровне запястья под углом 30° и сгибанием в области пястно-фаланговых суставов под углом 30–45° по тыльной поверхности от ногтевых фаланг II–V пальцев до средней трети предплечья.

Статистическая обработка данных

Формирование базы данных выполнено в табличном редакторе Excel пакета офисных программ Microsoft Office (Microsoft, США). Статистическую обработку данных проводили в программе SPSS Statistics (IBM, США).

Проверка типа распределения значений количественных переменных выполнена с помощью критерия Шапиро – Уилка. По результатам проверки все количественные переменные не подчинялись закону нормального распределения. В связи с этим, а также с учетом малого количества наблюдений в выборках, сформированных для проведения сравнительного и эксплоративного анализа, применяли непараметрические статистические методы. Для описания количественных переменных использовали медиану (Me), межквартильный размах (Q1; Q3) и крайние значения выборки (min–max). Данные описательной статистики представлены в виде Me [Q1; Q3] (min–max). Для качественных переменных приведены абсолютные значения частот и доля, выраженная в %.

Сравнительный анализ количественных переменных проводили с применением критерия Манна – Уитни при сравнении двух независимых групп, критерия Краскела – Уоллиса при сравнении трех и более независимых групп. В последнем случае при выявлении статистически значимых различий между группами проводили апостериорный тест Данн с поправкой Бонферрони на множественные сравнения к значению p . Для оценки наличия зависимости между двумя количественными переменными применяли корреляционный анализ с расчетом коэффициента корреляции Спирмена (ρ).

Сравнительный анализ качественных переменных выполняли путем построения таблиц сопряженности с последующим расчетом критерия χ^2 Пирсона. При нарушении условий применимости критерия χ^2 Пирсона (наличие нулевых значений эмпирических частот в ячейках, наличие ячеек с ожидаемыми частотами менее пяти) применяли точные критерии: Фишера (для четырехпольных таблиц сопряженности) или Фишера – Фримана – Холтона (для многопольных таблиц сопряженности).

При обнаружении статистически значимых различий между частотами событий в случае многопольных таблиц сопряженности проводили апостериорные тесты, заключающиеся в попарном сравнении пропорций с помощью Z-критерия. К полученным значениям p также применяли поправку Бонферрони на множественные сравнения.

С целью оценки влияния выявленных на предварительном этапе анализа значимых предикторов на критерий Strickland и критерий Boyes использовали метод порядковой регрессии. Применимость данной модели проверяли с помощью теста параллельности линий. Валидность модели подтверждалась при значении $p > 0.05$. Для оценки доли дисперсии зависимой переменной, объясняемой моделью, рассчитывали псевдо R² Найджелкерка. Данный показатель может принимать значения от 0 до 1, где более высокие значения соответствуют лучшему качеству модели. Результаты порядковой регрессии представлены в виде оценок коэффициентов, значения p , а также отношений шансов (ОШ) с соответствующими 95 % доверительными интервалами (95 % ДИ).

Исследование совместной связи толщины нити и вида осевого шва с показателями Strickland, Boyes – Lister, DASH и MHQ проводили с помощью двухфакторного непараметрического рангового дисперсионного анализа (ART-ANOVA) с post-hoc тестированием с помощью t-критерия Стьюдента на выровненных рангах с поправкой Бонферрони.

Критический уровень значимости для настоящего исследования был выбран $\alpha = 0,05$, то есть при $p < 0,05$ нулевая гипотеза отвергалась.

Характеристика пациентов

Исходные клинические и демографические характеристики 100 включённых пациентов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Клиническая характеристика пациентов

Характеристика	Количество пациентов ($n = 100$)	
	абс.	%
Пол: мужчины	68	68
Повреждение недоминирующей кисти	56	56
Травма V пальца	56	56
Механизм травмы: нож	64	64
Резаная рана с ровными краями	68	68
Сопутствующее повреждение нерва	18	18
Локализация раны в зоне ПМФС	46	46

Примечание: ПМФС — проксимальный межфаланговый сустав.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В большинстве случаев операции проводили под местной инфильтрационной анестезией (82 %) с использованием Z-образного доступа по Bruner (79 %). Наиболее часто применяли конфигурацию с четырехнитевым осевым швом (59 %) и калибр нити 3/0 (70 %). В 65 % случаев использовали монофиламентный шовный материал. Повреждения связок встречались у 20 пациентов (20 %). Размер доступа в среднем значении был равен двум единицам или длине двух фаланг. Иммобилизация в среднем составляла четыре недели.

К кистевому реабилитологу обратились 56 пациентов (56 %), у 21 пациента реабилитацию не выполняли (21 %). Среднее значение суммарного диапазона движений межфаланговых суставов поврежденного пальца составило 110°, что относится к удовлетворительной функции по критериям Strickland. Неудовлетворительные результаты преобладали над остальными по шкале Boyes – Lister и критериям Strickland. Тем не менее среднее значение опросников DASH (20) и MHQ (75) показало хорошие результаты. Разрыв шва встречался в 16 % случаев. Наиболее частые контрактуры — в проксимальном межфаланговом суставе (30 %). Сила захвата кисти составляла в среднем 26 кг на поврежденной верхней конечности и 27 кг на неповрежденной.

При сравнении характеристик пациентов, таких как пол, возраст, доминирование кисти, номер поврежденного пальца, с полученными результатами критериев Strickland и шкалой Boyes – Lister не выявлено статистически значимых различий ($p > 0,1$).

При сравнении хирургических факторов, таких как повреждение нервов, травмирующий агент, вид хирургического доступа, с полученными результатами критериев Strickland и шкалой Boyes – Lister также не выявлено значимых статистических различий ($p > 0,1$).

При сравнении категории размера хирургического доступа с полученными результатами критериев Strickland статистически значимые различия получены (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение размера хирургического доступа по количеству фаланг с критерием Strickland

Размер доступа по количеству фаланг		Критерий Strickland				Всего
		неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	отлично	
1,5	абс.	7	1	8	7	23
	%	18,9	4,3	28,6	58,3	23,0
2,0	абс.	20	15	14	4	53
	%	54,1	65,2	50,0	33,3	53,0
2,5	абс.	10	7	6	1	24
	%	27,0	30,4	21,4	8,3	24,0
Всего	абс.	37	23	28	12	100
	%	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Критерий χ^2 Пирсона: 14,060; $p = 0,029$.

Отличные результаты по критерию Strickland встречали статистически значимо чаще при доступе 1,5 фаланги ($p = 0,002$), чем при 2,0 ($p = 0,028^*$) и при 2,5 ($p = 0,050^*$) фаланги. По остальным сравниваемым парам пропорций статистически значимых различий не выявлено ($p > 0,05^*$).

При сравнении вида осевого шва в сочетании с калибром нити с полученными функциональными результатами критерия Strickland и шкалы Boyes – Lister имелось статистически значимое различие между конфигурациями двухнитевого шва калибра 3/0 и четырехнитевого шва калибра 4/0 ($p = 0,0203$ — Strickland; $p = 0,0469$ — Boyes – Lister), а также двухнитевого шва калибра 3/0 и шестинитевого шва калибра 3/0 ($p = 0,0094$ — Strickland; $p = 0,0440$ — Boyes – Lister). Функциональные результаты при применении четырехнитевого шва калибром 4/0 и шестинитевого шва калибром 3/0 были статистически значимо лучше, чем применение двухнитевого шва калибром 3/0.

При сравнении вида реабилитационного пособия с функциональными результатами критерия Strickland и шкалы Boyes – Lister получены статистически значимые различия.

Неудовлетворительные результаты по критерию Strickland встречались статистически значимо чаще, если реабилитацию не выполняли, чем при любых видах реабилитации (реабилитация в поликлинике — $p = 0,036^*$; кистевой реабилитолог — $p < 0,001^*$; самостоятельно — $p = 0,005^*$).

Также неудовлетворительные результаты по критерию Strickland встречались статистически значимо чаще, если реабилитацию пациенты проводили самостоятельно, а не с кистевым реабилитологом ($p = 0,005^*$).

Хорошие результаты по критерию Strickland встречались статистически значимо чаще при реабилитации с кистевым реабилитологом ($p = 0,010^*$), чем при самостоятельной реабилитации.

Отличные результаты наблюдались только при реабилитации с кистевым реабилитологом (табл. 3).

Таблица 3

Сравнение вида реабилитационного пособия относительно функционального результата по критерию Strickland

Вид реабилитации		Критерий Strickland				Всего
		неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	отлично	
Не выполнялась	абс.	20	1	0	0	21
	%	54,1	4,3	0,0	0,0	21,0
Поликлиника	абс.	3	3	0	0	6
	%	8,1	13,0	0,0	0,0	6,0
Реабилитолог	абс.	6	12	26	12	56
	%	16,2	52,2	92,9	100,0	56,0
Самостоятельно	абс.	8	7	2	0	17
	%	21,6	30,4	7,1	0,0	17,0
Всего	абс.	37	23	28	12	100
	%	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

* указаны значения p с учетом поправки Бонферрони на множественные сравнения.

При отсутствии реабилитации неудовлетворительные результаты по критерию Boyes встречались статистически значимо чаще ($p = 0,003^*$), чем удовлетворительные.

При реабилитации с кистевым реабилитологом хорошие результаты по критерию Boyes встречались статистически значимо чаще, чем неудовлетворительные ($p < 0,001^*$) и удовлетворительные ($p = 0,001^*$).

Неудовлетворительные результаты по критерию Boyes встречались статистически значимо чаще если реабилитацию не выполняли ($p < 0,001^*$) или выполняли самостоятельно ($p = 0,005$), чем при реабилитации с реабилитологом.

Отличные результаты наблюдались только при реабилитации с кистевым реабилитологом (табл. 4).

Таблица 4

Сравнение вида реабилитационного пособия относительно функционального результата по шкале Boyes – Lister

Вид реабилитации		Критерий Boyes				Всего
		неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	отлично	
Не выполнялась	абс.	18	3	0	0	21
	%	51,4	13,0	0,0	0,0	21,0
Поликлиника	абс.	3	3	0	0	6
	%	8,6	13,0	0,0	0,0	6,0
Реабилитолог	абс.	6	10	22	18	56
	%	17,1	43,5	91,7	100,0	56,0
Самостоятельно	абс.	8	7	2	0	17
	%	22,9	30,4	8,3	0,0	17,0
Всего	абс.	35	23	24	18	100
	%	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

При сравнении вида реабилитации и формирования контрактур межфаланговых суставов не выявлено статистически значимых различий ($p = 0,216$). Несмотря на это, выявлены статистически значимые различия в сравнении вида реабилитации и возникновения разрыва сухожильного шва (табл. 5). Разрыв шва чаще происходил при отсутствии реабилитации ($p < 0,001^*$), чем при реабилитации с кистевым терапевтом.

Таблица 5

Сравнение вида реабилитационного пособия относительно возникновения разрыва сухожильного шва

Вид реабилитации		Разрыв шва		Всего
		нет	да	
Не выполнялась	абс.	12	9	21
	%	14,3	56,3	21,0
Поликлиника	абс.	5	1	6
	%	6,0	6,3	6,0
Реабилитолог	абс.	53	3	56
	%	63,1	18,8	56,0
Самостоятельно	абс.	14	3	17
	%	16,7	18,8	17,0
Всего	абс.	84	16	100
	%	100,0	100,0	100,0

ОБСУЖДЕНИЕ

В данном ретроспективном исследовании проведен многофакторный анализ исходов после первичной хирургической реконструкции сухожилий сгибателей трехфаланговых пальцев кисти. Интерпретированы факторы, не влияющие на клинично-функциональные результаты. Повреждение собственных пальцевых нервов в сочетании с повреждением сухожилий сгибателей на одном пальце и их одномоментное восстановление не имело корреляции со сниженным диапазоном движений, тем самым, оно может быть выполнено путём наложения эпинеурального шва без применения пластики нерва, что подтверждается данными зарубежных источников [20, 21]. Пол и возраст пациентов не были статистически значимым фактором, из чего следует, что пациенты обоего пола молодого и пожилого возрас-

* указаны значения p с учетом поправки Бонферрони на множественные сравнения.

та имеют схожий уровень комплаентности и потенциал к восстановлению функции. Доминирование кисти и номер поврежденного пальца также не имели зависимости с полученными функциональными результатами. Качественные данные о влиянии доминирования кисти на послеоперационный результат у взрослых пациентов в литературном поле практически не представлены. Однако группа авторов сообщает о функционально лучших результатах у пациентов детского возраста при локализации повреждения сухожилий сгибателей на доминирующей кисти [22].

В нашем исследовании выявлены основные предикторы, связанные с получением неудовлетворительного функционального результата. К ним относятся выполнение двухнитевого шва вне зависимости от калибра нити и отсутствие выполнения реабилитации. Наличие данных предикторов увеличивало шанс получения неудовлетворительных результатов, разрывов сухожильного шва. Отсутствие реабилитации или выполнение её в поликлинических условиях хотя и не имело статистически значимых различий в сравнении с реабилитацией у профильного специалиста, но выявляло тенденцию к увеличению дефицита разгибания в межфаланговых суставах. Полученные результаты относительно конфигурации внутрисуставного шва имеют противоречия с опубликованными ранее исследованиями [23, 24]. Что касается профильного реабилитационного протокола совместно с врачом кистевым реабилитологом, имеются научные исследования, подтверждающие полученные результаты [10, 25].

Хирургическое лечение сухожилий сгибателей пальцев во второй зоне по причине анатомической и технической сложности выполнения, а также необходимости получения раннего реабилитационного пособия с профильным специалистом должно следовать общеизвестной концепции «One shot surgery», — выполнение технически надежного малотравматичного окончательного хирургического вмешательства. Ключевые хирургические и реабилитационные факторы, полученные в данном исследовании, рекомендуется учитывать для получения высоких функциональных результатов.

Ограничения исследования. Ретроспективный дизайн исследования ограничивает возможность установления причинно-следственных связей. Часть данных об интраоперационных деталях и реабилитационном протоколе получена из медицинской документации, что несёт риск неполноты сведений. Одноцентровый характер выборки может ограничивать обобщаемость результатов на другие учреждения. Относительно небольшой объём выборки ($n = 100$) снижает статистическую мощность при анализе редких исходов. Перечисленные ограничения следует учитывать при интерпретации полученных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного статистического анализа ретроспективной группы пациентов выявлены значимые функциональные различия в категориях конфигурации внутрисуставного шва и калибра шовного материала, а также зависимость функциональных результатов от реабилитационного пособия. Пол, возраст пациентов, доминирование кисти, вид хирургического доступа и сочетанное повреждение сухожилий и собственно пальцевого нерва не имели статистически значимых различий в послеоперационном периоде.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Исследование выполнено без дополнительного финансирования.

Этическая экспертиза. Исследование одобрено локальным этическим комитетом НМИЦ ТО им. Р.Р. Вредена (протокол от 20.09.2024 № 4).

Информированное согласие. Информированное добровольное согласие на участие в исследовании и обработку персональных данных получено от всех пациентов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Малишевский В.М., Паськов Р.В., Сергеев К.С. Сравнительный анализ функционального состояния кисти после хирургического восстановления сухожилий сгибателей пальцев. *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова*. 2025;32(3):586-594. doi: 10.17816/vto634380.
2. Вебер Е.В., Завьялов А.П., Авдеев А.И. и др. Структура обращаемости и способов лечения пациентов с травмой кисти и кистевого сустава в НМИЦ травматологии и ортопедии им. Р.Р. Вредена. *Травматология и ортопедия России*. 2024;30(4):92-100. doi: 10.17816/2311-2905-17608.
3. Tang JB, Lalonde D, Harhaus L, et al. Flexor tendon repair: recent changes and current methods. *J Hand Surg Eur Vol*. 2022;47(1):31-39. doi: 10.1177/17531934211053757.
4. Малишевский В.М., Паськов Р.В., Сергеев К.С. Сравнение биомеханических свойств различных видов шовного материала при создании сухожильного шва в эксперименте. *Гений ортопедии*. 2024;30(1):99-106. doi: 10.18019/1028-4427-2024-30-1-99-106.
5. Березин П.А., Золотов А.С., Волыхин Р.Д. и др. Сухожильные швы Розова и Kessler: общие свойства и различия. *Травматология и ортопедия России*. 2022;28(3):167-175. doi: 10.17816/2311-2905-1975.
6. Xu H, Huang X, Guo Z, et al. Outcome of Surgical Repair and Rehabilitation of Flexor Tendon Injuries in Zone II of the Hand: Systematic Review and Meta-Analysis. *J Hand Surg Am*. 2023;48(4):407.e1-407.e11. doi: 10.1016/j.jhsa.2021.11.013.
7. Xue R, Wong J, Imere A, et al. Current clinical opinion on surgical approaches and rehabilitation of hand flexor tendon injury – a questionnaire study. *Front Med Technol*. 2024;6:1269861. doi: 10.3389/fmedt.2024.1269861.

8. Stevens KA, Caruso JC, Fallahi A-KM, Patiño JM. Flexor Tendon Lacerations. In: *StatPearls [Internet]*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025.
9. Зенченко А.В., Чернякова Ю.М. Технология временной изоляции сухожилия глубокого сгибателя пальца кисти и ведение пациентов при отсроченном шве во второй зоне. *Гений ортопедии*. 2019;25(3):290-296. doi: 10.18019/1028-4427-2019-25-3-290-296.
10. Киселева А.Н., Наконечный Д.Г., Судякова М.Ю., Калашникова М.Р. факторы, влияющие на результат лечения пациентов с повреждением сухожилий сгибателей трехфаланговых пальцев кисти. *Современные проблемы науки и образования*. 2022;(1). doi: 10.17513/spno.31485.
11. Овсянникова А.Д. Реабилитация и тактика ведения пациентов после хирургического восстановления сухожилий сгибателей пальцев кисти. *Вопросы реконструктивной и пластической хирургии*. 2018;(2):62-73. doi: 10.17223/1814147/65/08.
12. Renberg M, Turesson C, Borén L, et al. Rehabilitation following flexor tendon injury in Zone 2: a randomized controlled study. *J Hand Surg Eur Vol*. 2023;48(8):783-791. doi: 10.1177/17531934231166336.
13. Pearce O, Brown MT, Fraser K, Lancerotto L. Flexor tendon injuries: Repair & Rehabilitation. *Injury*. 2021;52(8):2053-2067. doi: 10.1016/j.injury.2021.07.036.
14. Shaw AV, Holmes DG, Rodrigues JN, et al. Outcome measurement in adult flexor tendon injury: A systematic review. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*. 2022;75(4):1455-1466. doi: 10.1016/j.bjps.2021.08.033.
15. Mawhinney JA, Wormald JC, Ng M, et al. Epidemiology of acute flexor tendon injury and an analysis of outcomes - a study of 91,239 patients in England and Wales. *J Hand Surg Eur Vol*. 2025;50(11):1470-1477. doi: 10.1177/17531934251342419.
16. Svingen J, Arner M, Turesson C. Patients' experiences of flexor tendon rehabilitation in relation to adherence: a qualitative study. *Disabil Rehabil*. 2023;45(7):1115-1123. doi: 10.1080/09638288.2022.2051081.
17. McLaughlin MT, Moura SP, Edalatpour A, et al. Insurance Status Predicts Hand Therapy Adherence following Flexor Tendon Repair: A Retrospective Cohort Study. *Plast Reconstr Surg*. 2024;153(5):942e-951e. doi: 10.1097/PRS.00000000000010702.
18. Kaskutas V, Powell R. The impact of flexor tendon rehabilitation restrictions on individuals' independence with daily activities: implications for hand therapists. *J Hand Ther*. 2013;26(1):22-28. doi: 10.1016/j.jht.2012.08.004.
19. Powell RK, von der Heyde RL. The inclusion of activities of daily living in flexor tendon rehabilitation: a survey. *J Hand Ther*. 2014;27(1):23-29. doi: 10.1016/j.jht.2013.09.007.
20. Keane G, Stonner M, Pet MA. Does Digital Nerve Injury Affect Range of Motion Recovery After Zone 2 Flexor Tendon Repair? *Hand (N Y)*. 2023;18(2):230-235. doi: 10.1177/15589447211003187.
21. Isaacs J, Eswaran S, Ilyas A, et al. Digital Nerve Repair With Flexor Tendon Injury: Conduits are Less Effective. *Hand (N Y)*. 2025;15589447251406917. doi: 10.1177/15589447251406917.
22. Sanal-Toprak C, Yigit O, Kuzu Z, Baysal O. Effect of hand dominance on functional outcomes in paediatric patients with flexor tendon injuries: A cross-sectional study. *Int J Clin Pract*. 2021;75(8):e14323. doi: 10.1111/ijcp.14323.
23. Shaharan S, Bage T, Ibrahim N, et al. Rupture Rates Between 2-Strand and 4-Strand Flexor Tendon Repairs: Is Less More? *Ann Plast Surg*. 2020;84(1):43-46. doi: 10.1097/SAP.0000000000002113.
24. Hardwicke JT, Tan JJ, Foster MA, Titley OG. A systematic review of 2-strand versus multistrand core suture techniques and functional outcome after digital flexor tendon repair. *J Hand Surg Am*. 2014;39(4):686-695.e2. doi: 10.1016/j.jhsa.2013.12.037.
25. Neiduski RL, Powell RK. Flexor tendon rehabilitation in the 21st century: A systematic review. *J Hand Ther*. 2019;32(2):165-174. doi: 10.1016/j.jht.2018.06.001.

Статья поступила 26.03.2026; одобрена после рецензирования 06.04.2026; принята к публикации 09.06.2026.

The article was submitted 26.03.2026; approved after reviewing 06.04.2026; accepted for publication 09.06.2026.

Информация об авторах:

Александр Евгеньевич Чижов — врач — травматолог-ортопед, Santillabox@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-2019-6242>;

Евгений Сергеевич Цыбуль — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, научный сотрудник, na4med@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8105-3635>;

Любовь Анатольевна Родоманова — доктор медицинских наук, профессор, врач — травматолог-ортопед, заведующая отделением, rodomanovaliubov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2402-7307>;

Нино Важаевна Абдиба — врач — травматолог-ортопед, лаборант-исследователь, ninoabdiba@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9152-5299>;

Артем Олегович Афанасьев — врач — травматолог-ортопед, afar_kav@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-6407-5888>.

Information about the authors:

Alexander E. Chizhov — Orthopaedic Surgeon, Santillabox@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-2019-6242>;

Evgeny S. Tsybul — Candidate of Medical Sciences, Orthopaedic Surgeon, researcher, na4med@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0001-8105-3635>;

Lyubov A. Rodomanova — Doctor of Medical Sciences, Professor, Orthopaedic Surgeon, Head of Department, rodomanovaliubov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2402-7307>;

Nino V. Abdiba — Orthopaedic Surgeon, laboratory research assistant, ninoabdiba@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9152-5299>;

Artem O. Afanasyev — Orthopaedic Surgeon, afar_kav@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-6407-5888>.

Вклад авторов:

Чижов А.Е. — концепция и дизайн исследования, сбор данных, написание текста рукописи;

Цыбуль Е.С. — обзор литературы, редактирование рукописи;

Родоманова Л.А. — научное руководство, критический анализ и редактирование рукописи;

Абдиба Н.В. — сбор и обработка клинических данных;

Афанасьев А.О. — статистическая обработка данных, оформление результатов.

Все авторы одобрили окончательный вариант рукописи.



Оценка показателей микроциркуляции у пациентов с переломами костей конечностей при стимуляции репаративной регенерации

А.М. Миromanов✉, К.А. Гусев, А.Н. Старосельников, О.Б. Миронова

Читинская государственная медицинская академия, Чита, Россия

Автор, ответственный за переписку: Александр Михайлович Миromanов, miromanov_a@mail.ru

Аннотация

Введение. Несмотря на значительные достижения в изучении репаративной регенерации костной ткани, методы ранней диагностики нарушений консолидации отсутствуют. Важной нерешенной проблемой остается поиск методик комплексной стимуляции процессов консолидации. Разработка доступных критериев оценки нарушений консолидации при переломах и поиск препаратов комплексного воздействия на репарацию тканей опорно-двигательной системы являются актуальной задачей современной травматологии и ортопедии.

Цель работы — оценить показатели микроциркуляции у пациентов с неосложненным течением переломов длинных костей нижних конечностей и нарушением процессов консолидации для выявления ранних прогностических критериев и поиска терапевтических методик для стимуляции репаративной регенерации.

Материалы и методы. Исследовано 100 пациентов молодого возраста с переломами длинных костей конечностей: группа 1 ($n = 40$) — с неосложненным течением переломов; группа 2 ($n = 40$) — с замедленной консолидацией; группа 3 ($n = 20$) — с установленной замедленной консолидацией, получивших лечение биорегулятором (пептиды из коры головного мозга). Группа контроля ($n = 40$) представлена практически здоровыми лицами, сопоставимыми по полу и возрасту. Диагностику, лечение и реабилитацию осуществляли согласно клиническим рекомендациям. Определение показателей микроциркуляции (ПМ), шунтирования (ПШ), нейрогенного (НТ) и миогенного (МТ) тонуса сосудов, амплитуды эндотелиального, нейрогенного, миогенного и дыхательного диапазона колебаний проводили методом лазерной доплеровской флоуметрии в первые, вторые, пятые, десятые и 90-ые сутки после травмы. Статистическую обработку результатов исследования осуществляли с помощью пакета программ IBM SPSS Statistics Version 25.0.

Результаты. У пациентов с нормальной консолидацией, начиная со вторых суток, зарегистрирован прогрессивный рост ПМ и амплитуд активных колебаний на обеих конечностях, сопровождавшийся снижением НТ и МТ. При замедленной консолидации отмечали стабильно низкий показатель перфузии, а также повышенный НТ и МТ на поврежденной конечности ($p < 0,05$). На 90-ые сутки у пациентов, получивших лечение нейропептидным препаратом, значения НТ и МТ на поврежденной конечности существенно снижались, достигая уровня, сопоставимого с показателями нормальной консолидации ($p < 0,05$).

Обсуждение. Длительно сохраняющееся состояние гипоперфузии, повышенные НТ и МТ на поврежденной конечности, спазм прекапилляров и менее эффективное перераспределение кровотока у пациентов с нарушением консолидации связаны со стойкой симпатической активацией, которая приводит к постоянной вазоконстрикции и ограничению перфузии, что создаёт неблагоприятные условия как для ангиогенеза, так и для миграции клеток-предшественников в область формирования регенерата. Механизм действия пептидного биорегулятора объясняется активацией нейропептидов и нейротрофических факторов, оптимизацией баланса возбуждающих и тормозных аминокислот, а также ГАМК-ергическим воздействием, что в конечном итоге приводит к созданию более благоприятных условий для завершения остеогенеза.

Заключение. Параметры микроциркуляции у пациентов с нормально протекающими репаративными процессами костной ткани демонстрируют раннюю активацию всех механизмов регуляции, снижение НТ и МТ уже на пятые сутки на стороне повреждения, а также быстрое восстановление перфузии на здоровой конечности. Нормализацию показателей микроциркуляции регистрируют к десятым суткам после операции. У пациентов с нарушением консолидации переломов регистрируют длительно сохраняющееся состояние гипоперфузии, длительный спазм прекапилляров и менее эффективное перераспределение кровотока наряду с высоким НТ и МТ. Применение нейропептидного биорегулятора оказывает существенное влияние на регуляцию микроциркуляции в зоне перелома за счёт снижения НТ, МТ и ПШ, что позволяет рекомендовать его для стимуляции репаративной регенерации у пациентов с нарушением консолидации переломов.

Ключевые слова: переломы, микроциркуляция, нарушение консолидации, репаративная регенерация, стимуляция

Для цитирования: Миromanов А.М., Гусев К.А., Старосельников А.Н., Миронова О.Б. Оценка показателей микроциркуляции у пациентов с переломами костей конечностей при стимуляции репаративной регенерации. *Гений ортопедии*. 2026;32(4):448-458. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-4-448-458.



Microcirculation measured in patients with limb fractures during stimulation of reparative regeneration

A.M. Miromanov✉, K.A. Gusev, A.N. Staroselnikov, O.B. Mironova

Chita State Medical Academy, Chita, Russian Federation

Corresponding author: Alexander M. Miromanov, miromanov_a@mail.ru

Abstract

Introduction With advances in the study of bone reparative regeneration there are no methods for early detection of impaired consolidation. Methods for stimulating consolidation processes remain an unresolved question. The development of accessible criteria for assessing impaired fracture consolidation and medications for skeletal muscle tissue repair are challenges of orthopedic trauma care.

The **objective** was to measure microcirculation in patients with uncomplicated fractures to the long bones of the lower limb, impaired consolidation processes, and stimulation of reparative regeneration.

Material and methods The study included 100 young patients with long bone fractures: group 1 ($n = 40$) with uncomplicated fractures; group 2 ($n = 40$) with delayed consolidation; group 3 ($n = 20$) with established delayed consolidation treated with a bioregulator (peptides from the cerebral cortex). The control group ($n = 40$) consisted of healthy individuals matched for gender and age. Diagnosis, treatment and rehabilitation were produced according to clinical guidelines. Microcirculation index (MI), shunt index (SI), neurogenic (NT) and myogenic (MT) vascular tone, the amplitude of the endothelial, neurogenic, myogenic and respiratory oscillation ranges were measured using laser Doppler flowmetry on the first, second, fifth, tenth and 90th days after the injury. Statistical processing of the findings was performed using the IBM SPSS Statistics Version 25.0 software package.

Results Patients with normal consolidation showed a progressive increase in PM and active oscillation amplitudes in both limbs, a decrease in NT and MT after two days. Patients with delayed consolidation demonstrated a consistently low perfusion index and increased NT and MT in the injured limb ($p < 0.05$). Patients treated with the neuropeptide drug showed significantly decreased NT and MT in the injured limb, reaching levels comparable to those in normal consolidation ($p < 0.05$) after 90 days.

Discussion Long-term hypoperfusion, elevated NT and MT in the injured limb, precapillary spasm, and less efficient blood flow redistribution in patients with impaired consolidation were associated with persistent sympathetic activation, which led to persistent vasoconstriction and perfusion restriction, creating unfavorable conditions for angiogenesis and migration of progenitor cells to the area of regenerative bone formation. The mechanism of action of the peptide bioregulator could be explained by activated neuropeptides and neurotrophic factors, optimization of the balance of excitatory and inhibitory amino acids, and GABAergic effects, which ultimately led to the creation of more favorable local conditions for the completion of osteogenesis.

Conclusion Microcirculation in patients with normal bone reparative processes demonstrated early activation of all regulatory mechanisms, decreased HT and MT as early as the fifth day on the injured side, and rapid restoration of perfusion in the healthy limb. Normalized microcirculation was recorded after ten days of surgery. Prolonged hypoperfusion, prolonged precapillary spasm, and less effective blood flow redistribution, high HT and MT were observed in patients with impaired fracture consolidation. Neuropeptide bioregulator had a significant effect on the regulation of microcirculation at the fracture site through reduced HT, MT, and PSH and could be recommended for stimulating reparative regeneration in patients with impaired fracture healing.

Keywords: fractures, microcirculation, impaired consolidation, reparative regeneration, stimulation

For citation: Miromanov AM, Gusev KA, Staroselnikov AN, Mironova OB. Microcirculation measured in patients with limb fractures during stimulation of reparative regeneration. *Genij Ortopedii*. 2026;32(4):448-458. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-4-448-458.

ВВЕДЕНИЕ

Нарушение репаративной регенерации при переломах длинных костей конечностей является одним из наиболее часто встречающихся осложнений при травмах опорно-двигательного аппарата, достигая 30 %, и остается актуальной проблемой [1, 2, 3].

Коридор терапевтических возможностей использования консервативных методик для стимуляции регенерации ограничен в связи с достаточно поздним периодом верификации осложнений. Среди современных способов ранней диагностики можно выделить методы прогнозирования генетического полиморфизма, фотоакустическую визуализацию, магниторезонансную томографию (МРТ), динамическую контрастную МРТ, контрастную ультрасонографию [4, 5, 6]. Однако, несмотря на описанную эффективность, на данный момент в практике эти методики не получили широкого распространения из-за стоимости, сложности верификации данных или отсутствия необходимого оборудования [7].

С другой стороны, многофакторность репарации, разнообразие причин нарушения консолидации диктует поиск фундаментальных звеньев данного процесса, таких как изменение регионарного кровотока в области травмы, определяющих условия оксигенации тканей, миграции клеток предшественников и факторов роста. При дефиците кровоснабжения репаративные процессы в кости проходят хуже, однако установленные данные, такие как «васкуляризационный парадокс» при формировании гипертрофического типа ложных суставов, диктуют необходимость всестороннего анализа показателей кровообращения [8, 9].

Препараты на основе нейропептидов оказывают стимулирующее действие на репарацию костной ткани при переломах, однако механизм влияния на остеогенез изучен недостаточно, а, учитывая влияние лекарственного средства на стимуляцию ангиогенеза, регистрация показателей микроциркуляции поможет расширить понимание стимулирующего действия препарата [10].

Цель работы — оценить показатели микроциркуляции у пациентов с неосложненным течением переломов длинных костей нижних конечностей и нарушением процессов консолидации для выявления ранних прогностических критериев и поиска терапевтических методик для стимуляции репаративной регенерации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование одобрено локальным этическим комитетом ЧГМА (рег. № НИР — РК 034(03) № АААА-А16-116063010015-6) и соответствовало этическим принципам, закреплённым в Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации (1964 г, с поправками 2024 г.) [11].

Проведено комплексное клиническое обследование 100 пациентов обоего пола в возрасте от 18 до 45 лет с неосложненным и осложненным течением закрытых переломов костей голени:

- группа 1 ($n = 40$) — пациенты с неосложненным течением послеоперационного периода;
- группа 2 ($n = 40$) — пациенты с нарушением процессов консолидации (замедленная консолидация);
- группа 3 ($n = 20$) — пациенты с замедленной консолидацией перелома, которым на 60-ые сутки с момента травмы проводили стимуляцию репаративных процессов.

Группу контроля ($n = 40$) составили практически здоровые лица, сопоставимые по полу и возрасту.

Для оценки признаков консолидации использовали шкалу RUST (*англ.*: Radiological Union Scale for Tibia) [12, 13, 14] и рентгенологические критерии. Полное сращение перелома по шкале RUST регистрировали при достижении суммы баллов 10 и более. При анализе рентгенологических данных учитывали характерные признаки: слабо выраженная периостальная костная мозоль, частично перекрывающая линию излома без обеспечения полного сращения, указывала на замедленную консолидацию (Клинические рекомендации «Переломы бедренной кости (кроме проксимального отдела бедренной кости)», 2024; «Переломы диафиза большеберцовой кости», 2024).

Пациенты сопоставимы по возрасту, полу и характеру перелома. Всем больным при поступлении проводили открытую репозицию отломков с последующим функциональным металлоостеосинтезом (МОС) штифтами или пластинами (табл. 1). В дальнейшем применяли традиционную консервативную терапию (согласно клиническим рекомендациям).

В исследование не включали пациентов с острыми и/или хроническими сопутствующими заболеваниями, другими патологическими состояниями/травмами, недостаточно «анатомичным» сопоставлением костных отломков при репозиции, с сахарным диабетом, сопутствующими заболеваниями артерий и вен, повторными оперативными вмешательствами, а также пациентов, получавших антирезорбтивную терапию.

Таблица 1

Распределение исследуемых групп по полу, возрасту, характеру повреждения и виду остеосинтеза

Показатели		Контрольная группа (n = 40)		Группа 1 (n = 40)		Группа 2 (n = 40)		Группа 3 (n = 20)	
		абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%
Пол	Мужчины	25	62,5	24	60	23	57,5	12	60
	Женщины	15	37,5	16	40	17	42,5	8	40
Тип перелома костей голени по классификации АО/ASIF	42A1	–	–	12	30	14	35	7	35
	42A2	–	–	11	27,5	13	32,5	7	35
	42A3	–	–	14	35	10	25	4	20
	42B1	–	–	3	7,5	3	7,5	2	10
Вид остеосинтеза	Штифт	–	–	20	50	18	45	11	55
	Пластина	–	–	20	50	22	55	9	45
Возраст лет Me [Q ₁ ;Q ₃]		43 [41;45]		42 [41;45]		42 [41;45]		43 [41;45]	

Для усиления регенераторных процессов за счет воздействия на нейромоторный гомеостаз пациентам группы 3 выполняли курсовую местную терапию пептидным биорегулятором (ЛП-№-(000636)-(РГ-РУ)). Раствор нейропептида (10 мг) получали путем разведения в 0,5 % растворе новокаина 1,0–2,0 мл. Препарат вводили инъекционно параоссально в область перелома в асептических условиях под контролем ультразвукового аппарата [10].

Изучение параметров микроциркуляторного русла проводили с помощью неинвазивного метода лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ). Использовали аппарат ЛАКК-02 (НПП «Лазма», Россия). ЛДФ-граммы регистрировали в течение 7–10 мин. Датчик устанавливали по передней поверхности проксимальной части I межплюсневой промежутка пораженной конечности. Оценивали показатель микроциркуляции (ПМ). Расчет компонентов регуляции сосудистого тонуса осуществляли с помощью компьютерной программы, поставляемой производителем оборудования в комплекте. При вейвлет-преобразовании осцилляций кровотока получали показатели шунтирования (ПШ), нейрогенного (НТ) и миогенного (МТ) тонуса сосудов, максимальные амплитуды эндотелиального (Аэ), нейрогенного (Ан), миогенного (Ам) и дыхательного (Ад) диапазона колебаний. ЛДФ проводили в одинаковое время при одинаковой температуре в помещении (21 °С). Перед исследованиями испытуемые не принимали пищу или напитки, не курили. Исследования проводили в первые сутки после травмы, в последующем — на вторые, пятые, десятые и 90-ые сутки после оперативного вмешательства.

Статистическую обработку результатов исследования осуществляли с помощью пакета программ IBM SPSS Statistics Version 25.0 (лицензия № Z125-3301-14, IBM, США). При проведении статистического анализа руководствовались принципами Международного комитета редакторов медицинских журналов (ICMJE) и рекомендациями «Статистический анализ и методы в публикуемой литературе» (SAMPL). Учитывая численность исследуемых групп, оценку нормальности распределения признаков проводили с помощью W-критерия Шапиро – Уилка. Учитывая отличное от нормального распределение признаков, интервальные данные представлены в виде медианы, первого и третьего квартилей (Me [Q₁;Q₃]). Статистическую значимость различий показателей между группами оценивали путем определения U-критерия Манна – Уитни. Принимая во внимание множественные сравнения, дополнительно использовали поправку Холма [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Первым этапом работы проведено динамическое исследование показателей микроциркуляции и сосудистого тонуса у пациентов с неосложненным течением послеоперационного периода (группа 1), с развитием замедленной консолидации (группа 2) и контрольной группы (табл. 2).

Зарегистрировано, что в первые сутки после операции на интактной конечности у пациентов с неосложненным течением переломов средние значения перфузии (ПМ) составили 3,89, что было ниже как в сравнении с контрольной группой (4,93, $U_{0-1a} = 444$, $p = 0,017$), так и с группой 2 с замедленной консолидацией (4,06, $U_{1a-2a} = 497$, $p = 0,047$). На травмированной стороне значимых различий между группами не выявлено, но в обеих группах значения были ниже в сравнении с контрольной группой.

Начиная со вторых суток, на обеих конечностях регистрировали преобладание ПМ в группе с нормальной консолидацией: на вторые сутки здоровая сторона — 4,4 против 3,96 ($p < 0,001$), поврежденная — 2,52 к 1,63 ($p = 0,024$). На пятые и десятые сутки тенденция не изменилась ($p < 0,001$). ПМ на здоровой конечности в группе 1 нарастал до уровня контрольной группы, начиная со вторых суток (вторые сутки — $U_{0-1a} = 546$ ($p = 0,209$); пятые — $U_{0-1a} = 564$ ($p = 0,291$); десятые — $U_{0-1a} = 610$ ($p = 0,582$)). При замедленной консолидации на вторые и пятые сутки перфузия была достоверно ниже контроля ($(U_{0-2a} = 313$, $p = 0,028)$ и $(U_{0-2a} = 342$, $p = 0,076)$), и к десятым суткам разница перестала быть значимой ($U_{0-2a} = 355$, $p = 0,113$) (табл. 2).

Аэ на здоровой конечности достоверно не различалась между группами за весь период исследования. На поврежденной конечности отличия были установлены только на десятые сутки у пациентов с нормальной консолидацией (0,19 против 0,13, $p < 0,001$), в остальной период различия не зарегистрированы.

Ан, Ам и Ад колебаний не показали статистически значимых различий ни между группами с нормальной и замедленной консолидацией, ни с группой контроля ($p > 0,05$) за весь период наблюдения.

НТ в первые сутки на здоровой конечности был выше у пациентов с нормальной консолидацией (3,07 против 2,69, $p < 0,001$) и не отличался от контрольных значений ($p = 0,083$). НТ в группе с замедленным сращением не отличался от контроля. На пятые сутки ситуация менялась, на обеих конечностях НТ при нормальной консолидации становился ниже (здоровая — 2,65 к 2,89, $p = 0,006$; поврежденная — 2,21 к 3,47, $p = 0,005$). На десятые сутки на здоровой конечности разница исчезла, однако на травмированной показатель НТ оставался ниже при нормальном сращении (2,23 против 3,81, $p < 0,001$). В сравнении с контрольной группой НТ на здоровой конечности в обеих группах во все исследуемые даты не имел значимых отличий (табл. 2).

МТ на интактной конечности во все сроки наблюдения не выявил значимых различий. На поврежденной конечности в первые–вторые сутки межгрупповые отличия отсутствовали, а к пятым и десятым суткам МТ становился существенно ниже при нормальной консолидации (пятые сутки — 2,94 против 5,0; десятые — 3,47 против 4,98; все значения — $p < 0,001$) (табл. 2).

ПШ на здоровой конечности был выше при нормальной консолидации в первые, пятые и десятые сутки ($p < 0,005$), на вторые сутки различия не достигли статистической значимости. На поврежденной стороне ни в один из исследуемых сроков достоверных межгрупповых отличий не выявлено. В сравнении с контрольной группой в группе 1 ПШ на здоровой стороне демонстрировал более высокий уровень на всех сроках (первые сутки — $p = 0,133$; вторые — $p = 0,086$; пятые — $p = 0,074$; десятые — $p = 0,072$). В группе замедленной консолидации ПШ оставался на уровне контрольной группы (все $p > 0,05$) (табл. 2).

Таблица 2

Параметры микроциркуляции кожи стопы у пациентов с неосложненным течением переломов, развитием замедленной консолидации и практически здоровых лиц, Ме[Q1;Q3]

Показатель	День	Контрольная группа (n = 40)	Группа 1 Неосложненное течение (n = 40)		Группа 2 Замедленная консолидация (n = 40)		Критерий Манна – Уитни (U)
		ЗК	ЗК	ПК	ЗК	ПК	
ПМ (пф. ед.)	1	4,93 [2,03;7,75]	3,89 [3,13;4,29]	1,89 [0,73;6,8]	4,06 [3,19;4,41]	1,96 [0,13;4,58]	U _{0-1a} = 444; $p = 0,017$ U _{0-2a} = 336; $p = 0,063$ U _{1a-2a} = 497; $p = 0,047$ U _{1b-2b} = 680; $p = 0,0978$
	2	4,93 [2,03;7,75]	4,4 [3,46;4,9]	2,52 [0,7;3,69]	3,96 [2,92;4,37]	1,63 [0,41;4,0]	U _{0-1a} = 546; $p = 0,209$ U _{0-2a} = 313; $p = 0,028$ U _{1a-2a} = 174; $p < 0,001^*$ U _{1b-2b} = 472; $p = 0,024$
	5	4,93 [2,03;7,75]	4,51 [3,72;4,93]	3,76 [1,27;6,73]	4,16 [3,12;4,57]	1,88 [0,31;5,1]	U _{0-1a} = 564; $p = 0,291$ U _{0-2a} = 342; $p = 0,076$ U _{1a-2a} = 211; $p < 0,001^*$ U _{1b-2b} = 288; $p < 0,001^*$
	10	4,93 [2,03;7,75]	4,71 [3,74;5,23]	3,8 [0,27;8,34]	4,19 [3,32;4,54]	1,79 [1,0;7,13]	U _{0-1a} = 610; $p = 0,582$ U _{0-2a} = 355; $p = 0,113$ U _{1a-2a} = 124; $p < 0,001^*$ U _{1b-2b} = 270; $p < 0,001^*$
Аэ (пф. ед.)	1	0,32 [0,11;0,7]	0,29 [0,14;0,36]	0,03 [0,01;0,5]	0,28 [0,19;0,31]	0,03 [0,01;0,35]	U _{0-1a} = 543; $p = 0,197$ U _{0-2a} = 338; $p = 0,067$ U _{1a-2a} = 490; $p = 0,039$ U _{1b-2b} = 680; $p = 0,983$
	2	0,32 [0,11;0,7]	0,3 [0,18;0,37]	0,1 [0,02;0,22]	0,29 [0,02;0,35]	0,05 [0,02;0,35]	U _{0-1a} = 583; $p = 0,396$ U _{0-2a} = 400; $p = 0,348$ U _{1a-2a} = 594; $p = 0,343$ U _{1b-2b} = 493; $p = 0,042$
	5	0,32 [0,11;0,7]	0,31 [0,19;0,38]	0,12 [0,02;0,98]	0,34 [0,25;0,37]	0,09 [0,03;0,52]	U _{0-1a} = 611,5; $p = 0,593$ U _{0-2a} = 453; $p = 0,863$ U _{1a-2a} = 467; $p = 0,021$ U _{1b-2b} = 508; $p = 0,061$
	10	0,32 [0,11;0,7]	0,33 [0,18;0,41]	0,19 [0,11;0,98]	0,36 [0,30;0,38]	0,13 [0,09;0,47]	U _{0-1a} = 639; $p = 0,817$ U _{0-2a} = 392; $p = 0,292$ U _{1a-2a} = 475; $p = 0,026$ U _{1b-2b} = 205; $p < 0,001^*$

Таблица 2 (продолжение)

Параметры микроциркуляции кожи стопы у пациентов с неосложненным течением переломов, развитием замедленной консолидации и практически здоровых лиц, Me[Q1;Q3]

Показатель	День	Контрольная группа (n = 40)	Группа 1 Неосложненное течение (n = 40)		Группа 2 Замедленная консолидация (n = 40)		Критерий Манна – Уитни (U)
			ЗК	ЗК	ПК	ЗК	ПК
Ан (пф. ед.)	1	0,14 [0,05;1,25]	0,29 [0,04;0,4 1]	0,04 [0,01; 0,23]	0,29 [0,24;0,32]	0,04 [0,01;0,46]	U _{0-1a} = 509; p = 0,096 U _{0-2a} = 365; p = 0,149 U _{1a-2a} = 648; p = 0,714 U _{1b-2b} = 676; p = 0,948
	2	0,14 [0,05;1,25]	0,3 [0,09;0,42]	0,08 [0,01;0,27]	0,33 [0,27;0,35]	0,08 [0,02;0,31]	U _{0-1a} = 475; p = 0,041 U _{0-2a} = 278; p = 0,007* U _{1a-2a} = 549; p = 0,152 U _{1b-2b} = 668,5; p = 0,884
	5	0,14 [0,05;1,25]	0,32 [0,14;0,42]	0,15 [0,03;0,47]	0,31 [0,19;0,35]	0,1 [0,01;0,68]	U _{0-1a} = 442; p = 0,016* U _{0-2a} = 338; p = 0,067 U _{1a-2a} = 511; p = 0,066 U _{1b-2b} = 404; p = 0,003*
	10	0,14 [0,05;1,25]	0,35 [0,1;0,47]	0,19 [0,05;1,12]	0,32 [0,23;0,35]	0,27 [0,07;0,51]	U _{0-1a} = 425; p = 0,01* U _{0-2a} = 316; p = 0,031 U _{1a-2a} = 482; p = 0,031 U _{1b-2b} = 538; p = 0,121
Ам (пф. ед.)	1	0,13 [0,04;1,13]	0,17 [0,06;0,27]	0,05 [0,01;0,29]	0,15 [0,06;0,18]	0,02 [0,01;0,4]	U _{0-1a} = 502; p = 0,081 U _{0-2a} = 461; p = 0,954 U _{1a-2a} = 421; p = 0,005* U _{1b-2b} = 479; p = 0,029
	2	0,13 [0,04;1,13]	0,19 [0,07;0,26]	0,07 [0,02;0,29]	0,14 [0,3;0,19]	0,06 [0,02;0,36]	U _{0-1a} = 405; p = 0,005* U _{0-2a} = 439; p = 0,707 U _{1a-2a} = 235; p < 0,001* U _{1b-2b} = 628,5; p = 0,565
	5	0,13 [0,04;1,13]	0,2 [0,05;0,28]	0,12 [0,01;0,3]	0,19 [0,08;0,24]	0,1 [0,02;0,47]	U _{0-1a} = 385,5; p = 0,002* U _{0-2a} = 281; p = 0,008* U _{1a-2a} = 569; p = 0,224 U _{1b-2b} = 535,5; p = 0,115
	10	0,13 [0,04;1,13]	0,23 [0,11;0,4]	0,15 [0,09;1,62]	0,21 [0,1; 0,26]	0,14 [0,05;0,31]	U _{0-1a} = 306,5; p < 0,001* U _{0-2a} = 223; p < 0,001* U _{1a-2a} = 546; p = 0,143 U _{1b-2b} = 628; p = 0,561
Ад (пф. ед.)	1	0,1 [0,03;0,68]	0,12 [0,06;0,15]	0,05 [0,01;0,3]	0,1 [-0,01;0,15]	0,06 [0,02;0,3]	U _{0-1a} = 566; p = 0,298 U _{0-2a} = 411; p = 0,436 U _{1a-2a} = 445; p = 0,011* U _{1b-2b} = 581; p = 0,276
	2	0,1 [0,03;0,68]	0,13 [0,1;0,15]	0,05 [0,01;0,32]	0,11 [0;0,16]	0,05 [0,02;0,29]	U _{0-1a} = 467,5; p = 0,044 U _{0-2a} = 464; p = 0,988 U _{1a-2a} = 404; p = 0,004* U _{1b-2b} = 680; p = 0,983
	5	0,1 [0,03;0,68]	0,13 [0,01;0,2]	0,1 [0,02;0,32]	0,13 [0,11;0,15]	0,09 [0,01;0,48]	U _{0-1a} = 500; p = 0,077 U _{0-2a} = 300; p = 0,017 U _{1a-2a} = 632; p = 0,590 U _{1b-2b} = 578; p = 0,263
	10	0,1 [0,03;0,68]	0,15 [0,03;0,22]	0,1 [0,02;0,38]	0,14 [0,12;0,16]	0,09 [0,02;0,47]	U _{0-1a} = 363,5; p = 0,001* U _{0-2a} = 229; p = 0,001* U _{1a-2a} = 621; p = 0,511 U _{1b-2b} = 558; p = 0,181
НТ (отн. ед.)	1	2,61 [0,26;5,0]	3,07 [2,22;3,52]	2,73 [1,27;8,8]	2,69 [1,71;3,09]	3,68 [1,19;7,9]	U _{0-1a} = 502,5; p = 0,083 U _{0-2a} = 450; p = 0,829 U _{1a-2a} = 203; p < 0,001* U _{1b-2b} = 615; p = 0,471
	2	2,61 [0,26;5,0]	2,75 [1,93;3,18]	3,83 [1,3;7,0]	2,76 [1,76;3,17]	3,32 [1,47;6,32]	U _{0-1a} = 611; p = 0,590 U _{0-2a} = 440; p = 0,718 U _{1a-2a} = 651; p = 0,739 U _{1b-2b} = 609,5; p = 0,435
	5	2,61 [0,26;5,0]	2,65 [2,02;2,99]	2,21 [1,15;7,63]	2,89 [1,74;3,36]	3,47 [1,56;6,0]	U _{0-1a} = 636; p = 0,792 U _{0-2a} = 407; p = 0,403 U _{1a-2a} = 424; p = 0,006* U _{1b-2b} = 418,5; p = 0,005*
	10	2,61 [0,26;5,0]	2,6 [1,9;2,97]	2,23 [0,7;5,8]	2,71 [1,56;3,18]	3,81 [2,05;5,9]	U _{0-1a} = 652; p = 0,930 U _{0-2a} = 453; p = 0,863 U _{1a-2a} = 585; p = 0,297 U _{1b-2b} = 301; p < 0,001*

Таблица 2 (продолжение)

Параметры микроциркуляции кожи стопы у пациентов с неосложненным течением переломов, развитием замедленной консолидации и практически здоровых лиц, Ме[Q1;Q3]

Показатель	День	Контрольная группа (n = 40)	Группа 1 Неосложненное течение (n = 40)		Группа 2 Замедленная консолидация (n = 40)		Критерий Манна – Уитни (U)
		ЗК	ЗК	ПК	ЗК	ПК	
МТ (отн. ед.)	1	3,57 [2,23;5,44]	3,23 [2,2;3,78]	5,24 [0,97;8,59]	3,12 [2,4;3,41]	4,83 [1,98;6,95]	$U_{0-1a} = 434,5; p = 0,013^*$ $U_{0-2a} = 251; p = 0,002^*$ $U_{1a-2a} = 494; p = 0,043$ $U_{1b-2b} = 662; p = 0,830$
	2	3,57 [2,23;5,44]	3,41 [2,68;3,79]	4,91 [2,02;7,8]	3,16 [2,44;3,45]	4,38 [1,91;6,46]	$U_{0-1a} = 560; p = 0,271$ $U_{0-2a} = 264; p = 0,004^*$ $U_{1a-2a} = 274; p < 0,001^*$ $U_{1b-2b} = 587; p = 0,307$
	5	3,57 [2,23;5,44]	3,52 [2,67;3,97]	2,94 [1,14;6,1]	3,24 [2,52;3,53]	5,0 [2,26;6,40]	$U_{0-1a} = 639; p = 0,817$ $U_{0-2a} = 299; p = 0,017^*$ $U_{1a-2a} = 267; p < 0,001^*$ $U_{1b-2b} = 369; p = 0,001^*$
	10	3,57 [2,23;5,44]	3,59 [2,99;3,92]	3,47 [1,45;6,0]	3,28 [2,56;3,57]	4,98 [2,37;6,22]	$U_{0-1a} = 621; p = 0,668$ $U_{0-2a} = 309; p = 0,024^*$ $U_{1a-2a} = 159; p < 0,001^*$ $U_{1b-2b} = 347,5; p < 0,001^*$
ПШ (отн. ед.)	1	1,09 [0,04;3,61]	1,4 [0,80;1,73]	0,6 [0,2;3,0]	1,3 [0,58;1,59]	0,86 [0,36;3,0]	$U_{0-1a} = 523,5; p = 0,133$ $U_{0-2a} = 433; p = 0,644$ $U_{1a-2a} = 450; p = 0,013$ $U_{1b-2b} = 557,5; p = 0,180$
	2	1,09 [0,04;3,61]	1,43 [0,91;1,71]	0,9 [0,3;2,7]	1,37 [0,65;1,66]	0,97 [0,45;2,73]	$U_{0-1a} = 504; p = 0,086$ $U_{0-2a} = 411; p = 0,436$ $U_{1a-2a} = 515; p = 0,072$ $U_{1b-2b} = 595; p = 0,349$
	5	1,09 [0,04;3,61]	1,48 [0,89;1,78]	1,15 [0,2;3,6]	1,27 [0,55;1,56]	0,98 [0,14;3,20]	$U_{0-1a} = 498; p = 0,074$ $U_{0-2a} = 443; p = 0,751$ $U_{1a-2a} = 285; p < 0,001^*$ $U_{1b-2b} = 572; p = 0,236$
	10	1,09 [0,04;3,61]	1,46 [0,97;1,72]	1,0 [0,5;3,7]	1,36 [0,64;1,65]	1,02 [0,21;2,65]	$U_{0-1a} = 496,5; p = 0,072$ $U_{0-2a} = 414; p = 0,462$ $U_{1a-2a} = 431; p = 0,007^*$ $U_{1b-2b} = 628; p = 0,561$

Примечание: ЗК — здоровая конечность, ПК — поврежденная конечность; U_{0-1a} — отличие от соответствующего показателя контрольной группы с группой 1 на здоровой конечности достоверно при $p < 0,05$; U_{0-1b} — отличие от соответствующего показателя контрольной группы с группой 2 на здоровой конечности достоверно при $p < 0,05$; U_{1a-2a} — отличие группы 1 от соответствующего показателя группы 2 на здоровой конечности достоверно при $p < 0,05$; U_{1b-2b} — отличие группы 1 от соответствующего показателя группы 2 на травмированной конечности достоверно при $p < 0,05$; * — наличие статистической значимости после применения поправки Холма.

Вторым этапом нами проведено определение изменений показателей микроциркуляции и сосудистого тонуса и пациентов с замедленной консолидацией при стимуляции нейротрофином (группа 3). Данные сравнивали с данными пациентов, получавших стандартную терапию (группа 1, 2), и практически здоровыми лицами (контрольная группа) на 90-ые сутки после операции (табл. 3).

На 90-ые сутки после оперативного лечения и на 30-ые сутки после лечения пептидным биорегулятором (группа 3, $n = 20$) большинство параметров микроциркуляции на обеих конечностях не имели статистически значимых отличий от таковых у пациентов с нормальной (группа 1, $n = 40$) и замедленной (группа 2, $n = 40$) консолидацией. Однако были выявлены изменения амплитуды миогенных колебаний, нейрогенного и миогенного тонуса, а также показателя шунтирования. На поврежденной конечности Ам у больных группы 1 была выше, чем в группе 3 (0,16 к 0,12, $p = 0,011$). НТ при замедленной консолидации в группе 2 превышал показатели группы 3 на поврежденной конечности (3,18 против 2,20, $p < 0,001$), тогда как на здоровой конечности различия отсутствовали. МТ на поврежденной стороне также был значимо выше в группе 2, чем в группе 3 (4,06 против 2,90, $p = 0,002$), на здоровой конечности различий не зафиксировано. ПШ на травмированной конечности в группе 1 значительно превосходил таковой в группе 3 (1,96 [1,62;2,22] против 1,22 [0,75;1,80], $p < 0,001$), по остальным сопоставлениям ПШ не различался. ПМ, Аэ, Ан, Ад не продемонстрировали значимых межгрупповых отличий ни в одном из вариантов сравнения (табл. 3).

Сравнение с контрольной группой показало, что у всех пациентов, независимо от характера консолидации и факта лечения, ПМ на здоровой конечности оставалась значимо ниже (группа 1 — $U_{0-1a} = 222$, $p < 0,001$; группа 2 — $U_{0-2a} = 231$, $p < 0,001$; группа 3 — $U_{0-3a} = 58$, $p < 0,001$). Аэ на интактной стороне также была ниже контроля во всех группах (все значения — $p < 0,005$). Ан не отличалась от контроля

ни в одной из групп ($p < 0,005$). МТ на здоровой стороне также был сопоставим с нормой, хотя в группе 3 отмечена тенденция к его повышению (4,10 против 3,57, $p = 0,052$). ПШ на интактной конечности во всех группах соответствовал контрольному уровню (все — $p > 0,05$). Ам, Ад, НТ и ПШ во всех группах на этом сроке не отличались от показателей контрольной группы ($p > 0,05$) (табл. 3).

Таблица 3

Параметры микроциркуляции кожи стопы у пациентов с неосложненным течением переломов, развитием замедленной консолидации и при стимуляции репаративной регенерации на 90 сутки после травмы, $Me[Q_1; Q_3]$

Показатель	Группа 0 (n = 40)	Группа 1 (n = 40)		Группа 2 (n = 40)		Группа 3 (n = 20)		У критерий Манна – Уитни
		ЗК	ПК	ЗК	ПК	ЗК	ПК	
ПМ (пф. ед.)	4,93 [2,03;7,75]	2,05 [0,85;7,82]	1,75 [0,10;8,01]	1,69 [0,80;6,79]	1,11 [0,36;6,85]	1,65 [0,80;7,30]	1,52 [0,80;6,20]	$U_{0-1a} = 222; p < 0,001^*$ $U_{0-2a} = 231; p < 0,001^*$ $U_{0-3a} = 58; p < 0,001^*$ $U_{1a-2a} = 659; p = 0,800$ $U_{1a-3a} = 349; p = 0,185$ $U_{2a-3a} = 273; p = 0,475$ $U_{1b-2b} = 646; p = 0,698$ $U_{1b-3b} = 407; p = 0,633$ $U_{2b-3b} = 288; p = 0,664$
Аэ (пф. ед.)	0,32 [0,11;0,7]	0,10 [0,01;0,78]	0,17 [0,02;1,04]	0,08 [0,01;0,72]	0,09 [0,02;0,50]	0,07 [0,01;0,75]	0,09 [0,04;0,48]	$U_{0-1a} = 320; p < 0,001^*$ $U_{0-2a} = 198; p < 0,001^*$ $U_{0-3a} = 145; p = 0,002^*$ $U_{1a-2a} = 613; p = 0,454$ $U_{1a-3a} = 385; p = 0,421$ $U_{2a-3a} = 310; p = 0,862$ $U_{1b-2b} = 440; p = 0,009$ $U_{1b-3b} = 310; p = 0,060$ $U_{2b-3b} = 275; p = 0,493$
Ан (пф. ед.)	0,14 [0,05;1,25]	0,10 [0,01;0,98]	0,12 [0,01;1,34]	0,09 [0,02;0,73]	0,09 [0,02;0,61]	0,08 [0,01;0,85]	0,07 [0,02;0,50]	$U_{0-1a} = 506; p = 0,090$ $U_{0-2a} = 319; p = 0,035$ $U_{0-3a} = 178; p = 0,015$ $U_{1a-2a} = 639; p = 0,639$ $U_{1a-3a} = 371; p = 0,314$ $U_{2a-3a} = 271; p = 0,445$ $U_{1b-2b} = 508; p = 0,060$ $U_{1b-3b} = 336; p = 0,130$ $U_{2b-3b} = 305; p = 0,923$
Ам (пф. ед.)	0,13 [0,04;1,13]	0,17 [0,02;0,92]	0,16 [0,07;2,51]	0,11 [0,02;0,60]	0,12 [0,04;0,48]	0,11 [0,02;0,80]	0,12 [0,05;0,45]	$U_{0-1a} = 610; p = 0,581$ $U_{0-2a} = 376; p = 0,199$ $U_{0-3a} = 267; p = 0,512$ $U_{1a-2a} = 505; p = 0,056$ $U_{1a-3a} = 363; p = 0,264$ $U_{2a-3a} = 279; p = 0,549$ $U_{1b-2b} = 412; p = 0,004^*$ $U_{1b-3b} = 265; p = 0,011$ $U_{2b-3b} = 297; p = 0,802$
Ад (пф. ед.)	0,1 [0,03;0,68]	0,15 [0,01;0,78]	0,09 [0,01;0,36]	0,09 [0,01;0,57]	0,07 [0,01;0,45]	0,07 [0,01;0,65]	0,07 [0,02;0,04]	$U_{0-1a} = 565; p = 0,295$ $U_{0-2a} = 342; p = 0,075$ $U_{0-3a} = 212; p = 0,081$ $U_{1a-2a} = 480; p = 0,029$ $U_{1a-3a} = 322; p = 0,086$ $U_{2a-3a} = 307; p = 0,954$ $U_{1b-2b} = 540; p = 0,125$ $U_{1b-3b} = 353; p = 0,204$ $U_{2b-3b} = 304; p = 0,900$
НТ (отн. ед.)	2,61 [0,26;5,0]	2,26 [1,40;5,23]	1,80 [0,61;5,87]	3,0 [1,15;5,60]	3,18 [1,78;5,97]	1,9 [1,30;5,40]	2,20 [1,60;5,20]	$U_{0-1a} = 654; p = 0,947$ $U_{0-2a} = 397; p = 0,327$ $U_{0-3a} = 253; p = 0,352$ $U_{1a-2a} = 544; p = 0,138$ $U_{1a-3a} = 353; p = 0,205$ $U_{2a-3a} = 184; p = 0,015$ $U_{1b-2b} = 368; p < 0,001^*$ $U_{1b-3b} = 371; p = 0,314$ $U_{2b-3b} = 112; p < 0,001^*$
МТ (отн. ед.)	3,57 [2,23;5,44]	3,01 [2,06;6,04]	3,20 [1,38;5,69]	3,9 [1,76;5,50]	4,06 [2,25;5,90]	4,10 [1,90;5,80]	2,90 [2,30;5,40]	$U_{0-1a} = 586; p = 0,412$ $U_{0-2a} = 385; p = 0,248$ $U_{0-3a} = 202; p = 0,052$ $U_{1a-2a} = 584; p = 0,292$ $U_{1a-3a} = 373; p = 0,328$ $U_{2a-3a} = 206; p = 0,045$ $U_{1b-2b} = 530; p = 0,101$ $U_{1b-3b} = 411; p = 0,674$ $U_{2b-3b} = 151; p = 0,002^*$

Таблица 3 (продолжение)

Параметры микроциркуляции кожи стопы у пациентов с неосложненным течением переломов, развитием замедленной консолидации и при стимуляции репаративной регенерации на 90 сутки после травмы, Me[Q₁;Q₃]

Показатель	Группа 0 (n = 40)	Группа 1 (n = 40)		Группа 2 (n = 40)		Группа 3 (n = 20)		U критерий Манна – Уитни
		ЗК	ПК	ЗК	ПК	ЗК	ПК	
ПШ (отн. ед.)	1,09 [0,04;3,61]	1,21 [0,82;1,48]	1,96 [1,62;2,22]	1,14 [0,54;1,42]	1,07 [0,68;1,59]	1,12 [0,70;1,48]	1,22 [0,75;1,80]	U _{0-1a} = 654; p = 0,943 U _{0-2a} = 448; p = 0,806 U _{0-3a} = 286; p = 0,774 U _{1a-2a} = 590; p = 0,319 U _{1a-3a} = 411; p = 0,669 U _{2a-3a} = 295; p = 0,772 U _{1b-2b} = 000; p < 0,001* U _{1b-3b} = 41; p < 0,001* U _{2b-3b} = 213; p = 0,06

Примечание: ЗК — здоровая конечность, ПК — поврежденная конечность; U_{0-1a} — отличие от соответствующего показателя контрольной группы с группой 1 на здоровой конечности достоверно при p < 0,05; U_{0-2a} — отличие от соответствующего показателя контрольной группы с группой 2 на здоровой конечности достоверно при p < 0,05; U_{0-3a} — отличие от соответствующего показателя контрольной группы с группой 3 на здоровой конечности достоверно при p < 0,05; U_{1a-2a} — отличие группы 1 от соответствующего показателя группы 2 на здоровой конечности достоверно при p < 0,05; U_{1a-3a} — отличие группы 1 от соответствующего показателя группы 3 на здоровой конечности достоверно при p < 0,05; U_{2a-3a} — отличие группы 2 от соответствующего показателя группы 3 на здоровой конечности достоверно при p < 0,05; U_{1b-2b} — отличие группы 1 от соответствующего показателя группы 2 на травмированной конечности достоверно при p < 0,05; U_{1b-3b} — группы 1 от соответствующего показателя группы 3 на здоровой конечности достоверно при p < 0,05; U_{2b-3b} — отличие группы 2 от соответствующего показателя группы 3 на здоровой конечности достоверно при p < 0,05; * — наличие статистической значимости после применения поправки Холма.

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведённое исследование демонстрирует разнонаправленность динамики параметров микроциркуляторного русла у пациентов с нормальной и замедленной консолидацией переломов костей голени в послеоперационном периоде. Взаимосвязь ангиогенеза и остеогенеза является фундаментальной закономерностью репаративной регенерации костной ткани, что позволяет рассматривать показатели микроциркуляции в качестве объективных критериев течения репаративного процесса. Метод ЛДФ даёт возможность неинвазивно в режиме реального времени регистрировать не только уровень тканевой перфузии, но и состояние механизмов активной модуляции сосудистого тонуса (эндотелиального, нейрогенного и миогенного), что отличает его от рутинных визуализационных методик. В первые сутки после операции у больных обеих клинических групп наблюдали значимое снижение перфузии как на здоровой, так и на повреждённой конечности по сравнению с контролем. Данные результаты согласуются с представлениями о системной реакции микроциркуляторного русла на травму, опосредованной активацией симпатoadреналовой системы и выбросом вазоконстрикторных медиаторов [16, 17]. Уже на данном сроке ПМ на интактной конечности у пациентов с нормальной консолидацией был ниже, чем в группе с замедленным сращением, что может отражать более выраженное перераспределение кровотока из периферического русла в пользу зоны повреждения. Со вторых по десятые сутки у больных с неосложнённым течением регистрировали прогрессивный рост ПМ на обеих конечностях, тогда как при нарушении консолидации перфузия оставалась стабильно низкой. Сравнение с контрольной группой подтверждает эту закономерность. Так, при нормальном сращении уровень перфузии на здоровой стороне восстанавливался до нормы уже со вторых суток, тогда как при нарушении консолидации достоверное снижение относительно здоровых лиц сохранялось до пятых суток, что может говорить о затяжной гипоперфузии и недостаточности компенсаторных гемодинамических механизмов [16, 17].

Нами установлены и значимые различия в модуляции сосудистого тонуса между группами. В отличие от амплитудных показателей (Аэ, Ан, Ам, Ад), которые практически не различались между группами с нормальной и замедленной консолидацией (за исключением Аэ на повреждённой конечности на десятые сутки), тонусные характеристики (НТ и МТ) продемонстрировали чёткую динамику. У пациентов с нормальной консолидацией на первые–вторые сутки на здоровой конечности регистрировали более высокие значения амплитуд эндотелиальных, миогенных и дыхательных колебаний, что отражает достаточный ответ активных механизмов регуляции микрогемодинамики, — эндотелий-зависимой вазодилатации. У пациентов с нормальной консолидацией на первые сутки на здоровой конечности НТ был повышен по сравнению с группой замедленной консолидации, что можно рассматривать как компенсаторную реакцию, направленную на мобилизацию кровотока из тканевых бассейнов. Однако уже к пятым суткам у данных пациентов зарегистрировано его снижение на обеих конечностях, в то время как в группе с замедленной консолидацией НТ оставался высоким. Стойкая симпатическая активация, проявляющаяся повышенным нейрогенным тонусом, приводит к постоянной вазоконстрикции и ограничению перфузии, что создаёт неблагоприятные условия и для ангиогенеза, и для миграции клеток-предшественников в область формирования регенерата. Миогенный тонус на здоровой конечности не выявил различий между группами. На повреждённой конечности, напротив, к пятым–десятым суткам МТ был значительно ниже при нормальной консолидации (p < 0,001), а при замедленной

консолидации сохранялся высоким. Устойчивое повышение миогенного тонуса у пациентов с нарушением консолидации свидетельствует о спазме прекапиллярных сфинктеров и ограничении нутритивного кровотока. Данный феномен, ранее описанный как компонент «васкуляризационного парадокса» при формировании гипертрофических ложных суставов, характеризуется избыточной васкуляризацией зоны перелома при одновременном дефиците именно нутритивной фракции микроциркуляции [8, 18, 19], что было зафиксировано нами и в настоящем исследовании.

Показатель шунтирования, характеризующий соотношение нутритивного и шунтирующего компонентов микроциркуляции, был значимо выше на здоровой конечности при нормальной консолидации, что указывает на более эффективное перераспределение кровотока в пользу метаболически активных тканей. При замедленной консолидации этого не происходило. При этом на протяжении всего раннего периода наблюдения ПШ в группе нормальной консолидации демонстрировал тенденцию к превышению значений контрольной группы, тогда как при нарушении сращения оставался на уровне здоровых лиц, подтверждая отсутствие необходимых в этот период компенсаторных гемодинамических сдвигов. Совокупность выявленных нами изменений (низкий ПМ, подавление амплитуд активных колебаний, высокий тонус прекапилляров и отсутствие адекватного прироста шунтирования) представляет собой комплекс проявлений микроциркуляторной дисфункции, который ассоциирован с неблагоприятным течением репаративного остеогенеза и может быть использован в качестве раннего прогностического критерия уже на пятые–десятые сутки после операции [16].

Сравнение с контрольной группой на 90-ые сутки показало, что у всех пациентов, независимо от характера консолидации, сохраняются сниженный базальный кровоток и подавленные амплитуды эндотелиальных и нейрогенных колебаний. Это свидетельствует о длительном, выходящем за пределы острой фазы, изменении микрогемодинамики после перелома, которое не полностью нормализуется даже при благоприятном клиническом течении. При этом амплитуда нейрогенных колебаний на здоровой конечности не отличалась от контроля, что указывает на восстановление нейрогенной регуляции в отдалённом периоде. На фоне локальной терапии значения нейрогенного и миогенного тонуса в группе с исходно замедленной консолидацией значимо снижались только на повреждённой конечности, достигая уровня, сопоставимого с показателями нормальной консолидации. На здоровой конечности достоверного эффекта препарата не зафиксировано, что свидетельствует о локальном воздействии без значимого системного эффекта. Механизм действия пептидного биорегулятора связан с активацией нейропептидов и нейротрофических факторов, оптимизацией баланса возбуждающих и тормозных аминокислот, а также ГАМК-ергическим воздействием. Можно предположить, что нормализация нейрогенного тонуса обусловлена уменьшением патологической симпатической гиперактивации на уровне супрасегментарных и периферических механизмов регуляции сосудистого тонуса [20]. Показатель шунтирования на травмированной конечности у пациентов, получавших нейропептидный препарат, был ниже, чем при нормальной консолидации, что может указывать на уменьшение артериовенозного шунтирования в пользу нутритивного кровотока и создание более благоприятных локальных условий для завершения остеогенеза. Полученные данные согласуются с концепцией нейроостеогенных взаимодействий, согласно которой нейромедиаторы и нейротрофические факторы играют существенную роль в регуляции как ангиогенеза, так и остеогенеза [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показатели микроциркуляции у пациентов с нормально протекающим процессом репарации костной ткани демонстрируют раннюю активацию процессов регуляции перфузии, снижение нейрогенного и миогенного тонуса уже на пятые сутки на стороне повреждения, а также быстрое восстановление перфузии на здоровой конечности. Нормализацию показателей микрокровоотока на здоровой конечности регистрируют к десятым суткам после операции. У пациентов с нарушением консолидации переломов длительно сохраняется состояние гипоперфузии, повышенный нейрогенный и миогенный тонус на повреждённой конечности, спазм прекапилляров и менее эффективное перераспределение кровотока. Нейропептидный биорегулятор оказывает существенное влияние на регуляцию микроциркуляции в зоне перелома за счёт снижения нейрогенного, миогенного тонуса и показателя шунтирования и может быть применен для стимуляции репаративной регенерации у пациентов с нарушением консолидации переломов. Таким образом, метод лазерной доплеровской флоуметрии обеспечивает получение количественных, объективных и воспроизводимых параметров микроциркуляции, которые коррелируют с характером течения репаративного процесса и могут быть использованы для раннего прогнозирования нарушений консолидации.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено без финансовой поддержки.

Этическая экспертиза. Исследование одобрено локальным этическим комитетом Читинской ГМА (рег. № НИР — РК 034(03) № АААА-А16-116063010015-6).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бондаренко А.В., Гусейнов Р.Г., Герасимова О.А. и др. Частота, факторы риска, особенности диафизарных несращений длинных костей нижних конечностей. *Политравма*. 2023;(2):36-44. doi: 10.24412/1819-1495-2023-2-36-44.
2. Лепунов В.В., Лоскутова А.А., Степанов М.Ю. Слабо консолидирующиеся диафизарные переломы бедренной кости после интрамедуллярного остеосинтеза. Что делать? *Вопросы реконструктивной и пластической хирургии*. 2024;27(2):64-71. doi: 10.52581/1814-1471/89/07.
3. Ямщиков О.Н., Чумаков Р.В., Долгов Д.А. и др. Эффективность современных методов визуализации консолидации переломов костей (обзор литературы). *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки*. 2024;(4):20-34. doi: 10.21685/2072-3032-2024-4-2.
4. Миromanov А.М., Гусев К.А., Старосельников А.Н., Мудров В.А. Прогнозирование нарушения консолидации переломов длинных костей конечностей с помощью нейросетевого анализа. *Гений ортопедии*. 2025;31(2):237-244. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-2-237-244.
5. Mick P, Fischer C. Delayed Fracture Healing. *Semin Musculoskelet Radiol*. 2022;26(3):329-337. doi: 10.1055/s-0041-1740380.
6. Zherebtsov E, Kozlov I, Dremmin V, et al. Diagnosis of Skin Vascular Complications Revealed by Time-Frequency Analysis and Laser Doppler Spectrum Decomposition. *IEEE Trans Biomed Eng*. 2023;70(1):3-14. doi: 10.1109/TBME.2022.3181126.
7. Menger MM, Körbel C, Bauer D, et al. Photoacoustic imaging for the study of oxygen saturation and total hemoglobin in bone healing and non-union formation. *Photoacoustics*. 2022;28:100409. doi: 10.1016/j.pacs.2022.100409.
8. Menger MM, Laschke MW, Orth M, et al. Vascularization Strategies in the Prevention of Nonunion Formation. *Tissue Eng Part B Rev*. 2021;27(2):107-132. doi: 10.1089/ten.TEB.2020.0111.
9. Menger MM, Laschke MW, Nussler AK, et al. The vascularization paradox of non-union formation. *Angiogenesis*. 2022;25(3):279-290. doi: 10.1007/s10456-022-09832-x.
10. Гусев К.А., Миromanov А.М. Способ стимуляции репаративной регенерации при нарушении консолидации перелома: клиническое наблюдение. *Наука молодых (Eruditio Juvenium)*. 2025;13(2):315-322. doi: 10.23888/HMJ2025132315-322.
11. Crawley F.P. Declaration of Helsinki: Full paragraph-by-paragraph comparison indicating changes in version 19 October 2024 compared with the most previous version of 19 October 2013. Zenodo; 2024. doi: 10.5281/zenodo.13997192.
12. Plumarom Y, Wilkinson BG, Willey MC, et al. Sensitivity and specificity of modified RUST score using clinical and radiographic findings as a gold standard. *Bone Jt Open*. 2021;2(10):796-805. doi: 10.1302/2633-1462.210.BJO-2021-0071.R1.
13. Azevedo Filho FA, Cotias RB, Azi ML, Teixeira AA. Reliability of the radiographic union scale in tibial fractures (RUST). *Rev Bras Ortop*. 2016;52(1):35-39. doi: 10.1016/j.rboe.2016.05.006.
14. Panchoo P, Laubscher M, Held M, et al. Radiographic union score for tibia (RUST) scoring system in adult diaphyseal femoral fractures treated with intramedullary nailing: an assessment of interobserver and intraobserver reliability. *Eur J Orthop Surg Traumatol*. 2022;32(8):1555-1559. doi: 10.1007/s00590-021-03134-6.
15. Мудров В.А. Алгоритмы статистического анализа количественных признаков в биомедицинских исследованиях с помощью пакета программ SPSS. *Забайкальский медицинский вестник*. 2020;(1):140-150. doi: 10.52485/19986173_2020_1_140.
16. Миromanov А.М., Миронова О.Б., Усков С.А. и др. Динамика показателей микроциркуляции и компонентов сосудистого тонуса у больных с неосложненным и осложненным течением переломов длинных трубчатых костей в раннем послеоперационном периоде. *Бюллетень СО РАМН*. 2011;31(3):12-17.
17. Плахов А.И., Корытов Л.И., Виноградов В.Г. и др. Параметры микроциркуляции поврежденного сегмента нижних конечностей после лечения диафизарных переломов с помощью блокируемого интрамедуллярного гвоздя. *Acta Biomedica Scientifica*. 2023;8(5):144-149. doi: 10.29413/ABS.2023-8.5.15.
18. Миронов С.П., Еськин Н.А., Крупаткин А.И. и др. Патофизиологические аспекты микрогемодикуляции мягких тканей в проекции ложных суставов длинных трубчатых костей. *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова*. 2012;(4):22-26. doi: 10.17816/vto20120422-26.
19. Петряева А.Е., Федорова Е.С., Антипов Е.В. Вейвлет-спектры нейрогенных и миогенных колебаний кровотока в норме. *Молодежный инновационный вестник*. 2025;14(S1):815-819. URL: <https://new.vestnik-surgery.com/index.php/2415-7805/article/view/10407>.
20. Гололобов В.Г. Особенности регенерации костной ткани при огнестрельных переломах длинных трубчатых костей человека. *Гены и Клетки*. 2014;9(4):110-115. doi: 10.23868/gc120408.

Статья поступила 13.05.2026; одобрена после рецензирования 22.05.2026; принята к публикации 09.06.2026.

The article was submitted 13.05.2026; approved after reviewing 22.05.2026; accepted for publication 09.06.2026.

Информация об авторах:

Александр Михайлович Миromanov — доктор медицинских наук, профессор, первый проректор, проректор по лечебной работе, заведующий кафедрой, miromanov_a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1432-1844>;

Кирилл Аркадьевич Гусев — кандидат медицинских наук, доцент кафедры, главный внештатный травматолог-ортопед Минздрава Забайкальского края, kirill.gusev.86@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3375-9956>;

Артём Николаевич Старосельников — кандидат медицинских наук, ассистент кафедры, a.staroselnikov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4400-0750>;

Ольга Борисовна Миронова — кандидат медицинских наук, доцент, доцент кафедры, omironova4@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1684-6249>.

Information about the authors:

Alexander M. Miromanov — Doctor of Medical Sciences, Professor, First Vice-Rector, Vice-Rector for Medical Work, Head of the Department, miromanov_a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1432-1844>;

Kirill A. Gusev — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor of the Department, Chief Traumatologist-Orthopedist of the Ministry of Health of the Trans-Baikal Territory, kirill.gusev.86@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3375-9956>;

Artem N. Staroselnikov — Candidate of Medical Sciences, assistant of the Department, a.staroselnikov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4400-0750>;

Olga B. Mironova — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department, omironova4@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1684-6249>.

Вклад авторов:

Миromanov А.М. — идея и разработка концепции статьи, анализ и интерпретация результатов, окончательная редакция

Гусев К.А. — поиск, анализ литературы по теме исследования, сбор данных, интерпретация данных, подготовка и оформление текста статьи.

Старосельников А.Н. — статистическая обработка данных, подготовка и оформление текста статьи.

Миронова О.Б. — поиск, анализ литературы по теме исследования, сбор данных, интерпретация данных.

Научная статья

УДК 616.74-001.5-08-003.93]-092.9

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2026-32-4-459-469>

Исследование влияния препарата аминокислот с разветвленными боковыми радикалами на регенерацию передней большеберцовой мышцы после компрессионной травмы

Т.Н. Варсегова[✉], М.В. Стогов, Н.А. Кононович

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

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Николаевна Варсегова, varstn@mail.ru**Аннотация****Введение.** Гистологические данные о влиянии внутримышечного введения препарата аминокислот с разветвлёнными боковыми радикалами (ВСАА) на восстановление мышц отсутствуют.**Цель работы** — гистоморфометрическая оценка влияния внутримышечного введения препарата ВСАА в лекарственной форме для инъекций на регенерацию передней большеберцовой мышцы (ПБМ) крыс после её закрытого частичного раздавливания.**Материалы и методы.** Сдавление ПБМ в течение одной минуты проводили 48 крысам-самцам линии Вистар. Через сутки животным серии 1 в ПБМ разово вводили физраствор, животным серии 2 — ВСАА. Эвтаназию проводили на седьмые, 14-е, 28-е и 42-е сутки. В изображениях парафиновых срезов определяли объёмные плотности мышечных волокон (МВ) (V_{vm}), микрососудов (V_{vmv}) и эндомиоциты (V_{ve}), измеряли диаметры МВ, определяли численные плотности МВ (Na_m), микрососудов (Na_{mv}) и внутримышечных ядер (Na_n), рассчитывали коэффициенты васкуляризации (kv как Na_{mv}/Na_m) и нуклеации (kn как Na_n/Na_m). Контроль — 10 интактных крыс.**Результаты.** Через семь суток V_{vm} в обеих сериях снижалась на 36–37 %, в остальные сроки показатель был значимо выше в серии 2, но оставался ниже нормы в обеих группах. В течение 28 суток диаметр МВ был выше в серии 2. Через семь, 14 и 28 суток на 17 % ($p = 0,026$), 11 % ($p = 0,012$) и 5 % ($p = 0,048$) показатель превышал значения серии 1, через 28 суток в сериях 1 и 2 он составлял 79 % и 84 % от нормы. Показатель kn в серии 2 был ниже нормы только через семь суток опыта, а в серии 1 — через семь, 14 и 42 суток на 24 % ($p = 0,002$), 24 % ($p = 0,004$) и 10 % ($p = 0,034$), что указывает на менее активный миогенез. Показатель kv через 14 и 28 суток был выше в серии 2 на 10 % ($p = 0,045$) и 32 % ($p = 0,014$). На 42-е сутки в серии 2 диаметр МВ снижался на фоне роста их Na_m и становился на 47 % ниже нормы ($p = 0,0006$) и на 30 % ниже значений серии 1 ($p = 0,0023$).**Обсуждение.** Полученные данные дают основание считать, что инъекция ВСАА оказывает положительное влияние на регенерацию МВ и микрососудов, регенерация более активна, чем в серии 1. Необходимы дополнительные исследования побочных эффектов и отдалённых результатов.**Заключение.** Однократное внутримышечное введение в зону закрытого частичного раздавливания передней большеберцовой мышцы крыс оригинальной формы препарата на основе аминокислот с разветвлёнными боковыми радикалами в лекарственной форме для инъекций оказывает миогенный стимулирующий эффект.**Ключевые слова:** крыса, компрессионная травма голени, передняя большеберцовая мышца, гистоморфометрия, аминокислоты с разветвлёнными боковыми радикалами**Для цитирования:** Варсегова Т.Н., Стогов М.В., Кононович Н.А. Исследование влияния препарата аминокислот с разветвленными боковыми радикалами на регенерацию передней большеберцовой мышцы после компрессионной травмы. *Гений ортопедии*. 2026;32(4):459-469. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-4-459-469.



Effect of a preparation of branched-chain amino acids on the regeneration of the anterior tibial muscle after compression injury

T.N. Varsegova✉, M.V. Stogov, N.A. Kononovich

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

Corresponding author: Tatyana N. Varsegova, varstn@mail.ru

Abstract

Introduction Histological data on the effect of intramuscular administration of branched-chain amino acids (BCAA) on muscle recovery are lacking.

The **purpose** of the work was a histomorphometric assessment of the effect of intramuscular administration of BCAA in a dosage for injections on the regeneration of the anterior tibial muscle (ATM) after its closed partial crushing in rats.

Materials and methods Compression of the ATM was performed for one minute in 48 male Wistar rats. After 24 hours, animals of series 1 received a single injection of saline into the ATM, while animals of series 2 received BCAA. Euthanasia was performed after 7, 14, 28, and 42 days. In paraffin section images, the volumetric densities of muscle fibers (MF) (V_{vm}), microvessels (V_{vmv}), and endomysium (V_{ve}) were determined; MF diameters were measured, the numerical densities of MF (Na_m), microvessels (Na_{mv}), and intramuscular nuclei (Na_n) were determined, and the vascularization (kv as Na_{mv}/Na_m) and nucleation (kn as Na_n/Na_m) coefficients were calculated. Ten intact rats were a control group.

Results After seven days, V_{vm} in both series decreased by 36–37 %; in the rest of the periods, the indicator was significantly higher in series 2, but remained below normal in both groups. Within 28 days, the MF diameter was higher in series 2. After seven, 14 and 28 days, the indicator exceeded the values of series 1 by 17 % ($p = 0.026$), 11 % ($p = 0.012$) and 5 % ($p = 0.048$); after 28 days in series 1 and 2 it was 79 % and 84 % of the norm. The kn indicator in series 2 was lower than normal only after seven days of experiment, and in series 1 after seven, 14 and 42 days by 24 % ($p = 0.002$), 24 % ($p = 0.004$) and 10 % ($p = 0.034$), that indicates less active myogenesis. The kv indicator after 14 and 28 days was higher in series 2 by 10 % ($p = 0.045$) and 32 % ($p = 0.014$). On the 42nd day in series 2, the MF diameter decreased against the increase in their Na_m and was 47 % lower than the norm ($p = 0.0006$) and 30 % lower than in series 1 ($p = 0.0023$).

Discussion The findings obtained suggest that a BCAA injection has a positive effect on the MF regeneration and microvessels, and was more active than in series 1.

Conclusion A single BCAA injection has a myogenic stimulating effect. Further studies on side effects and long-term outcomes are needed.

Keywords: rat, crush injury, lower leg, tibialis anterior, histomorphometry, branched-chain amino acids

For citation: Varsegova TN, Stogov MV, Kononovich NA. Effect of a preparation of branched-chain amino acids on the regeneration of the anterior tibial muscle after compression injury. *Genij Ortopedii*. 2026;32(4):459-469. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-4-459-469.

ВВЕДЕНИЕ

Лечение пострадавших с травмами опорно-двигательной системы остается сложной медицинской проблемой [1–3]. Повреждения скелетных мышц составляют около 30 % [4], а современные методы терапии в большинстве случаев направлены на уменьшение боли и воспаления с помощью нестероидных противовоспалительных препаратов, иммобилизации и внешних физических стимуляций [5, 6]. При тяжелых травмах происходит рабдомиолиз (разрушение скелетных мышц), характеризующийся повреждением мышечных клеток с выходом миоглобина и саркоплазматических белков во внеклеточную жидкость [7, 8]. К наиболее распространенным причинам рабдомиолиза относят компрессионные травмы [9], при которых в тканях скелетных мышц определяют ишемический некроз с последующим развитием грануляционной ткани и формированием мышечно-соединительнотканного регенерата [10]. Несмотря на способность скелетных мышц восстанавливаться благодаря популяции стволовых клеток [11, 12], имеющийся резерв миосателлитов при таких серьезных поражениях, как правило, не обеспечивает полной гисто- и органотипической регенерации [13, 14], что приводит к потере сократительной ткани, замене ее жировой и фиброзной рубцовой тканями, вызывает долгосрочный дефицит мышечной структуры и силы [5]. Таким образом, правильная регенерация скелетных мышц играет ключевую роль в восстановлении их функции после травмы [15].

Существующие методы лечения остаются недостаточно эффективными [16], что обуславливает востребованность в клинической практике фундаментальных исследований по разработке новых способов индукции репаративного рабдомиогенеза и редуцирования фиброза [5, 13, 14]. Множество исследований последних лет сосредоточены на изучении молекулярных механизмов, лежащих в основе регенерации мышц [17], на поиске активаторов миогенеза мышечных клеток-предшественников и ангиогенеза эндотелиальных клеток [18, 19]. Известно, что такими свойствами обладают незаменимые аминокислоты с разветвлёнными боковыми радикалами (*англ.*: Branched-Chain Amino Acids, BCAA), — лейцин, изолейцин и валин. Они являются мощными регуляторами синтеза белка в здоровых скелетных мышцах и при мышечной атрофии, а лейцин используют в качестве «фармацевтического питательного вещества» для предотвращения атрофии и восстановления мышц у пожилых людей [20]. В качестве пищевых добавок BCAA нашли широкое применение для восстановления повреждения мышц и облегчения отсроченной мышечной боли, вызванной физическими нагрузками [21]. Доказано, что внутрибрюшинное введение мышам лейцина снижает атрофию мышц и способствует поддержанию мышечной массы во время сепсиса [22]. Ортопедические операции и связанные с ними события (иммобилизация либо длительное бездействие мышц) приводят к значительной потере мышечной массы и длительному снижению функции [23, 24]. Пероральный прием BCAA у таких пациентов улучшает качество и массу мышц по сравнению с плацебо [25, 26]. Есть сведения о положительном опыте периоперационного внутривенного введения аминокислот пациентам при плановом тотальном эндопротезировании тазобедренного сустава для компенсации потери белка скелетных мышц, индуцированных хирургическим вмешательством [27, 28]. Данные о доклинических исследованиях эффективности внутримышечного введения препарата BCAA в зоне повреждения единичны [29], а гистологические данные о его влиянии на регенерацию мышц в релевантной литературе отсутствуют, что и определило цель данной работы.

Цель работы — гистоморфометрическая оценка влияния внутримышечного введения препарата BCAA в лекарственной форме для инъекций на регенерацию передней большеберцовой мышцы крыс после ее закрытого частичного раздавливания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Исследование — интервенционное (экспериментальное), одноцентровое, проспективное, выборочное, контролируемое, рандомизированное.

Описание эксперимента

Закрытое частичное раздавливание передней большеберцовой мышцы (ПБМ) при помощи корнцанга хирургического проводили 48 крысам линии Вистар (самцы, возраст — восемь месяцев, средняя масса — 462 (454; 477) г). Животные разделены на две группы: животным серии 1 ($n = 24$) в ПБМ разово вводили физраствор, животным серии 2 ($n = 24$) — препарат аминокислот с разветвлёнными боковыми радикалами.

Для стандартизации экспериментальной модели корнцанг располагали перпендикулярно продольной оси голени таким образом, чтобы его губки при смыкании оказывали давление на ткани в области середины брюшка ПБМ. Кольца корнцанга направляли краниально, замок-клемальеру защелкивали во всех случаях в одинаковом положении на одну минуту. Экспериментальная модель полностью воспроизводима [30].

Процедуру проводили в операционной под общим наркозом препаратами Рометар 2 % (Биовета, Чехия) и Золетил 100 (Virbac Sante Animale, Франция). Через 24 часа животным серии 1 в травмированный участок мышцы вводили 0,02 мл физиологического раствора, животным серии 2 — 0,02 мл раствора аминокислот на физиологическом растворе (L-валин : L-изолейцин : L-лейцин в равных весовых отношениях, из расчета по 0,04 г каждой аминокислоты в 10 мл физиологического раствора). В обеих сериях инъекции выполняли разово.

Далее крыс содержали в клетках по две особи, выводили из эксперимента на седьмые, 14-е, 28-е и 42-е сутки после травмы ($n = 6$ в каждой серии на всех сроках опыта).

Методы. Фрагменты ПБМ, иссеченные из области компрессионной травмы, фиксировали в 10 % растворе нейтрального формалина и заливали в парафин. Поперечные парафиновые срезы (5 мкм) готовили на микротоме HM 450 Thermo Scientific (США), окрашивали трехцветным методом по Массону, гематоксилином и эозином. Часть материала после альдегидно-осмиевой фиксации заключали в аралдит, на ультрамикротоме Nova LKB (Швеция) изготавливали полутонкие срезы (1 мкм), окрашивали метиленовым синим, азуром II и основным фуксином.

Полноцветные цифровые изображения получали с помощью микроскопа AxioScope.A1 и цифровой камеры AxioCam (Carl Zeiss MicroImaging GmbH, Германия). С использованием электронной версии оригинальной тестовой решетки равноудаленных точек [31] в программе PhotoFiltre 7.0 на 14-е, 28-е и 42-е сутки после травмы рассчитывали стереологические параметры: объемные плотности мышечных волокон (V_{vm}), микрососудов (V_{vmv}) и эндомизия (V_{ve}). В программе «ВидеоТест Мастер-Морфология, 4.0» (Россия) измеряли средние диаметры мышечных волокон (до 400 у каждого животного), определяли численные плотности мышечных волокон (Na_m), микрососудов (Na_{mv}) и внутримышечных ядер (Na_n) в 1 мм² площади, рассчитывали коэффициенты васкуляризации (kv как Na_{mv}/Na_m) и нуклеации (kn как Na_n/Na_m). Во внутримышечных нервных стволиках определяли долю (%) реактивно-деструктивно измененных миелиновых нервных волокон в общем объеме выборки. Контроль — 10 intactных крыс (самцы, возраст 8–9 месяцев).

В динамике эксперимента оценивали двигательную активность крыс в тесте «открытое поле». Животных в одно и то же время (в 11:00) помещали в круглый манеж диаметром 120 см, дно которого было разлиновано на квадраты стороной 12 см. После адаптации животного (через одну минуту после посадки) в течение одной минуты выполняли видеосъемку, по результатам которой фиксировали общее количество пересечений квадратов.

Этическая экспертиза

Исследование одобрено локальным этическим комитетом (протокол от 29.11.2024 № 1(76)), проведено с соблюдением требований Европейской конвенции по защите позвоночных животных, используемых для экспериментов и других научных целей и Директивой 2010/63/EU Европейского парламента и Совета Европейского союза от 22 сентября 2010 года по охране животных, используемых в научных целях.

Статистический анализ

Объем выборок рассчитывали на основании минимального количества, необходимого для получения достоверных результатов. Статистическую обработку данных выполняли в компьютерной программе AtteStat версия 9.3.1 (разработчик И.П. Гайдышев, сертификат о регистрации в Роспатенте № 2002611109, Россия). Проверку выборок на нормальность распределения значений осуществляли с помощью критерия Колмогорова. Для попарного сравнения групп животных использовали критерий Манна – Уитни. Отличия считали значимыми при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Показатели двигательной активности, согласно тесту «открытое поле», у крыс серии 1 к концу периода наблюдения (42-е сутки) были значимо ниже исходных значений и составили в среднем 13,0 (12,0–14,0) пересечений квадратов против исходных 19,5 (16,8–24,3), $p = 0,007$. В серии 2 уже на 28-е сутки после травмы отмечали отсутствие статистически значимых различий с исходными показателями, — 15,5 (12,3–18,0) пересечений квадратов против исходных 18,5 (15,8–26,0), $p > 0,05$.

Через семь суток после травмы в ПБМ обеих серий выявили схожую морфологическую картину, — в поверхностном слое и зоне прилегания мышцы к большеберцовой кости обнаружены деструктивно измененные мышечные волокна (МВ), регенерирующие МВ и участки грануляционной ткани. В поперечных срезах видна дезорганизация части фасцикул, отек эндомизия, его гиперваскуляризация, повышение клеточности с преобладанием фибробластов, фиброцитов и макрофагов. МВ имеют меньший диаметр, округленные контуры (рис. 1, а, б). Внутримышечные ядра располагаются как по периферии, одиночно, иногда цепочками либо конгломератами, так и в центральной части волокон, часть регене-

рирующих волокон находится на стадии миотуб (рис. 1, в). Миелиновые нервные волокна внутри-мышечных нервных стволиков через семь суток опыта в обеих сериях деструктивно изменяются (рис. 1, д). В продольных срезах на этом сроке опыта обнаружены МВ без поперечной исчерченности, встречаются участки с волнообразно извитыми МВ неравномерной толщины, часть из них — с нарушенной целостностью и участками некролиза, тонкие регенерирующие МВ с выстроенными в цепочки либо агломерированными ядрами, волокна в стадии миотуб (рис. 1, г) и редкие расширенные на концах МВ со скоплениями внутримышечных ядер («мышечные почки») (рис. 1, е).

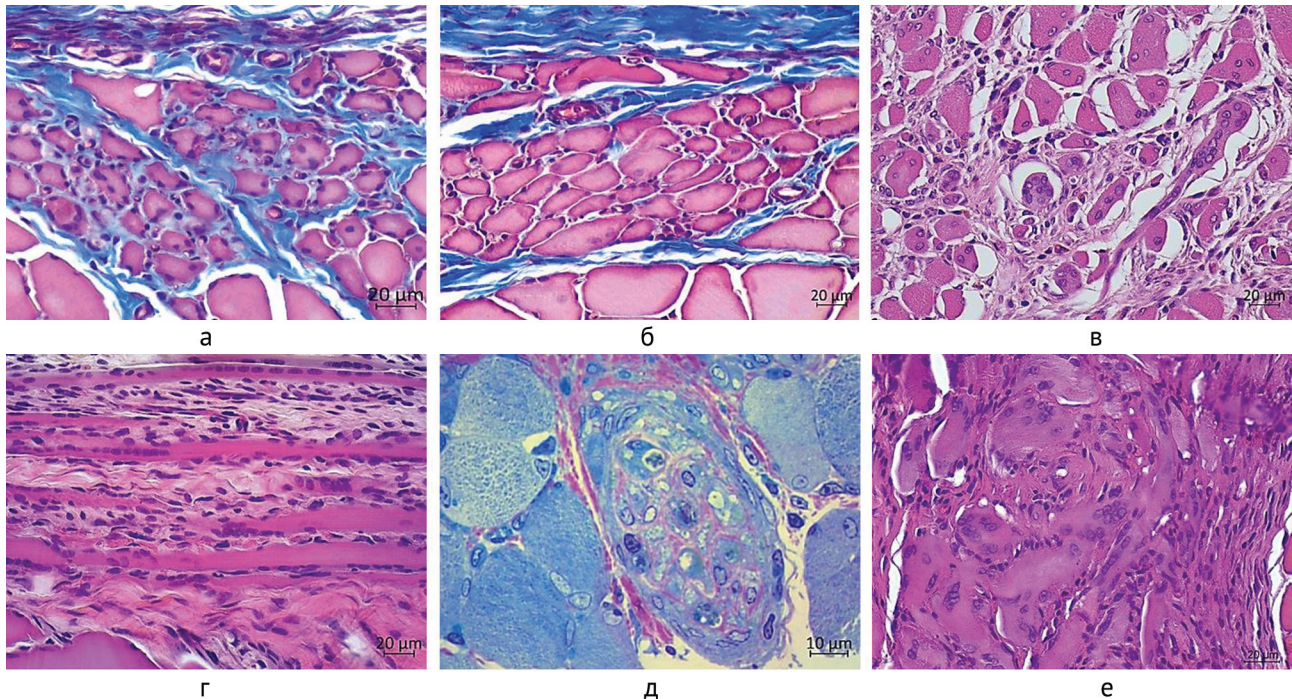


Рис. 1. Передние большеберцовые мышцы крыс через семь суток (а — серия 1; б–д — серия 2) и через 14 суток (е — серия 2) после компрессионной травмы. Поперечные парафиновые срезы, окраска гематоксилином и эозином (в, г, е) и трехцветным методом по Массону (а, б), увеличение 400×. Поперечный полутонкий срез (д), окраска метиленовым синим, азуром II и основным фуксином, увеличение 1000×

Через 14 и 21 сутки опыта в обеих сериях в поверхностной и глубокой зонах преобладают регенераторные процессы. МВ имеют преимущественно округлую форму с периферическим либо центральным расположением ядер (рис. 2, а, б), продолжают встречаться миотубы, а в продольных срезах — гофрированные волокна, булавовидно расширенные на концах МВ со скоплениями ядер («мышечные почки») (рис. 1, е). Интерстициальные пространства остаются расширенными с повышенным содержанием фибробластов и фиброцитов.

На 42-е сутки после травмы в поверхностной и глубокой зонах МВ полиморфны, встречаются мелкие регенерирующие волокна, имеющие округлые контуры, часть МВ приобретает полигональную форму. Ядра занимают как периферическое, так и центральное расположение, интерстициальные пространства остаются расширенными (рис. 2, г, д) в обеих сериях.

Во внутримышечных нервных стволиках через 14 суток преобладают деструктивно измененные нервные волокна, а через 21 сутки и в конце опыта — нервные волокна нормального строения (рис. 2, в, е).

В слое передней большеберцовой мышцы между поверхностной и глубокой зонами в обеих сериях на всех сроках опыта сохраняется пучковая структура, но прослойки эндомизия утолщены. Часть МВ имеет нормальное строение, полигональную форму, часть — скругленные либо спавшиеся контуры, смещенные к центру ядра, неравномерное окрашивание, вакуолизацию. Дистрофические изменения становятся менее выраженными к концу опыта.

Гистоморфометрическое исследование размерных и численных характеристик МВ показало, что через семь суток в сериях 1 и 2 их медианный диаметр снижен (рис. 3, а) на 50 % ($p = 0,0001$) и 39 % ($p = 0,003$), а их численные плотности превышают норму в 2,8 ($p = 0,00002$) и 1,7 ($p = 0,0005$) раза соответственно (рис. 3, б). Через 14 суток опыта диаметр МВ в сериях 1 и 2 возрастает относительно предыдущего срока и составляет 59 % ($p = 0,001$) и 67 % ($p = 0,0013$) от нормы соответственно (рис. 3, а). Численная плотность МВ в серии 2 возрастает, и в обеих сериях превышает норму ($p = 0,0002$) в 2,6 раза (рис. 3, б).

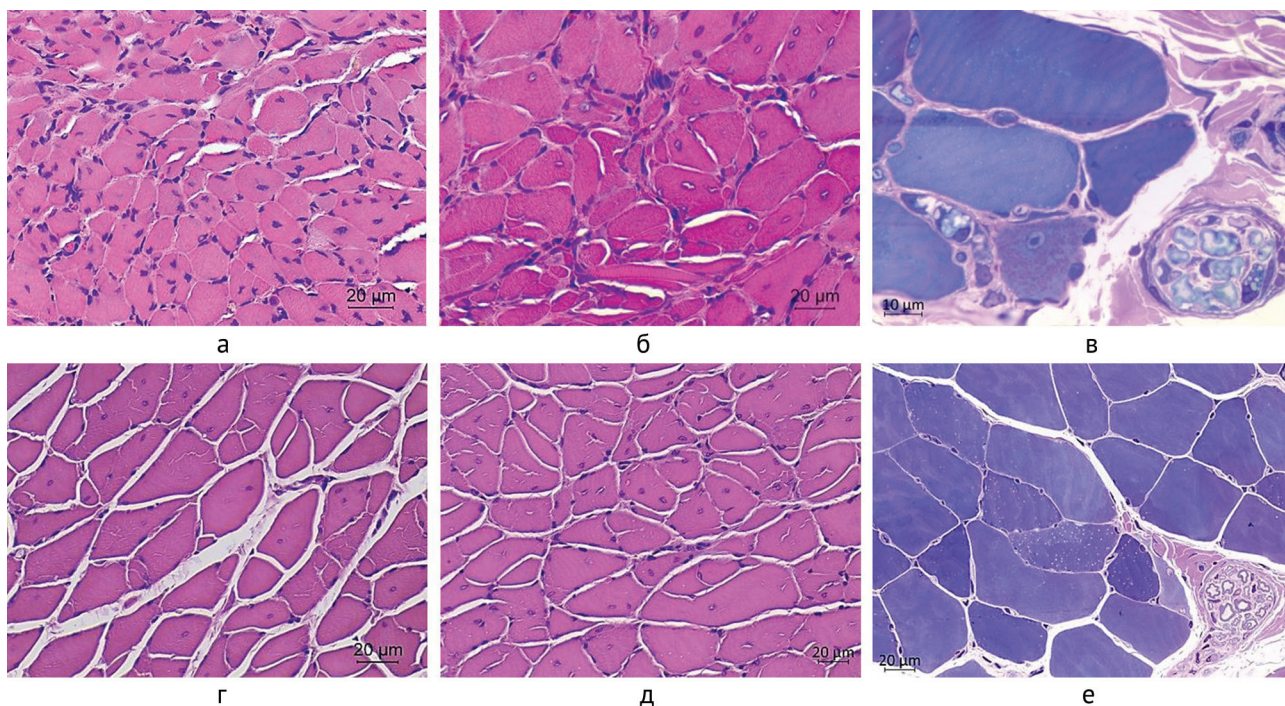


Рис. 2. Передние большеберцовые мышцы крыс через 21 сутки (а — серия 1; б, в — серия 2) и на 42-е сутки (г — серия 1; д, е — серия 2) после компрессионной травмы. Поперечные парафиновые срезы, окраска гематоксилином и эозином (а, б, г, д), увеличение 400×. Поперечные полутонкие срезы (в, е), окраска метиленовым синим, азуром II и основным фуксином, увеличение 1000× (в), 400× (е)

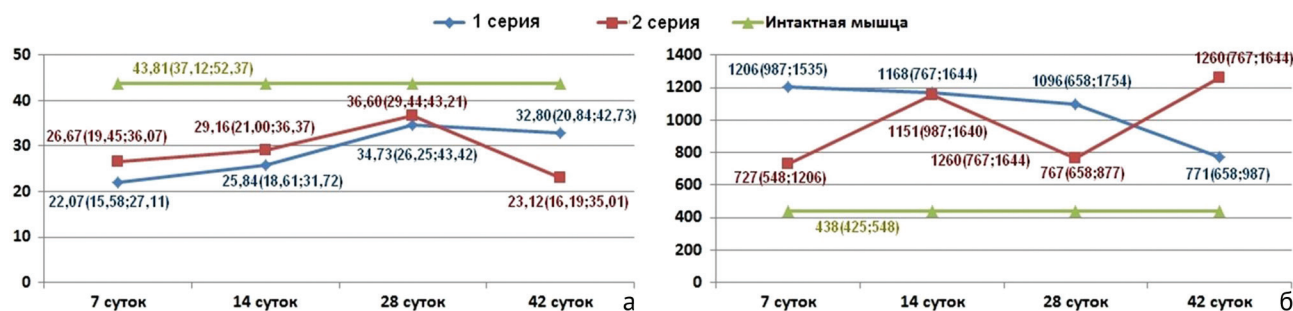


Рис. 3. График изменения диаметра (мкм) мышечных волокон (а) и численной плотности (в 1 мм² площади среза) мышечных волокон (б) передних большеберцовых мышц серий 1 и 2 на этапах эксперимента (Me (Q1; Q3))

Стереологическое исследование показало, что в сериях 1 и 2 V_{vm} снижена ($p < 0,001$) относительно параметров интактной мышцы на 37,6 % и 36,5 %, V_{ve} повышена на 34,7 % и 34,2 %, V_{vmv} повышена в 2,5 и 2,2 раза соответственно (табл. 1). Сравнение серий 1 и 2 не выявило значимых различий по данным параметрам.

Через 28 суток диаметр МВ в сериях 1 и 2 возрастает и составляет 79 % ($p = 0,007$) и 84 % ($p = 0,004$) от нормы (рис. 3, а), а численная плотность МВ снижается относительно предыдущего срока, но превышает норму в 2,5 ($p < 0,001$) и 1,8 ($p = 0,006$) раза соответственно (рис. 3, б).

Стереологический анализ показал, что V_{vm} возрастает в сериях 1 и 2 на 6,8 % и 11,3 %, но остается сниженной ($p < 0,001$), а V_{ve} и V_{vmv} остаются повышенными ($p < 0,001$) относительно интактных значений (табл. 1). Сравнение опытных серий показало, что в серии 2 V_{vm} на 5,6 % выше, а V_{ve} на 5,5 % ниже ($p < 0,001$) значений серии 1 (табл. 1), а значимые различия по V_{vmv} отсутствуют (табл. 1).

В конце опыта (42-е сутки) диаметр МВ в серии 1 не восстанавливается и составляет 75 % ($p = 0,0005$) от нормы (рис. 3, а), а численная плотность МВ повышена ($p = 0,006$) в 1,8 раза (рис. 3, б). В серии 2 численная плотность МВ возрастает, а диаметр снижается относительно предыдущего срока, составляя 53 % ($p = 0,0006$) от нормы (рис. 3, а, б). Соотношение долей тканевых компонентов в обеих опытных сериях не восстанавливается до нормальных значений: V_{vm} остаются сниженными ($p < 0,001$), но в серии 2, как и через 28 суток, значение V_{vm} выше, чем в серии 1, на 5,7 % ($p < 0,001$), а V_{ve} ниже ($p < 0,001$) на 5,6 % (табл. 1). Значимые различия по параметру V_{vmv} между сериями 1 и 2 отсутствуют.

Таблица 1

Объемные плотности тканевых компонентов (в %) интактной передней большеберцовой мышцы в опытных сериях на этапах эксперимента ($M \pm \sigma$)

Срок опыта	Серия	Объемная плотность		
		мышечных волокон	микрососудов	эндомизия
14 суток	Серия 1	$54,9 \pm 3,2$; $p^H = 4 \cdot 10^{-8*}$; $p^{I-2} = 0,184$	$5,0 \pm 1,4$; $p^H = 9 \cdot 10^{-7*}$; $p^{I-2} = 0,069$	$40,2 \pm 3,4$; $p^H = 4 \cdot 10^{-8*}$; $p^{I-2} = 0,273$
	Серия 2	$56,0 \pm 13,1$; $p^H = 4 \cdot 10^{-8*}$	$4,4 \pm 0,8$; $p^H = 1 \cdot 10^{-7*}$	$39,7 \pm 12,9$; $p^H = 4 \cdot 10^{-8*}$
28 суток	Серия 1	$61,7 \pm 6,4$; $p^H = 4 \cdot 10^{-8*}$; $p^{I-2} = 0,001*$	$4,8 \pm 1,3$; $p^H = 4 \cdot 10^{-7*}$; $p^{I-2} = 0,882$	$33,5 \pm 6,7$; $p^H = 4 \cdot 10^{-8*}$; $p^{I-2} = 0,002*$
	Серия 2	$67,3 \pm 5,3$; $p^H = 4 \cdot 10^{-8*}$	$4,8 \pm 0,9$; $p^H = 9 \cdot 10^{-8*}$	$28,0 \pm 5,4$; $p^H = 4 \cdot 10^{-8*}$
42-е сутки	Серия 1	$60,4 \pm 5,0$; $p^H = 4 \cdot 10^{-8*}$; $p^{I-2} = 0,002*$	$4,4 \pm 0,7$; $p^H = 8 \cdot 10^{-8*}$; $p^{I-2} = 0,694$	$35,3 \pm 4,8$; $p^H = 4 \cdot 10^{-8*}$; $p^{I-2} = 0,001*$
	Серия 2	$66,1 \pm 4,6$; $p^H = 4 \cdot 10^{-8*}$	$4,3 \pm 0,7$; $p^H = 4 \cdot 10^{-8*}$	$29,7 \pm 4,6$; $p^H = 4 \cdot 10^{-8*}$
Интактная мышца		$92,5 \pm 1,6$	$2,0 \pm 0,7$	$5,5 \pm 1,4$

* — различия между экспериментальными сериями и нормой (p^H), сериями 1 и 2 (p^{I-2}) считали статистически значимыми по критерию Манна – Уитни при $p < 0,05$.

Анализ распределения МВ по диаметрам показал, что в обеих сериях на всех сроках эксперимента гистограммы сохраняют унимодальный характер, но их основания смещаются относительно нормы влево (рис. 4). Через семь суток в серии 1 (рис. 4, а) доля мелких регенерирующих и атрофированных мышечных волокон ($D < 30$ мкм) составляет 84 % (в норме — единичны, 1 %), к 42-м суткам снижается до 44 %, а крупные волокна ($D < 50$) на всех сроках (рис. 4) составляют 1–2 % (в норме — 62 %). В серии 2 через семь суток (рис. 4, а) доля мелких волокон ($D < 30$) мкм составляет 60 %, снижается через 28 суток до 29 %, но снова возрастает к 42-м суткам опыта до 67 %, а крупные мышечные волокна ($D > 50$) на всех сроках составляют 3–5 % (рис. 4). В конце эксперимента в серии 2 мода смещается влево (рис. 4, г) в диапазон меньших значений — 11–20 мкм (в серии 1 — 31–40 мкм).

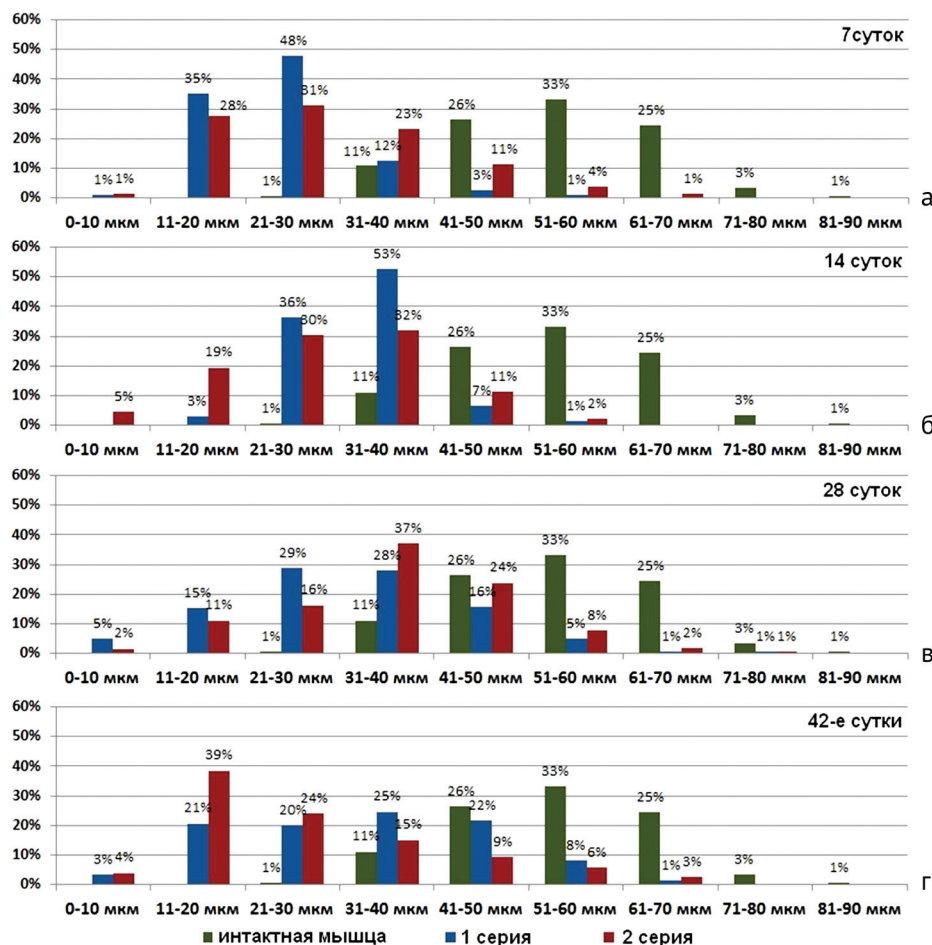


Рис. 4. Гистограммы распределения мышечных волокон передней большеберцовой мышцы по диаметрам крыс интактной группы, серии 1 и серии 2 через семь (а), 14 (б), 28 (в) и 42 (г) суток эксперимента. Ось абсцисс — диаметры волокон (мкм), ось ординат — процентные доли волокон в выборке

Параметры Na_{mv} и Na_n в 1 мм² превышают норму в обеих сериях на всех сроках опыта (табл. 2), но при этом kv в серии 1 остается сниженным через семь, 14, и 28 суток в 1,6, 1,6 и 1,3 раза соответственно, и превышает норму в 1,3 раза только на 42-е сутки (табл. 2). В серии 2 через 7 и 14 суток kv снижен в 1,6 и 1,4 раза, через 28 превышает норму в 1,1 раза, но на 42 сутки снижен в 1,9 раза (табл. 2). Следует отметить, что через семь суток достоверные различия по этому параметру между сериями отсутствуют, через 14 и 28 суток коэффициент васкуляризации достоверно повышен в серии 2, но к концу опыта его значение становится в 2,3 раза ниже, чем в серии 1 (табл. 2).

Коэффициент нуклеации в серии 1 в течение 14 суток снижен в 1,3 раза, к 28-м суткам возрастает и превышает норму в 1,2 раза, а на 42-е сутки снижен в 1,1 раза (табл. 2). В серии 2 данный показатель снижен в 1,2 раза только через семь суток опыта, через 14 суток превышает норму в 1,1 раза, а в остальные сроки имеет нормальные значения (табл. 2). Коэффициент нуклеации в серии 2 превышает значения серии 1 через 14 суток в 1,4 раза, и становится ниже в 1,3 раза на 28-е сутки, в конце опыта достоверные различия между сериями отсутствуют (табл. 2).

Таблица 2

Количественные показатели васкуляризации и нуклеации интактной передней большеберцовой мышцы и опытной на этапах эксперимента: Me (Q1; Q3)

Срок опыта	Серия	Na_{mv}	Na_n	kv	kn
7 суток	Серия 1	1315 (981; 1526) $p^u = 0,0001^*$ $p = 0,02^*$	1370 (877; 1755) $p^u = 0,0015^*$ $p = 0,002^*$	1,11 (0,89; 1,19) $p^u = 0,0031^*$ $p = 0,09$	1,18 (0,87; 1,38) $p^u = 0,002^*$ $p = 0,049$
7 суток	Серия 2	1041 (658; 1315) $p^u = 0,002^*$	877 (658; 1863) $p^u = 0,004^*$	1,12 (0,91; 1,73) $p^u = 0,003^*$	1,29 (1,00; 1,62) $p^u = 0,0035^*$
14 суток	Серия 1	1261 (987; 1535) $p^u = 0,0002^*$ $p = 0,04^*$	1370 (1206; 1754) $p^u = 0,00002^*$ $p = 0,032^*$	1,08 (0,89; 1,29) $p^u = 0,002^*$ $p = 0,045^*$	1,18 (1,00; 1,33) $p^u = 0,004^*$ $p = 0,033^*$
14 суток	Серия 2	1480 (1315; 1644) $p^u = 0,00002^*$	1863 (1644; 2083) $p^u = 0,00033^*$	1,20 (0,83; 1,70) $p^u = 0,0026^*$	1,63 (1,31; 1,88) $p^u = 0,052$
28 суток	Серия 1	1425 (987; 2192) $p^u = 0,0013^*$ $p = 0,056$	1809 (1315; 2631) $p^u = 0,00005^*$ $p = 0,029^*$	1,31 (1,00; 1,60) $p^u = 0,020^*$ $p = 0,014^*$	1,88 (1,36; 2,20) $p^u = 0,036^*$ $p = 0,03^*$
28 суток	Серия 2	1535 (1096; 1644) $p^u = 0,0002^*$	1096 (877; 1315) $p^u = 0,003^*$	1,93 (1,25; 2,14) $p^u = 0,03^*$	1,50 (1,29; 1,55) $p^u = 0,131$
42-е сутки	Серия 1	1754 (1206; 1836) $p^u = 0,008^*$ $p = 0,028^*$	1096 (767; 1206) $p^u = 0,010^*$ $p = 0,003^*$	2,20 (1,43; 2,60) $p^u = 0,01^*$ $p = 0,006^*$	1,41 (1,00; 1,70) $p^u = 0,034^*$ $p = 0,044^*$
42-е сутки	Серия 2	987 (767; 1535) $p^u = 0,04^*$	1762 (1425; 2521) $p^u = 0,005^*$	0,94 (0,64; 1,31) $p^u = 0,008^*$	1,53 (0,94; 2,60) $p^u = 0,371$
Интактная группа		767 (658; 1096)	655 (532; 877)	1,75 (1,33; 2,33)	1,56 (1,20; 2,00)

Примечание: Na_m — численная плотность мышечных волокон; Na_{mv} — численная плотность микрососудов; Na_n — численная плотность внутримышечных ядер (Na_n) в 1 мм² площади поперечного среза; kv — коэффициент васкуляризации (Na_{mv}/Na_m), kn — коэффициент нуклеации (Na_n/Na_m). * — различия между экспериментальными сериями и нормой (p^u), сериями 1 и 2 (p) считали статистически значимыми по критерию Манна – Уитни при $p < 0,05$.

Морфометрическое исследование внутримышечных нервных стволиков показало, что через семь суток опыта доля (%) деструктивно измененных миелиновых нервных волокон в сериях 1 и 2 составляет $(91,8 \pm 4,5) \%$ и $(94,4 \pm 6,1) \%$, через 14 суток — $(88,2 \pm 5,3) \%$ и $(80,0 \pm 7,2) \%$, через 21 сутки — $(27,3 \pm 2,8) \%$ и $(33,4 \pm 6,4) \%$, и в конце опыта (42-е сутки) — $(8,9 \pm 3,1) \%$ и $(9,5 \pm 2,2) \%$ соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ

В нашем исследовании проведена оценка влияния на регенераторные процессы однократного внутримышечного введения в зону закрытого частичного раздавливания ПБМ крыс разработанного авторами препарата ВСАА в лекарственной форме для инъекций. Ранее в эксперименте на крысах доказана его безопасность при разовом применении в изученной концентрации, и получены более низкие значения активности креатинфосфокиназы (маркера мышечного повреждения) сыворотки крови животных с инъекцией данного препарата относительно контроля [29].

Известно, что при компрессионном повреждении скелетных мышц вследствие механического сдавления и ишемии-реперфузии травмируются не только мышечные волокна, но и кровеносные сосуды и нервы [30, 32], обширная дегенерация которых наблюдается в течение дегенеративной и воспалительной фаз [33, 34]. Активация миогенеза мышечных клеток-предшественников и ангиогенеза эндотелиальных клеток имеет решающее значение для регенерации мышц после травмы [35]. Есть данные, что незаменимые аминокислоты с разветвленными боковыми радикалами (лейцин, изолейцин и валин) являются активаторами репаративного рабдомиогенеза и ангиогенеза [20].

Выполненное нами стереологическое исследование изменения соотношения тканевых компонентов в ПБМ крыс, регенерирующих после компрессионной травмы, через семь суток выявило равнозначное снижение в обеих сериях (на 36–37 %) доли мышечных волокон и повышение доли эндомизия. В остальные сроки объемная доля мышечных волокон была значимо выше в серии с инъекцией ВСАА, но в конце опыта оставалась ниже нормы в обеих группах. Полученные данные согласуются с результатами стереологических исследований Н.А. Щудло с соавт. [30], которые при такой же экспериментальной модели закрытого частичного раздавливания ПБМ крыс, но с меньшей продолжительностью компрессии (20 с) не выявили полного восстановления объемной доли мышечных волокон даже через 90 дней после травмы.

Для оценки эффективности регенерации мышц после травматических и денервационных повреждений наиболее часто используют показатель «средний либо медианный диаметр мышечных волокон» [30, 36–38]. Проведенный нами количественный анализ популяции мышечных волокон, регенерирующих после закрытого частичного раздавливания, показал, что в течение 28-и суток опыта их медианный диаметр был значимо выше в серии с инъекцией препарата ВСАА. Кроме того, в этой серии индекс нуклеации (число ядер в профиле поперечного сечения одного мышечного волокна) был значимо снижен относительно нормы только через семь суток опыта, а в серии без воздействия — на седьмые, 14-е и 42-е сутки. Более низкие значения данного показателя в серии с естественной регенерацией могут свидетельствовать о менее активном миогенезе, так как, по данным литературы, именно активация миосателлитов является одним из главных факторов, определяющих способность скелетной мышцы к регенерации [39]. В конце опыта (42-е сутки) диаметр мышечных волокон в обеих сериях не достигает нормальных значений и даже снижается, но значимо только в серии с инъекцией ВСАА, в которой повышается доля мелких волокон диаметром 10–30 мкм одновременно с ростом численной плотности и более высокими, чем в серии 1, значениями объемной плотности мышечных волокон. Такая динамика может быть связана со стойкой атрофией части мышечных волокон, гиперпластическим регенераторным ответом в виде расщепления мионов и их дистрофическими изменениями [30], связанными с нарушением кровоснабжения и иннервации. Так, в нашем исследовании в течение 28-и суток индекс васкуляризации мышечных волокон (число сосудов, питающих одно мышечное волокно) был значимо выше в серии с ВСАА, но к 42-м суткам после травмы оказался ниже значений серии 1 и нормы. Известно, что скорость регенерации мышц и полнота восстановления мышечной ткани напрямую зависит от ангиогенеза, восстановления микрососудистой сети [40]. Густая сосудистая сеть может быть более важна для быстрого восстановления мышечных повреждений, чем обилие сателлитных клеток, а более низкая плотность капилляров может ослабить регенерацию [41].

Иннервация ПБМ в проекции компрессионной борозды, как показало наше исследование, нарушается в обеих сериях в равной степени вследствие деструкции миелиновых нервных волокон внутримышечных нервных стволиков и не восстанавливается к концу эксперимента, что также является одной из причин атрофии мышечных волокон [42], сохраняющейся до конца опыта. Денервированные скелетные мышцы теряют свою сократительную функцию, что приводит к снижению перфузии крови и состоянию гипоксии мышцы, избыточному производству активных форм кислорода и повреждению мышечных волокон вследствие окислительного стресса [43].

Таким образом, результаты проведенного нами морфологического, стереологического и морфометрического исследований ПБМ после компрессионной травмы дают основание считать, что применение одной инъекции ВСАА оказывает положительное влияние на регенерацию мышечных волокон и микрососудов. Она более активна, чем при спонтанном течении.

Требуются дальнейшие исследования влияния препарата ВСАА в лекарственной форме для инъекций на регенерацию мышц с коррекцией дозировки, графика, количества инъекций, изучение адаптивных реакций и потенциальных побочных эффектов и отдаленных результатов для подтверждения его эффективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Однократное внутримышечное введение в зону закрытого частичного раздавливания передней большеберцовой мышцы крыс оригинального препарата на основе аминокислот с разветвленными боковыми радикалами (ВСАА) в лекарственной форме для инъекций оказывает миогенный стимулирующий эффект.

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

Источник финансирования. Работа поддержана программой МЗ РФ в рамках государственного задания ФГБУ «НМИЦ ТО имени академика Г.А. Илизарова» Минздрава России для выполнения НИР на 2024–2026 гг

Этическая экспертиза. Исследование одобрено локальным этическим комитетом (протокол от 29.11.2024 № 1(76)).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Белокрылов Н.М., Ладейщиков В.М., Шеколова Н.Б. и др. Повреждения опорно-двигательного аппарата у детей при дорожно-транспортных происшествиях. *Пермский медицинский журнал*. 2018;35(4):26-38. doi: 10.17816/pmj35426-38.
2. Коврижных Ю.А., Коврижных М.В., Запарий Н.С. Основные тенденции повторной инвалидности вследствие травм опорно-двигательного аппарата в г. Москве за 2012-2017 гг. *Здоровье населения и среда обитания – ЗНУСО*. 2021;(1):28-33. doi: 10.35627/2219-5238/2021-334-1-28-33.
3. Зорин В.И., Лукьянов С.А. Анализ телемедицинских консультаций детям с повреждениями опорно-двигательного аппарата по данным НМИЦ детской травматологии и ортопедии им. Г.И. Турнера. *Травматология и ортопедия России*. 2023;29(3):86-93. doi:10.17816/2311-2905-11175.
4. Nakata K., Ishikawa M., Kamei N, et al. Skeletal muscle injury treatment using the Silk Elastin® injection in a rat model. *Regen Ther*. 2024;(26):180-187. doi: 10.1016/j.reth.2024.05.012.
5. Marmolejo-Martinez-Artesero S, Romeo-Guitart D, Venegas V, et al. NeuroHeal Improves Muscle Regeneration after Injury. *Cells*. 2020;10(1):22. doi: 10.3390/cells10010022.
6. Amaechi O, Huffman MM, Featherstone K. Pharmacologic Therapy for Acute Pain. *Am Fam Physician*. 2021;104(1):63-72.
7. Grover KM, Sripathi N. Rhabdomyolysis. *Muscle Nerve*. 2026;73(4):527-533. doi: 10.1002/mus.70079.
8. Yang BF, Li D, Liu CL, et al. Advances in rhabdomyolysis: A review of pathogenesis, diagnosis, and treatment. *Chin J Traumatol*. 2026;29(1):21-31. doi: 10.1016/j.cjtee.2024.10.005.
9. Mokhtari AK, Maurer LR, Christensen MA, et al. Rhabdomyolysis in Severe COVID-19: Male Sex, High Body Mass Index, and Prone Positioning Confer High Risk. *J Surg Res*. 2021;266:35-43. doi: 10.1016/j.jss.2021.03.049.
10. Шперлинг И.А., Одинокова И.А., Шулепов А.В. и др. Особенности регенерационного гистогенеза скелетных мышц в области сдавления при экспериментальной компрессионной травме. *Клиническая патофизиология*. 2021;27(S3):27.
11. Scala P, Rehak L, Giudice V, et al. Stem Cell and Macrophage Roles in Skeletal Muscle Regenerative Medicine. *Int J Mol Sci*. 2021;22(19):10867. doi: 10.3390/ijms221910867.
12. Wang DA, Li QZ, Jia DM. Low-Frequency Electrical Stimulation Promotes Satellite Cell Activities to Facilitate Muscle Regeneration at an Early Phase in a Rat Model of Muscle Strain. *Biomed Res Int*. 2021;2021:4218086. doi: 10.1155/2021/4218086.
13. Чернова О.Н., Корсаков И.Н., Самчук Д.П. и др. Экспериментальные модели для изучения регенерации поперечнополосатой скелетной мышечной ткани. *Гены и клетки*. 2015;10(4):127-140. doi: 10.23868/gc120536.
14. Деев Р.В., Бозо И.Я., Мавликеев М.О., и др. Регенерационный гистогенез в области дефекта скелетной мышцы при местном введении ген-активированного гидрогеля на основе гиалуроновой кислоты в эксперименте. *Гены и клетки*. 2020;15(2):66-72. doi: 10.23868/202004015.
15. Wu Z, Xu H, Xu Y, et al. Andrographolide promotes skeletal muscle regeneration after acute injury through epigenetic modulation. *Eur J Pharmacol*. 2020;888:173470. doi: 10.1016/j.ejphar.2020.173470.
16. Contreras-Muñoz P, Torrella JR, Venegas V, et al. Muscle Precursor Cells Enhance Functional Muscle Recovery and Show Synergistic Effects With Postinjury Treadmill Exercise in a Muscle Injury Model in Rats. *Am J Sports Med*. 2021;49(4):1073-1085. doi: 10.1177/0363546521989235.
17. Jin JB, Robinson A, Soukup T, et al. Metabolic and molecular regulation in skeletal muscle dysfunction and regeneration. *Front Cell Dev Biol*. 2025;13:1651553. doi: 10.3389/fcell.2025.1651553.
18. Koike H, Sugimura M, Ouchi R, et al. Macrophage Subpopulation Promotes Skeletal Muscle Regeneration Through HGF/MET Signaling-Mediated Skeletal Muscle Stem Cell Proliferation. *Aging Cell*. 2025;24(6):e70042. doi: 10.1111/acer.70042.
19. Hirano K, Nakabayashi C, Sasaki M, et al. Mg²⁺ influx mediated by TRPM7 triggers the initiation of muscle stem cell activation. *Sci Adv*. 2025;11(14):eadu0601. doi: 10.1126/sciadv.adu0601.
20. Wilkinson K, Koscienc CP, Monteyne AJ, et al. Association of postprandial postexercise muscle protein synthesis rates with dietary leucine: A systematic review. *Physiol Rep*. 2023;11(15):e15775. doi: 10.14814/phy2.15775.
21. Weber MG, Dias SS, de Angelis TR, et al. The use of BCAA to decrease delayed-onset muscle soreness after a single bout of exercise: a systematic review and meta-analysis. *Amino Acids*. 2021;53(11):1663-1678. doi: 10.1007/s00726-021-03089-2.
22. Hou YC, Wu JM, Chen KY, et al. Glutamine and leucine administration attenuates muscle atrophy in sepsis. *Life Sci*. 2023;314:121327. doi: 10.1016/j.lfs.2022.121327.
23. Hemstock R, Mulhall D, Didyk J, et al. Postoperative weight-bearing restrictions and rehabilitation protocols after hip arthroscopy for femoroacetabular impingement: a systematic review. *J Hip Preserv Surg*. 2023;10(3-4):220-227. doi: 10.1093/jhps/hnad023.
24. Cordingley DM, Taheri M, Fasihiyan M, et al. Selected Nutrients to Oppose Muscle Disuse Following Arthroscopic Orthopedic Surgery: A Narrative Review. *Nutrients*. 2025;17(7):1273. doi: 10.3390/nu17071273.
25. Ikeda T, Suzuki S, Aimoto K, et al. Effect and feasibility of the combination of branched chain amino acid and exercise therapy on muscle mass and echo intensity of muscle in orthopedic patients in a convalescent rehabilitation hospital: A crossover trial. *Health Sci Rep*. 2023;6(6):e1316. doi: 10.1002/hsr2.1316.
26. Witard OC, Hughes AK, Morgan PT, et al. Protein-based perioperative nutrition interventions for improving muscle mass and functional outcomes following orthopaedic surgery. *Exp Physiol*. 2025;110(12):1802-1809. doi: 10.1113/EP092237.
27. Church DD, Schutzler SE, Wolfe RR, Ferrando AA. Perioperative amino acid infusion reestablishes muscle net balance during total hip arthroplasty. *Physiol Rep*. 2021;9(18):e15055. doi: 10.14814/phy2.15055.
28. Khani Y, Salmani A, Elahi M, et al. Peri-operative protein or amino acid supplementation for total joint arthroplasty: a systematic review and meta-analysis. *J Orthop Surg Res*. 2025;20(1):439. doi: 10.1186/s13018-025-05847-4.
29. Стогов М.В., Кононович Н.А., Тушина Н.В. и др. Эффективность препарата аминокислот с разветвленными боковыми радикалами в лекарственной форме для инъекций при травматическом повреждении скелетных мышц в эксперименте. *Экспериментальная и клиническая фармакология*. 2025;88(2):34-38. doi: 10.30906/0869-2092-2025-88-2-34-38.
30. Шудло Н.А., Шудло М.М., Кононович Н.А. Гистоморфометрическая характеристика скелетной мышцы, регенерирующей после закрытого частичного раздавливания. *Морфология*. 2014;146(4):59-63.
31. Шудло М. М., Ступина Т. А., Шудло Н. А. Количественный анализ метакромазии суставного хряща в телепатологии. *Известия Челябинского научного центра*. 2004;25(Спец. вып.):17-22.
32. Tu H, Zhang D, Corrick RM, et al. Morphological Regeneration and Functional Recovery of Neuromuscular Junctions after Tourniquet-Induced Injuries in Mouse Hindlimb. *Front Physiol*. 2017;8:207. doi: 10.3389/fphys.2017.00207.
33. Forcina L, Cosentino M, Musarò A. Mechanisms Regulating Muscle Regeneration: Insights into the Interrelated and Time-Dependent Phases of Tissue Healing. *Cells*. 2020;9(5):1297. doi: 10.3390/cells9051297.
34. Morton AB, Jacobsen NL, Segal SS. Functionalizing biomaterials to promote neurovascular regeneration following skeletal muscle injury. *Am J Physiol Cell Physiol*. 2021;320(6):C1099-C1111. doi: 10.1152/ajpcell.00501.2020.
35. Roux-Biejat P, Coazzoli M, Marrazzo P, et al. Acid Sphingomyelinase Controls Early Phases of Skeletal Muscle Regeneration by Shaping the Macrophage Phenotype. *Cells*. 2021;10(11):3028. doi: 10.3390/cells10113028.

36. Филимонова Г.Н., Кубрак Н.В., Краснов В.В., Рябых С.О. Гистоморфометрическое исследование камбаловидной мышцы в условиях моделирования контузионной травмы спинного мозга: экспериментально-морфологическое исследование. *Хирургия позвоночника*. 2021;18(4):111-118. doi: 10.14531/ss2021.4.111-118.
37. Щудло Н.А., Кобызов А.Е., Варсегова Т.Н., Ступина Т.А. Гистоморфометрическая оценка большеберцового нерва и мелких мышц стопы после внутреннего невротики и аутогенной пластики большеберцовой порции седалищного нерва крыс. *Гений ортопедии*. 2022;28(6):823-829. doi: 10.18019/1028-4427-2022-28-6-823-829.
38. Моховиков Д.С., Ступина Т.А., Варсегова Т.Н. и др. Гистоморфометрические характеристики передней большеберцовой мышцы и малоберцового нерва при экспериментальном замещении пострезекционного дефекта голени аппаратом Илизарова в комбинации с методом Masquelet. *Гений ортопедии*. 2020;26(2): 216-221. doi 10.18019/1028-4427-2020-26-2-216-221.
39. Wang Y, Lu J, Liu Y. Skeletal Muscle Regeneration in Cardiotoxin-Induced Muscle Injury Models. *Int J Mol Sci*. 2022;23(21):13380. doi: 10.3390/ijms232113380.
40. Broer T, Tsintolas N, Purkey K, et al. Engineered myovascular tissues for studies of endothelial/satellite cell interactions. *Acta Biomater*. 2024;188:65-78. doi: 10.1016/j.actbio.2024.09.020.
41. Hendrickse P, Degens H. The role of the microcirculation in muscle function and plasticity. *J Muscle Res Cell Motil*. 2019;40(2):127-140. doi: 10.1007/s10974-019-09520-2.
42. Yang X, Xue P, Chen H, et al. Denervation drives skeletal muscle atrophy and induces mitochondrial dysfunction, mitophagy and apoptosis via miR-142a-5p/MFN1 axis. *Theranostics*. 2020;10(3):1415-1432. doi: 10.7150/thno.40857.
43. Zhang L, Li M, Wang W, et al. Celecoxib alleviates denervation-induced muscle atrophy by suppressing inflammation and oxidative stress and improving microcirculation. *Biochem Pharmacol*. 2022;203:115186. doi: 10.1016/j.bcp.2022.115186.

Статья поступила 24.02.2026; одобрена после рецензирования 17.04.2026; принята к публикации 09.06.2026.

The article was submitted 24.02.2026; approved after reviewing 17.04.2026; accepted for publication 09.06.2026.

Информация об авторах:

Татьяна Николаевна Варсегова — кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, varstn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5430-2045>;

Максим Валерьевич Стогов — доктор биологических наук, руководитель отдела, доцент, stogo_off@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8516-8571>;

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

Information about the authors:

Tatyana N. Varsegova — Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, varstn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5430-2045>;

Maksim V. Stogov — Doctor of Biological Sciences, Head of the Department, Associate Professor, stogo_off@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8516-8571>;

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

Вклад авторов:

Варсегова Т.Н. — анализ материала, статистическая обработка, написание текста.

Кононович Н.А. — проведение эксперимента, анализ материала, написание текста.

Стогов М.В. — концепция и дизайн исследования, написание текста.

Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE.



Сравнительный анализ результатов клинико-инструментальных исследований при использовании стандартной и модифицированной стромально-васкулярной фракции в лечении пациентов с хондромалацией надколенника

Г.М. Зверев^{1,2✉}, А.С. Судницын², С.В. Яковлев³, А.В. Сайфулин¹, Ш.А. Моев⁴

¹ Акционерное общество «Медси», Москва, Россия

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

³ ООО «ПолиКлиника», Челябинск, Россия

⁴ Акционерное общество «Медси 2», Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Глеб Михайлович Зверев, dr.zverev@bk.ru

Аннотация

Актуальность. Хондромалация надколенника является одной из ведущих причин боли в переднем отделе коленного сустава и рассматривается как ранняя форма дегенеративного поражения пателло-фemorального хряща. Ограниченный регенераторный потенциал гиалинового хряща и переменная эффективность консервативных методов лечения обуславливают поиск биологических технологий, способных оказывать структурно-модифицирующее воздействие. Перспективным направлением является применение аутологичной стромально-васкулярной фракции (SVF) жировой ткани, обладающей противовоспалительным и регенераторным потенциалом.

Цель работы — провести сравнительную оценку результатов клинико-инструментальных исследований при использовании стандартной и модифицированной технологий SVF-терапии в лечении пациентов с хондромалацией надколенника.

Материалы и методы. Выполнено нерандомизированное ретроспективное многоцентровое когортное исследование, включившее 41 пациента с хондромалацией надколенника I–III степени по Outerbridge. Пациенты распределены на две группы: стандартная SVF ($n = 20$) и модифицированная SVF ($n = 21$). Оценка проводилась до лечения и через один, шесть и 12 месяцев. Анализировали показатели ВАШ, KOOS-PS, а также количественные параметры дефекта хряща по данным МРТ (линейные размеры, площадь, объём). Различия считали статистически значимыми при уровне $p < 0,05$.

Результаты. В обеих группах через 12 месяцев отмечено достоверное снижение боли и улучшение функции ($p < 0,001$). В группе стандартной SVF площадь дефекта уменьшилась на 27,4 %, объём — на 44,6 %; в группе модифицированной SVF — на 40,2 % и 53,8 % соответственно ($p < 0,001$). Межгрупповое сравнение выявило более выраженное уменьшение ширины дефекта при модифицированной методике ($p = 0,007$). Через один месяц после лечения в группе модифицированной SVF зарегистрировано более выраженное снижение боли и улучшение функции ($p < 0,01$), тогда как в сроки шесть и 12 месяцев различия нивелировались.

Обсуждение. Модифицированная технология SVF-терапии обеспечивала более раннее снижение боли и улучшение функции по сравнению со стандартной методикой. В отдалённые сроки различия сглаживались, что подтверждает высокую эффективность SVF-терапии независимо от варианта протокола. Сопоставимые морфологические результаты по данным МРТ свидетельствуют о сохранении структурного эффекта при модификации технологии. Ограничениями исследования являются нерандомизированный дизайн и умеренный объём выборки.

Заключение. SVF-терапия демонстрирует выраженный клинический и структурно-положительный эффект при хондромалации надколенника. Модифицированная технология обеспечивает более быстрое наступление клинического эффекта при сопоставимых отдалённых результатах морфологических изменений по данным МРТ, что позволяет рассматривать её как перспективный вариант оптимизации клеточной терапии.

Ключевые слова: стромально-васкулярная фракция, хондромалация, мезенхимальные стромальные клетки жировой ткани

Для цитирования: Зверев Г.М., Судницын А.С., Яковлев С.В., Сайфулин А.В., Моев Ш.А. Сравнительный анализ результатов клинико-инструментальных исследований при использовании стандартной и модифицированной стромально-васкулярной фракции в лечении пациентов с хондромалацией надколенника. *Гений ортопедии*. 2026;32(4):470-478. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-4-470-478.

Original article

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2026-32-4-470-478>


Comparative analysis of clinical and instrumental study of the results of using standard and modified stromal-vascular fractions in the treatment of patients with chondromalacia patellae

G.M. Zverev^{1,2✉}, A.S. Sudnitsyn², S.V. Yakovlev³, A.V. Saifulin¹, Sh.A. Moev⁴

¹ Medsi Group of Companies, Moscow, Russian Federation

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

³ PoliKlinika LLC, Chelyabinsk, Russian Federation

⁴ Joint-Stock Company "Meds 2", Moscow, Russian Federation

Corresponding author: Gleb M. Zverev, dr.zverev@bk.ru

Abstract

Introduction Chondromalacia patellae is a leading cause of anterior knee pain and is considered an early form of degenerative patellofemoral cartilage disease. The limited regenerative potential of the hyaline cartilage and the variable effectiveness of conservative treatments motivate the search for biological technologies capable of providing structure-modifying effects. A promising approach is the use of autologous stromal vascular fraction (SVF) of adipose tissue that has anti-inflammatory and regenerative potential.

The **purpose** of the work is to conduct a comparative assessment of clinical and instrumental studies of the results of standard and modified SVF therapy technologies in the treatment of patients with chondromalacia patella.

Materials and Methods A non-randomized, retrospective, multicenter cohort study was performed. It included 41 patients with Outerbridge grades I–III chondromalacia patellae. Patients were divided into two groups according to treatment protocol provided: standard SVF ($n = 20$) and modified SVF ($n = 21$). Assessments were performed before treatment and after one, six, and 12 months. VAS, KOOS-PS, and quantitative parameters of cartilage defect based on MRI data (linear dimensions, area, volume) were analyzed. Differences were considered statistically significant at $p < 0.05$.

Results In both groups, a significant reduction in pain and improvement in function were noted after 12 months ($p < 0.001$). In the standard SVF group, the defect area decreased by 27.4 % and volume by 44.6 %; in the modified SVF group, by 40.2 % and 53.8 %, respectively ($p < 0.001$). Intergroup comparison revealed a more pronounced decrease in defect width with the modified technique ($p = 0.007$). One month after treatment, the modified SVF group showed a more pronounced reduction in pain and improvement in function ($p < 0.01$), while the differences leveled out at six and 12 months.

Discussion The modified SVF therapy technique resulted in earlier pain reduction and improved function compared to the standard technique. These differences leveled over the long term, confirming the high efficacy of SVF therapy regardless of the protocol variant. Comparable morphological results based on MRI data indicate that the structural effect was maintained with the modified technique. Limitations of the study include the non-randomized design and a moderate sample size.

Conclusion SVF therapy demonstrates significant clinical and structural benefits in chondromalacia patellae. The modified technology provides a more rapid onset of clinical effect with comparable long-term morphological changes based on MRI data, suggesting it as a promising option for optimizing cell therapy.

Keywords: stromal-vascular fraction, chondromalacia, adipose tissue, mesenchymal stromal cells

For citation: Zverev GM, Sudnitsyn AS, Yakovlev SV, Saifulin AV, Moev ShA. Comparative analysis of clinical and instrumental study of the results of using standard and modified stromal-vascular fractions in the treatment of patients with chondromalacia patellae. *Genij Ortopedii*. 2026;32(4):470-478. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-4-470-478.

ВВЕДЕНИЕ

Хондромалицию надколенника традиционно рассматривают как раннюю форму дегенеративного поражения суставного хряща пателлофemorального сочленения и одну из ведущих причин боли в переднем отделе коленного сустава [1, 2]. Современные представления эволюционировали от изолированной механической концепции к пониманию многофакторной природы заболевания, включающей биомеханические нарушения, изменения внутрисуставной среды и молекулярные механизмы деградации матрикса [3–5]. Нарушение трекинга надколенника, дисбаланс мышечного контроля и изменения кинематики нижней конечности приводят к увеличению контактных напряжений в пателлофemorальном суставе и прогрессированию хрящевых повреждений [6, 7]. На молекулярном уровне хроническая перегрузка инициирует каскад воспалительно-дегенеративных реакций, сопровождающихся активацией провоспалительных цитокинов (IL-1, TNF- α), нарушением сигнальных путей TGF- β /BMP и формированием фенотипа гипертрофированных и сенесцентных хондроцитов [8–9]. Низкоинтенсивное хроническое воспаление рассматривают как ключевой медиатор прогрессирования дегенеративных изменений хряща [10, 11]. С учётом ограниченного регенераторного потенциала гиалинового хряща [12] традиционные консервативные подходы, включая лечебную физкультуру и модификацию нагрузки, демонстрируют вариабельную эффективность и не обладают доказанным структурно-модифицирующим эффектом [13, 14].

Хирургические методы восстановления хряща (микрофрактурирование, аутологичная имплантация хондроцитов, остеохондральная пластика) способны обеспечивать клиническое улучшение, однако характеризуются инвазивностью, ограниченными показаниями и вариабельностью отдалённых результатов [15–19]. Ограничения как консервативных, так и хирургических методов лечения обусловили активный поиск биологических подходов, направленных не только на купирование симптомов, но и на модификацию внутрисуставной микросреды и стимуляцию репаративных процессов. В последние годы значительный интерес вызывает применение клеточных технологий, в частности мезенхимальных стромальных клеток (МСК) и стромально-васкулярной фракции (*англ.*: stromal vascular fraction, SVF) жировой ткани. Жировую ткань рассматривают как доступный и богатый источник регенераторных клеток [20, 21]. В состав SVF входят мезенхимальные стромальные клетки, перитциты, эндотелиальные и иммуномодулирующие элементы, что обеспечивает выраженное паракринное и иммунорегуляторное действие [22, 23]. Экспериментальные данные свидетельствуют о способности этих клеток снижать воспалительную активность и стимулировать процессы ремоделирования хрящевой ткани [24].

Клинические исследования демонстрируют уменьшение болевого синдрома и улучшение функции после внутрисуставного введения аутологичных клеточных продуктов, полученных из жировой ткани [25–27]. Обзорные публикации и анализы клинических исследований подтверждают потенциал SVF и адипозных мезенхимальных клеток при остеоартрите коленного сустава, однако указывают на выраженную гетерогенность дизайна исследований, методов получения клеточного продукта и режимов введения, что подчёркивает необходимость стандартизации протоколов [28–30].

Несмотря на растущий объём данных о применении SVF при дегенеративных поражениях хряща, сравнительные исследования её эффективности при хондромалиции надколенника остаются ограниченными. Недостаточно изучено и влияние особенностей подготовки клеточного продукта на клинический эффект и выраженность постинъекционной синовиальной реакции. В связи с этим актуальна сравнительная оценка результатов применения стандартной и модифицированной технологий SVF-терапии.

Цель работы — провести сравнительную оценку результатов клинико-инструментальных исследований при использовании стандартной и модифицированной технологий SVF-терапии в лечении пациентов с хондромалицией надколенника.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проведено нерандомизированное ретроспективное многоцентровое когортное исследование, включавшее 41 пациента с хондромалицией надколенника, проходивших лечение в 2021–2024 гг. на базе АО «Медси» (г. Москва) и НМИЦ ТО имени академика Г.А. Илизарова (г. Курган). Исследование проведено в соответствии с этическими принципами, изложенными в Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации (редакция 2013 г., с последующими поправками), а также с соблюдением требований «Правил надлежащей клинической практики» (GCP) и «Правил клинической практики в Российской Федерации», утверждённых Приказом Минздрава России от 01.04.2016 г. № 200н. Все участники исследования подписали информированное согласие на участие и публикацию обезличенных данных, полученных в ходе исследования.

Формирование выборки осуществляли на основании заранее определённых критериев включения и исключения. В исследование включали пациентов в возрасте от 25 до 80 лет с клинически значимой болью в переднем отделе коленного сустава длительностью более трех месяцев и интенсивностью

более 40 мм по визуально-аналоговой шкале (ВАШ) при наличии подтверждённой результатами магнитно-резонансной томографии (МРТ) хондромалиции надколенника I–III степени по классификации Outerbridge. Обязательным условием включения являлось отсутствие клинически значимого эффекта от ранее проведённой консервативной терапии продолжительностью не менее трёх месяцев, включавшей кинезитерапию, применение нестероидных противовоспалительных препаратов, хондропротекторов и/или внутрисуставные инъекции гиалуроновой кислоты.

В исследование не включали пациентов с хондромалицией IV степени, клинически значимыми осевыми деформациями нижней конечности (варус, вальгус, patella alta), активными системными воспалительными заболеваниями (ревматоидный артрит, серонегативные спондилоартропатии, системные заболевания соединительной ткани), инфекционными поражениями коленного сустава в анамнезе, тяжёлой соматической патологией (декомпенсированный сахарный диабет, хроническая сердечная недостаточность III–IV функционального класса, онкологические заболевания), а также с клинически значимыми отклонениями лабораторных показателей. Также не включали пациентов, получавших внутрисуставные инъекции биологических препаратов (PRP, SVF, BMAC) или гиалуроновой кислоты менее чем за шесть месяцев до исследования, лиц с нарушениями системы гемостаза, принимающих антикоагулянтную терапию, с индексом массы тела более 35 кг/м², женщин в период беременности и лактации. Допускали эпизодический приём НПВП до включения в исследование при отсутствии систематической противовоспалительной терапии. Таким образом, влияние системных заболеваний и сопутствующей медикаментозной терапии на клинические исходы было минимизировано.

Все пациенты распределены на две группы в зависимости от применяемого ортобиологического метода лечения. В группу I ($n = 20$) вошли пациенты, которым выполняли однократное внутрисуставное введение SVF, полученной механическим способом по стандартной технологии АСТ, рекомендуемой производителем SOLOPHARM. В группу II ($n = 21$) включены пациенты, пролеченные с использованием модифицированного протокола механического получения SVF [31]. Препараты гиалуроновой кислоты в течение 12 месяцев после процедуры во всех группах не применяли.

Возраст пациентов — ($45,4 \pm 11,7$) года, варьировал от 27 до 73 лет. Распределение по полу, возрасту, индексу массы тела (ИМТ) и степени хондромалиции между группами статистически значимо не различалось, что позволяет рассматривать исследуемые когорты как сопоставимые и корректно проводить межгрупповой сравнительный анализ. Подробная характеристика пациентов представлена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика пациентов

Показатель		SVF стандарт ($n = 20$)		SVF модифицированная ($n = 21$)	
		абс.	%	абс.	%
Возраст, лет	($M \pm SD$)	$47,2 \pm 11,3$		$43,8 \pm 11,8$	
	18–44	10	50,0	11	52,4
	45–59	7	35,0	8	38,1
	60–74	3	15,0	2	9,5
Пол	Мужчины	14	70,0	12	57,1
	Женщины	6	30,0	9	42,9
ИМТ, кг/м ²	Норма (18,5–24,9)	7	35,0	5	23,8
	Избыточная масса (25,0–29,9)	9	45,0	12	57,1
	Ожирение I ст. (30,0–34,9)	4	20,0	4	19,0
Степень хондромалиции (Outerbridge)	I степень	1	5,0	3	14,3
	II степень	10	50,0	11	52,4
	III степень	9	45,0	7	33,3

Клиническую оценку эффективности проводили до лечения, а также через один, шесть и 12 месяцев наблюдения. Интенсивность болевого синдрома оценивали с использованием ВАШ. Функциональное состояние коленного сустава анализировали по шкале KOOS-PS. Все опросники пациенты заполняли самостоятельно под контролем врача.

Инструментальная оценка включала МРТ коленного сустава, выполняемую до лечения и через 12 месяцев после вмешательства на аппаратах с напряжённостью магнитного поля 1,5 Тл и 3,0 Тл. Для каждого пациента первичное и контрольное исследования проводили на одном и том же аппарате с использованием идентичного протокола сканирования, что обеспечивало сопоставимость полученных данных. Анализировали толщину суставного хряща в зонах интереса, локализацию дефекта (медиальная фа-

сетка, латеральная фасетка, межфасеточная борозда), линейные размеры поражения (ширина, высота, глубина), а также расчётные показатели площади (мм^2) и объёма (мм^3) дефекта. Дополнительно учитывали признаки синовиальной реакции по данным МРТ. Для межгруппового анализа рассчитывали величину изменения показателя (Δ), определяемую как разницу между значениями после лечения и исходными данными.

Статистическую обработку данных выполняли с использованием программной среды R (version 3.2.4). Статистический анализ проводили с использованием стандартных методов вариационной статистики. Нормальность распределения количественных показателей предварительно оценивали по соответствующим критериям. При подтверждении нормального распределения внутригрупповую динамику количественных параметров анализировали с применением парного t-критерия Стьюдента для зависимых выборок. Для оценки внутригрупповой динамики показателей, полученных по клиническим шкалам (ВАШ, KOOS), использовали критерий Фридмана. Межгрупповое сравнение независимых выборок выполняли с применением U-критерия Манна – Уитни. Различия считали статистически значимыми при уровне $p < 0,05$. Результаты представлены в виде среднего значения и стандартного отклонения ($M \pm SD$) либо медианы и межквартильного размаха ($Me [Q1-Q3]$).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В группе стандартной SVF-терапии через 12 месяцев наблюдения зарегистрировано статистически значимое уменьшение размеров хондрального дефекта ($p < 0,001$). Площадь поражения сократилась в среднем на 27,4 %, объём — на 44,6 % от исходного уровня. Выявленная динамика отражает умеренно выраженную структурную перестройку зоны повреждения и формирование репаративных процессов в хрящевой ткани. Полученные результаты свидетельствуют о структурно-положительном эффекте стандартной SVF-терапии, проявляющемся в достоверной редукции размеров дефекта и стабилизации дегенеративного процесса (табл. 2).

Анализ линейных и объёмных параметров хондрального дефекта надколенника в группе модифицированной SVF-терапии продемонстрировал статистически значимое уменьшение всех исследуемых показателей через 12 месяцев после проведения процедуры ($p < 0,001$) (табл. 2). Площадь дефекта сократилась в среднем на 40,2 %, объём — на 53,8 % от исходного уровня. Полученные результаты свидетельствуют о выраженной структурной перестройке зоны повреждения и формировании благоприятной морфологической динамики в пателлофemorальном сочленении.

Таблица 2

Динамика параметров дефекта хряща по данным МРТ

Показатель	SVF стандарт ($n = 20$)					SVF модифицированная ($n = 21$)				
	до лечения	после лечения	Δ (после–до)	t	p	до лечения	после лечения	Δ (после–до)	t	p
Ширина дефекта, мм	6,78 $\pm$ 2,61	5,84 $\pm$ 2,52	–0,95 $\pm$ 0,52	8,14	< 0,001	6,85 $\pm$ 3,31	5,19 $\pm$ 2,48	–1,65 $\pm$ 1,10	6,86	< 0,001
Высота дефекта, мм	7,03 $\pm$ 2,17	5,81 $\pm$ 2,11	–1,22 $\pm$ 0,76	7,22	< 0,001	6,97 $\pm$ 4,18	5,54 $\pm$ 3,30	–1,43 $\pm$ 0,95	6,87	< 0,001
Глубина дефекта, мм	1,96 $\pm$ 0,52	1,46 $\pm$ 0,40	–0,50 $\pm$ 0,29	7,56	< 0,001	2,66 $\pm$ 0,94	2,05 $\pm$ 0,88	–0,61 $\pm$ 0,46	6,06	< 0,001
Площадь дефекта, мм^2	50,32 $\pm$ 30,52	36,53 $\pm$ 25,39	–13,79 $\pm$ 8,62	7,15	< 0,001	50,11 $\pm$ 37,73	29,97 $\pm$ 20,59	–20,14 $\pm$ 17,84	5,17	< 0,001
Объём дефекта, мм^3	105,28 $\pm$ 91,90	58,36 $\pm$ 56,02	–46,92 $\pm$ 41,82	5,02	< 0,001	123,65 $\pm$ 96,03	57,16 $\pm$ 52,15	–66,48 $\pm$ 51,49	5,92	< 0,001

В группе стандартной SVF-терапии снижение болевого синдрома носило поступательный и устойчивый характер. Наиболее выраженную динамику по шкале ВАШ отмечали к шестому месяцу наблюдения с сохранением достигнутого уровня к 12-ому месяцу. Полученные данные указывают на формирование стабильного аналгетического эффекта, нарастающего во времени и достигающего максимальной выраженности в отдалённом периоде. Статистический анализ подтвердил достоверность изменений в динамике (критерий Фридмана: $\chi^2(3) = 58,13$; $p < 0,001$) (табл. 3). Динамика функциональных показателей по шкале KOOS-PS соответствовала снижению болевого синдрома: наиболее выраженное улучшение отмечали к шестому месяцу с сохранением достигнутого уровня к 12-ому месяцу наблюдения. Статистический анализ подтвердил достоверность изменений во времени (критерий Фридмана: $\chi^2(3) = 59,71$; $p < 0,001$) (табл. 3). Полученные данные свидетельствуют о стойком функциональном улучшении после SVF-терапии, что согласуется с положительной динамикой морфологических изменений по данным МРТ.

В группе модифицированной SVF-терапии снижение болевого синдрома отмечали уже через один месяц после вмешательства. Динамика по шкале ВАШ носила ранний и выраженный характер с дальнейшим уменьшением показателей к шестому месяцу и сохранением достигнутого уровня к 12-му месяцу наблюдения. Статистический анализ подтвердил достоверность изменений во времени (критерий Фридмана: $\chi^2(3) = 57,75$; $p < 0,001$) (табл. 3). Полученные данные указывают на быстрое формирование аналгетического эффекта с последующей стабилизацией и длительным сохранением клинического результата. Динамика функциональных показателей по шкале KOOS-PS также носила ранний характер: улучшение регистрировали уже через один месяц, и к шестому месяцу оно достигало уровня, сопоставимого с результатами группы стандартной SVF-терапии с сохранением достигнутых значений к 12-му месяцу наблюдения. Статистический анализ подтвердил достоверность изменений во времени (критерий Фридмана: $\chi^2(3) = 61,32$; $p < 0,001$) (табл. 3). Полученные данные свидетельствуют о быстром формировании и устойчивом сохранении функционального улучшения, что соответствует выявленной положительной динамикой морфологических изменений по данным МРТ.

Таблица 3

Динамика по шкалам опросников

Период	Шкала ВАШ						Шкала KOOS-PS					
	SVF стандарт (n = 20)			SVF модифицированная (n = 21)			SVF стандарт (n = 20)			SVF модифицированная (n = 21)		
	медиана	Q1–Q3	min–max	медиана	Q1–Q3	min–max	медиана	Q1–Q3	min–max	медиана	Q1–Q3	min–max
До лечения	6,0	4,5–7,5	3–9	6,0	5,0–7,0	2–9	11,0	7,0–15,3	3–26	11,0	4,0–15,0	3–26
1 мес.	5,0	4,0–6,5	2–8	3,0	2,0–5,0	1–6	9,5	5,0–13,3	3–24	5,0	2,0–11,0	1–16
6 мес.	3,0	1,0–4,5	1–6	2,0	1,0–3,0	1–5	3,5	2,0–9,0	1–15	2,0	1,0–7,0	0–12
12 мес.	1,0	1,0–1,0	1–2	1,0	1,0–2,0	1–2	1,0	0–2,0	0–10	1,0	1,0–2,0	0–10

Межгрупповое сравнение

При межгрупповом сравнении динамики линейных и объёмных параметров дефекта достоверное преимущество модифицированной методики по сравнению со стандартной методикой выявлено в отношении уменьшения ширины дефекта ($p < 0,05$). По другим параметрам статистически значимых различий не получено ($p > 0,05$) (табл. 4).

Таблица 4

Сравнительная динамика параметров хондрального дефекта по данным МРТ

Показатель	SVF стандарт Δ	SVF модифицированная Δ	p
	Me (Q1–Q3)		
Ширина дефекта, мм	0,98 (0,46–1,29)	1,42 (1,18–1,66)	0,007
Высота дефекта, мм	1,14 (0,54–1,91)	1,14 (0,92–1,54)	0,629
Глубина дефекта, мм	0,44 (0,25–0,72)	0,36 (0,30–0,92)	0,705
Площадь дефекта, мм²	12,54 (7,10–16,41)	15,99 (5,78–16,90)	0,540
Объём дефекта, мм³	33,49 (24,43–61,15)	37,22 (19,33–114,69)	0,382

Межгрупповой анализ динамики болевого синдрома по шкале ВАШ выявил различия во времени наступления клинического эффекта в зависимости от применяемой методики. В группе модифицированной SVF-терапии отмечено более выраженное снижение болевого синдрома через один месяц после процедуры по сравнению со стандартной SVF-терапией ($p < 0,01$). В более отдалённые сроки наблюдения (шесть и 12 месяцев) статистически значимых различий между группами не выявлено ($p > 0,05$) (рис. 1).

Межгрупповой анализ по шкале KOOS-PS продемонстрировал аналогичную закономерность: применение модифицированной SVF-терапии сопровождалось более ранним функциональным улучшением по сравнению со стандартной SVF-терапией. Статистически значимые различия в динамике показателей KOOS-PS выявлены через один месяц после лечения ($p < 0,01$). На сроках шесть и 12 месяцев различия между группами не достигали уровня статистической значимости ($p > 0,05$) (рис. 2).

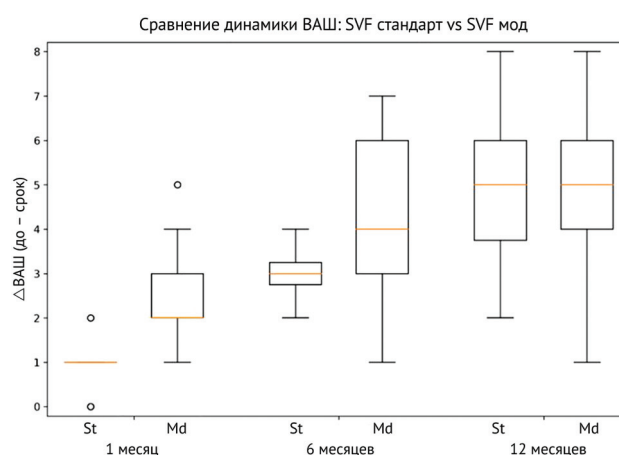


Рис. 1. Межгрупповое сравнение по шкале ВАШ

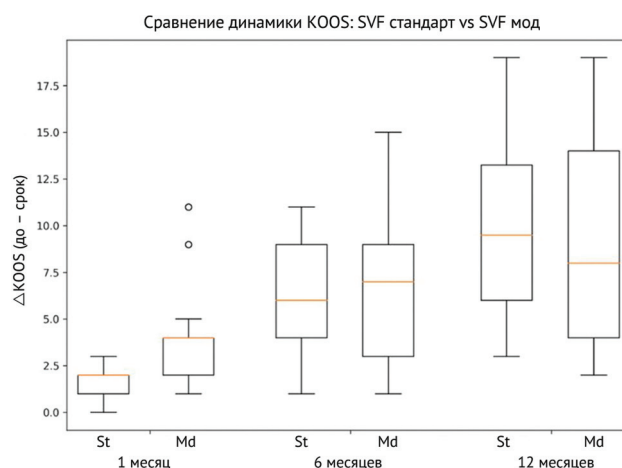


Рис. 2. Межгрупповое сравнение по шкале KOOS-PS

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведённый анализ продемонстрировал, что применение модифицированной методики SVF-терапии обеспечивает более быстрое наступление клинического эффекта по сравнению со стандартной методикой. Уже в течение первого месяца наблюдения мы отмечали достоверно более выраженное снижение болевого синдрома и более раннее улучшение функциональных показателей. Данная динамика имеет важное клиническое значение, поскольку позволяет пациентам быстрее возвращаться к физической активности, используя целенаправленные программы укрепления мышц нижних конечностей, что способствует стабилизации достигнутого результата. Кроме того, ускоренное уменьшение боли и более мягкое течение раннего постинъекционного периода повышают переносимость процедуры и формируют более высокий уровень доверия к проводимой терапии.

Несмотря на выявленное преимущество модифицированной методики в ранние сроки, в отдалённом периоде (6–12 месяцев) показатели боли по ВАШ и функциональной шкале KOOS-PS в обеих группах становились сопоставимыми, что подтверждает общую высокую эффективность SVF-терапии вне зависимости от варианта обработки клеточного субстрата. Отсутствие выраженных межгрупповых различий в морфологических параметрах дефекта по данным MPT также свидетельствует о сохранении регенеративного потенциала при использовании модифицированной технологии. Полученные результаты позволяют предположить, что модификация протокола направлена преимущественно на оптимизацию клеточного состава и переносимость процедуры, не снижая жизнеспособность клеток и не уменьшая структурно-модифицирующий эффект терапии.

Результаты настоящего исследования согласуются с данными ряда клинических работ, посвящённых применению стромально-васкулярной фракции и микро-фрагментированной жировой ткани при дегенеративных поражениях коленного сустава. Так, в исследовании N. Yokota et al. снижение болевого синдрома по шкале ВАШ через шесть месяцев в группе SVF составило 44,0 % [32], тогда как в нашей работе к этому сроку редукция боли превышала 50 % с дальнейшим нарастанием эффекта при более длительном наблюдении. Аналогичная направленность динамики показана S. Bisicchia et al., где применение микро-фрагментированной SVF в сочетании с микрофрактурированием приводило к снижению ВАШ до $(2,6 \pm 1,8)$ балла через 12 месяцев [33]. В нашем исследовании к 12-му месяцу медиана ВАШ уменьшалась с 6 до 1 балла в обеих группах SVF, что отражает выраженный анальгетический эффект клеточной терапии. Сходные результаты получены D. Hudetz et al.: снижение боли при движении составило около 56–57 %, а в покое — до 85 % к 12-му месяцу [34], что сопоставимо с редукцией болевого синдрома на 80–85 % в нашем исследовании. В работе Y. Onoi et al. после однократного введения ADRCs также отмечено уменьшение боли на 75–80 % к шестому месяцу и улучшение показателей KOOS [35]. Данные J. Michalek et al. подтверждают устойчивость эффекта SVF-терапии: снижение боли достигало 65–70 % к 12-му месяцу и сохранялось до 36 месяцев наблюдения [36]. Наконец, A. Russo et al. продемонстрировали медианное уменьшение боли на 40–50 % и улучшение KOOS на 30–35 % через 12 месяцев [37], что также подтверждает выраженную клинко-функциональную эффективность жировой клеточной терапии.

В совокупности эти данные свидетельствуют о воспроизводимости анальгетического и функционального эффектов SVF-терапии, при этом полученные в нашем исследовании показатели редукции боли находятся в диапазоне, сопоставимом или превышающем опубликованные результаты.

К ограничениям исследования можно отнести нерандомизированный характер распределения пациентов и умеренный объём выборки. Тем не менее, стандартизированный протокол лечения и сопоставимость групп минимизируют влияние потенциальных систематических факторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование продемонстрировало высокую клиническую и структурную эффективность SVF-терапии при лечении пациентов с хондромалацией надколенника. В обеих группах зарегистрировано достоверное снижение болевого синдрома, выраженное функциональное улучшение и статистически значимая редукция линейных и объёмных параметров хондрального дефекта по данным количественного МРТ-анализа, что подтверждает структурно-положительный эффект клеточной терапии.

Модифицированная технология SVF обеспечивала более быстрое наступление клинического эффекта при сопоставимых структурных изменениях по данным МРТ в отдалённом периоде наблюдения, что свидетельствует о сохранении регенеративного потенциала клеточного субстрата при оптимизации протокола его подготовки.

Полученные данные позволяют рассматривать SVF-терапию как эффективный биологический метод коррекции дегенеративных изменений пателлофemorального сочленения, а модифицированную технологию — как вариант, обеспечивающий ускоренное формирование клинического ответа при сохранении структурной эффективности.

Конфликт интересов. Отсутствует.

Источник финансирования. Источники финансирования отсутствуют.

Информированное согласие. Все участники исследования подписали информированное согласие на участие и публикацию обезличенных данных, полученных в ходе исследования.

Информация об использовании генеративного искусственного интеллекта. Искусственный интеллект использован с целью проверки орфографии и редактирования речевых оборотов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Outerbridge RE. The etiology of chondromalacia patellae. *J Bone Joint Surg Br.* 1961;43-B:752–757. doi:10.1302/0301-620X.43B4.752.
- Insall JN, Falvo KA, Wise DW. Chondromalacia patellae: a prospective study. *J Bone Joint Surg Am.* 1976;58(1):1–8.
- Crossley KM, Stefanik JJ, Selfe J, et al. 2016 Patellofemoral pain consensus statement from the 4th International Patellofemoral Pain Research Retreat, Manchester. Part 1: Terminology, definitions, clinical examination, natural history, patellofemoral osteoarthritis and patient-reported outcome measures. *Br J Sports Med.* 2016;50(14):839–843. doi: 10.1136/bjsports-2016-096384.
- Altukhova AV, Kaurkin SN, Skvortsov DV, et al. Changes in gait biomechanics as functional symptom of chondromalacia patella. *Russian Open Med J.* 2021;10(2):e0213. doi:10.15275/rusomj.2021.0213.
- Fang T, Zhou X, Jin M, et al. Molecular mechanisms of mechanical load-induced osteoarthritis. *Int Orthop.* 2021;45(5):1125–1136. doi: 10.1007/s00264-021-04938-1.
- Макушин В.Д., Чергунов О.К., Карасева Т.Ю., и др. Хондромалация надколенника: современные концепции этиопатогенеза и лечения. *Гений ортопедии.* 1998;(4):92–96.
- Farrokhi S, Keyak JH, Powers CM. Individuals with patellofemoral pain exhibit greater patellofemoral joint stress: a finite element analysis study. *Osteoarthritis Cartilage.* 2011;19(3):287–294. doi: 10.1016/j.joca.2010.12.001.
- Thielen NGM, van der Kraan PM, van Caam APM. TGFβ/BMP Signaling Pathway in Cartilage Homeostasis. *Cells.* 2019;8(9):969. doi: 10.3390/cells8090969.
- Han Z, Wang K, Ding S, Zhang M. Cross-talk of inflammation and cellular senescence: a new insight into the occurrence and progression of osteoarthritis. *Bone Res.* 2024;12(1):69. doi: 10.1038/s41413-024-00375-z.
- Robinson WH, Lepus CM, Wang Q, et al. Low-grade inflammation as a key mediator of the pathogenesis of osteoarthritis. *Nat Rev Rheumatol.* 2016;12(10):580–592. doi: 10.1038/nrrheum.2016.136.
- De Roover A, Escribano-Núñez A, Monteagudo S, Lories R. Fundamentals of osteoarthritis: Inflammatory mediators in osteoarthritis. *Osteoarthritis Cartilage.* 2023;31(10):1303–1311. doi: 10.1016/j.joca.2023.06.005.
- Hunziker EB. Articular cartilage repair: basic science and clinical progress. A review of the current status and prospects. *Osteoarthritis Cartilage.* 2002;10(6):432–463. doi: 10.1053/joca.2002.0801.
- Носков С.М., Маргазин В.А., Башкина А.С. и др. Почему лечебная физкультура является лучшим методом лечения остеоартрита коленных суставов? *Пациентоориентированная медицина и фармация.* 2024;2(3):21–28. doi: 10.37489/2949-1924-0055.
- van der Heijden RA, Lankhorst NE, van Linschoten R, et al. Exercise for treating patellofemoral pain syndrome. *Cochrane Database Syst Rev.* 2015;1(1):CD010387. doi: 10.1002/14651858.CD010387.pub2.
- Brittberg M. Clinical articular cartilage repair—an up to date review. *Annals Joint.* 2018;3:94. doi: 10.21037/aoj.2018.11.03.
- Егизарян К.А., Лазишвили Г.Д., Храменкова И.В. и др. Алгоритм хирургического лечения больных с рассекающим остеохондритом коленного сустава. *Вестник РГМУ.* 2018;(2):77–83. doi: 10.24075/vrgmu.2018.020.
- Айрапетов Г.А., Загородний Н.В., Воротников А.А. Экспериментальный метод замещения костно-хрящевых дефектов суставов (ранние результаты). *Медицинский вестник Юга России.* 2019;10(2):71–76. doi: 10.21886/2219-8075-2019-10-2-71-76.
- Айрапетов Г.А., Воротников А.А., Коновалов Е.А. Методы хирургического лечения локальных дефектов гиалинового хряща крупных суставов (обзор литературы). *Гений ортопедии.* 2017;23(4):485–491. doi: 10.18019/1028-4427-2017-23-4-485-491.
- Куляба Т.А., Банцер С.А., Трачук П.А. и др. Эффективность различных хирургических методик при лечении локальных повреждений хряща коленного сустава (обзор литературы). *Травматология и ортопедия России.* 2020;26(3):170–181. doi: 10.21823/2311-2905-2020-26-3-170-181.
- Zuk PA, Zhu M, Mizuno H, et al. Multilineage cells from human adipose tissue: implications for cell-based therapies. *Tissue Eng.* 2001;7(2):211–228. doi: 10.1089/107632701300062859.
- Gimble JM, Katz AJ, Bunnell BA. Adipose-derived stem cells for regenerative medicine. *Circ Res.* 2007;100(9):1249–1260. doi: 10.1161/01.RES.0000265074.83288.09.
- Bourin P, Bunnell BA, Casteilla L, et al. Stromal cells from the adipose tissue-derived stromal vascular fraction and culture expanded adipose tissue-derived stromal/stem cells: a joint statement of the International Federation for Adipose Therapeutics and Science (IFATS) and the International Society for Cellular Therapy (ISCT). *Cytotherapy.* 2013;15(6):641–648. doi: 10.1016/j.jcyt.2013.02.006.
- Yi T, Song SU. Immunomodulatory properties of mesenchymal stem cells and their therapeutic applications. *Arch Pharm Res.* 2012;35(2):213–221. doi: 10.1007/s12272-012-0202-z.

24. Zhou J, Wang Y, Liu Y, et al. Adipose derived mesenchymal stem cells alleviated osteoarthritis and chondrocyte apoptosis through autophagy inducing. *J Cell Biochem.* 2019;120(2):2198-2212. doi: 10.1002/jcb.27530.
25. Lee WS, Kim HJ, Kim KI, et al. Intra-Articular Injection of Autologous Adipose Tissue-Derived Mesenchymal Stem Cells for the Treatment of Knee Osteoarthritis: A Phase IIb, Randomized, Placebo-Controlled Clinical Trial. *Stem Cells Transl Med.* 2019;8(6):504-511. doi: 10.1002/sctm.18-0122.
26. Смышляев И.А., Гильфанов С.И., Копылов В.А. и др. Оценка безопасности и эффективности внутрисуставного введения стромально-васкулярной фракции жировой ткани для лечения гонартроза: промежуточные результаты клинического исследования. *Травматология и ортопедия России.* 2017;23(3):17-31. doi: 10.21823/2311-2905-2017-23-3-17-31.
27. Kim KI, Kim MS, Kim JH. Intra-articular Injection of Autologous Adipose-Derived Stem Cells or Stromal Vascular Fractions: Are They Effective for Patients With Knee Osteoarthritis? A Systematic Review With Meta-analysis of Randomized Controlled Trials. *Am J Sports Med.* 2023;51(3):837-848. doi: 10.1177/03635465211053893.
28. Vargel İ, Tuncel A, Baysal N, et al. Autologous Adipose-Derived Tissue Stromal Vascular Fraction (AD-tSVF) for Knee Osteoarthritis. *Int J Mol Sci.* 2022;23(21):13517. doi: 10.3390/ijms232113517.
29. Tang X, Huang H, Hao L. Decadal analysis of efficacy and safety profiles of mesenchymal stem cells from varied sources in knee osteoarthritis patients: A systematic review and network meta-analysis. *Exp Gerontol.* 2024;192:112460. doi: 10.1016/j.exger.2024.112460.
30. Голубинская П.А., Ручко Е.С., Пикина А.С. и др. Особенности тканеинженерных и клеточных препаратов, применяемых для терапии поражений хрящевой ткани. *Гены и клетки.* 2025;20(1):5-17. doi: 10.17816/gc640858.
31. Зверев Г.М., Судницын А.С., Яковлев С.В., Сайфулин А.В. Использование модифицированного протокола механического получения стромально-васкулярной фракции в сочетании с плазмой, обогащённой тромбоцитами, при остеохондральных дефектах коленного сустава. *Гений ортопедии.* 2026;32(3): 340-349. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-3- 340-349.
32. Yokota N, Hattori M, Ohtsuru T, et al. Comparative clinical outcomes after intra-articular injection with adipose-derived cultured stem cells or noncultured stromal vascular fraction for the treatment of knee osteoarthritis. *Am J Sports Med.* 2019;47(11):2577-2583. doi: 10.1177/0363546519864359.
33. Bisicchia S, Bernardi G, Pagnotta SM, Tudisco C. Micro-fragmented stromal-vascular fraction plus microfractures provides better clinical results than microfractures alone in symptomatic focal chondral lesions of the knee. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2020;28(6):1876-1884. doi: 10.1007/s00167-019-05621-0.
34. Hudetz D, Borić I, Rod E, et al. The Effect of Intra-articular Injection of Autologous Microfragmented Fat Tissue on Proteoglycan Synthesis in Patients with Knee Osteoarthritis. *Genes (Basel).* 2017;8(10):270. doi: 10.3390/genes8100270.
35. Onoi Y, Hiranaka T, Nishida R, et al. Second-look arthroscopic findings of cartilage and meniscus repair after injection of adipose-derived regenerative cells in knee osteoarthritis: Report of two cases. *Regen Ther.* 2019;11:212-216. doi: 10.1016/j.reth.2019.07.010.
36. Michalek J, Vrablikova A, Darinskas A, et al. Stromal vascular fraction cell therapy for osteoarthritis in elderly: Multicenter case-control study. *J Clin Orthop Trauma.* 2019;10(1):76-80. doi: 10.1016/j.jcot.2018.11.010.
37. Russo A, Condello V, Madonna V, et al. Autologous and micro-fragmented adipose tissue for the treatment of diffuse degenerative knee osteoarthritis. *J Exp Orthop.* 2017;4(1):33. doi: 10.1186/s40634-017-0108-2.

Статья поступила 25.02.2026; одобрена после рецензирования 12.03.2026; принята к публикации 09.06.2026.

The article was submitted 25.02.2026; approved after reviewing 12.03.2026; accepted for publication 09.06.2026.

Информация об авторах:

Глеб Михайлович Зверев — врач — травматолог-ортопед, Dr.zverev@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0001-9097-0144>;

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

Сергей Витальевич Яковлев — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед;

Александр Валерьевич Сайфулин — врач;

Шота Александрович Моев — врач — травматолог-ортопед.

Information about the authors:

Gleb M. Zverev, MD — Orthopaedic Surgeon, Dr.zverev@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0001-9097-0144>;

Anatolii S. Sudnitsyn — Candidate of Medical Sciences, Orthopaedic Surgeon, Head of the Laboratory, <https://orcid.org/0000-0002-2602-2457>;

Sergey V. Yakovlev — Candidate of Medical Sciences, Orthopaedic Surgeon;

Alexander V. Saifulin — MD;

Shota A. Moev — Orthopaedic Surgeon.

Вклад автора:

Зверев Г.М. — лечение пациентов, сбор, анализ и интерпретация данных, написание текста статьи, разработка концепции, проведение исследования, утверждение окончательного варианта рукописи для публикации.

Судницын А.С. — написание текста статьи, разработка концепции, проведение исследования, сбор, анализ и интерпретация данных, утверждение окончательного варианта рукописи для публикации.

Яковлев С.В. — написание текста статьи, утверждение окончательного варианта рукописи для публикации.

Сайфулин А.В. — сбор, анализ и интерпретация данных.

Моев Ш.А. — лечение пациентов, сбор, анализ и интерпретация данных.

Original article

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2026-32-4-479-487>



Effects of Glucosamine-Chondroitin, Chitosan, and Phytoestrogen on Knee Osteoarthritis Inflammatory and Cartilage Degeneration Biomarkers and Clinical Symptoms in Postmenopausal Women

P. Kermawan^{1✉}, I.W.P.S. Yasa², M.B. Karna³, S. Herawati², I.K. Suyasa³, N.L.K.A. Arsani¹, K.E. Calisto⁴, K.S.S. Yogananda⁴, K.S.S. Wiwekananda⁴, N.S.N. Wijaya², I.M. Jawi²

¹ Universitas Pendidikan Ganesha, Bali, Indonesia

² Udayana University, Bali, Indonesia

³ Ngoerah General Hospital, Udayana University, Bali, Indonesia

⁴ Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

Corresponding author: Putu Kermawan, putukermawan@gmail.com

Abstract

Introduction Knee osteoarthritis (OA) is a progressive disease causing pain and dysfunction in postmenopausal women.

Purpose This study aimed to evaluate the therapeutic efficacy of a combination of glucosamine-chondroitin, chitosan, and phytoestrogen with paracetamol compared to paracetamol alone in postmenopausal women with knee osteoarthritis.

Materials and Methods A double-blind randomized controlled trial was conducted on 60 postmenopausal women with Kellgren – Lawrence grade II–III knee osteoarthritis. A total of 60 patients were included in this study and divided into treatment and control groups with a 1:1 ratio. The mean age of patients was 59.77 years (± 2.99) while the control group had a mean age of 60.4 years (± 3.21), there was no significant difference ($p = 0.43$). Patients were randomly assigned into two groups: the treatment group ($n = 30$), which received glucosamine-chondroitin, chitosan, and phytoestrogen in combination with paracetamol, and the control group ($n = 30$), which received paracetamol alone. The levels of soluble interleukin-6 receptor (sIL-6R), interleukin-10 (IL-10), cartilage oligomeric matrix protein (COMP), as well as Visual Analog Scale (VAS) and Western Ontario and McMaster Universities Osteoarthritis Index (WOMAC) scores were measured at baseline and after two weeks of treatment.

Results After the pharmacological intervention, the treatment group showed significant reductions in WOMAC score, COMP, and sIL-6R compared to the control group ($p < 0.01$). Both groups had increased IL-10 levels following treatment, but the increase was greater in the control group.

Discussion The combination therapy demonstrated improvement in joint function and a reduction in inflammatory and cartilage degeneration markers. These findings support the anti-inflammatory and chondroprotective potential of natural compounds in the management of knee osteoarthritis.

Conclusion The combination of glucosamine-chondroitin, chitosan, phytoestrogen, and paracetamol demonstrated superior short-term effects in reducing inflammatory and cartilage degeneration biomarkers and improving clinical symptoms in postmenopausal women with grade II–III knee osteoarthritis compared with paracetamol alone.

Keywords: knee osteoarthritis, postmenopausa, glucosamine-chondroitin, chitosan, phytoestrogen

Acknowledgements The authors sincerely thank all the patients who participated in this study. We also acknowledge Fandi Hendrawan for his valuable contribution to data analysis.

For citation: Kermawan P, Yasa IWPS, Karna MB, Herawati S, Suyasa IK, Arsani NLKA, Calisto KE, Yogananda KSS, Wiwekananda KSS, Wijaya NSN, Jawi IM. Effects of Glucosamine-Chondroitin, Chitosan, and Phytoestrogen on Knee Osteoarthritis Inflammatory and Cartilage Degeneration Biomarkers and Clinical Symptoms in Postmenopausal Women. *Genij Ortopedii*. 2026;32(4):479-487. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-4-479-487.



Влияние глюкозамина-хондроитина, хитозана и фитоэстрогенов на воспалительные процессы, биомаркеры дегенерации хряща и клинические симптомы при остеоартрозе коленного сустава у женщин в постменопаузе

P. Kermawan^{1✉}, I.W.P.S. Yasa², M.B. Karna³, S. Herawati², I.K. Suyasa³, N.L.K.A. Arsani¹, K.E. Calisto⁴, K.S.S. Yogananda⁴, K.S.S. Wiwekananda⁴, N.S.N. Wijaya², I.M. Jawi²

¹ Universitas Pendidikan Ganesha, Bali, Indonesia

² Udayana University, Bali, Indonesia

³ Ngoerah General Hospital, Udayana University, Bali, Indonesia

⁴ Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

Автор, ответственный за переписку: Putu Kermawan, putukermawan@gmail.com

Аннотация

Введение. Остеоартроз коленного сустава (ОА) — прогрессирующее заболевание, вызывающее боль и дисфункцию коленного сустава, особенно у женщин в постменопаузе.

Цель работы — оценить терапевтическую эффективность комбинации глюкозамина-хондроитина, хитозана, фитоэстрогена и парацетамола по сравнению с применением только парацетамола у женщин в постменопаузе с остеоартрозом коленного сустава.

Материалы и методы. Проведено двойное слепое рандомизированное контролируемое исследование с участием 60 женщин в постменопаузе с остеоартрозом коленного сустава II–III степени по Келлгрэну – Лоуренсу, которые случайным образом распределены на две группы: основную ($n = 30$) — пациентки получали глюкозамин-хондроитин, хитозан и фитоэстроген в сочетании с парацетамолом, и контрольную группу ($n = 30$) — пациентки получали только парацетамол. Возраст пациенток основной группы — $(59,77 \pm 2,99)$ г., контрольной группы — $(60,4 \pm 3,21)$ г., статистически значимых различий не выявлено ($p = 0,43$). Уровни растворимого рецептора интерлейкина-6 (sIL-6R), интерлейкина-10 (IL-10), олигомерного матриксного белка хряща (COMP), а также показатели визуальной аналоговой шкалы (ВАШ) и индекса остеоартрита по системе Western Ontario and McMaster Universities Osteoarthritis Index (WOMAC) измеряли до лечения и после двух недель лечения.

Результаты. После фармакологического вмешательства в основной группе наблюдали значимое снижение показателей WOMAC, COMP и sIL-6R по сравнению с контрольной группой ($p < 0,01$). В обеих группах после лечения зарегистрировано повышение уровня IL-10, более выраженное в контрольной группе.

Обсуждение. Комбинированная терапия продемонстрировала улучшение показателей функции сустава и снижение маркеров воспаления и дегенерации хряща. Эти данные подтверждают противовоспалительный и хондропротективный потенциал природных соединений в лечении пациентов с остеоартрозом коленного сустава.

Заключение. Использование комбинации глюкозамин-хондроитина, хитозана, фитоэстрогена и парацетамола у женщин в постменопаузе с остеоартритом коленного сустава II–III степени продемонстрировало лучшие краткосрочные результаты снижения показателей биомаркеров воспаления и дегенерации хряща, а также улучшение клинических симптомов по сравнению с использованием одного парацетамола.

Ключевые слова: остеоартроз коленного сустава, постменопауза, глюкозамин-хондроитин, хитозан, фитоэстроген

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность всем пациентам, любезно принявшим участие в данном исследовании. Мы также выражаем благодарность Фанди Хендравану за его ценный вклад в анализ данных.

Для цитирования: Kermawan P., Yasa I.W.P.S., Karna M.B., Herawati S., Suyasa I.K., Arsani N.L.K.A., Calisto K.E., Yogananda K.S.S., Wiwekananda K.S.S., Wijaya N.S.N., Jawi I.M. Влияние глюкозамина-хондроитина, хитозана и фитоэстрогенов на воспалительные процессы, биомаркеры дегенерации хряща и клинические симптомы при остеоартрозе коленного сустава у женщин в постменопаузе. *Гений ортопедии*. 2026;32(4):479-487. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-4-479-487.

© Kermawan P., Yasa I.W.P.S., Karna M.B., Herawati S., Suyasa I.K., Arsani N.L.K.A., Calisto K.E., Yogananda K.S.S., Wiwekananda K.S.S., Wijaya N.S.N., Jawi I.M., 2026

INTRODUCTION

Knee osteoarthritis (OA) is a progressive degenerative disease with an inflammatory condition of the knee joint that contributes quite a lot to the disruption of daily activities. In 2019, approximately 528 million people worldwide suffered from OA, an increase of 113 % since 1990 [1]. The progression of OA causes chronic severe pain. At some point, it may reduce the knee function, limiting the activity of 80 % of OA patients. Moreover, 25 % of patients may have a severe disability that affects their quality of life [2].

Osteoarthritis is largely driven by an imbalance between pro- and anti-inflammatory cytokines, with menopause women being more vulnerable due to estrogen depletion affecting chondrocyte metabolism. While NSAIDs are commonly used to relieve symptoms, they do not halt disease progression. This may be due to the involvement of signaling pathways like NF- κ B and MAPKs, which contribute to OA progression through mechanisms that NSAIDs do not target [3].

The goals of managing OA are to reduce pain, decrease disability, improve functional outcomes and quality of life. Knee OA treatment typically starts with conservative approaches and advances to surgery if needed. While medications may slow disease progression, no disease-modifying treatment has been proven effective. Anti-inflammatory drugs remain the primary therapy, though they carry risks of gastrointestinal side effects [4, 5]. NSAIDs can cause ulceration in the patient's stomach or intestines, especially if the patient takes them for a long time or in large doses. In addition, paracetamol can also be used for OA treatment and has fewer side effects, but its effectiveness is still lower than of other NSAIDs [6].

Glucosamine-chondroitin, chitosan, and phytoestrogens are commonly used as alternative treatments for osteoarthritis due to their anti-inflammatory and potential chondroprotective properties. While they help support cartilage health and have minimal toxicity, their direct effectiveness in treating osteoarthritis remains uncertain and requires further research [7–10]. Glucosamine-chondroitin, chitosan, and phytoestrogens are used as alternative treatments to avoid NSAID side effects. While glucosamine-chondroitin support cartilage health and are considered safe, their direct effect on osteoarthritis remains unclear and needs further research [4]. Therefore, the researchers aimed to prove the effect of glucosamine-chondroitin sulfate, chitosan, and phytoestrogen on identifiable markers in knee OA. Currently, there are few studies that discuss directly the effect of glucosamine-chondroitin, chitosan, and phytoestrogen combined with paracetamol on OA markers in joint fluid, including soluble interleukin-6 receptors (sIL-6R), interleukin-10 (IL-10) and Cartilage Oligomeric Matrix Protein (COMP) as well as visual analog scale (VAS) values and Western Ontario and McMaster Universities Osteoarthritis Index (WOMAC) scores as a standard of pain measurement in post-menopausal patients with knee OA.

Purpose This study specifically aimed to evaluate the therapeutic efficacy of a combination therapy consisting of glucosamine-chondroitin, chitosan, and phytoestrogen with paracetamol and compare it to paracetamol alone, in reducing inflammatory biomarkers (sIL-6R, IL-10, and COMP levels) and clinical symptoms severity (VAS and WOMAC scores) in postmenopausal women with knee osteoarthritis.

MATERIALS AND METHODS

Type of study and study design

This study was a double-blind randomized controlled trial. The study subjects were randomly allocated into 2 groups using the block randomization method by pharmacist as an independent third party. The same number of participants in each group was ensured. The treatment group received a combination of glucosamine 31.5 mg, chondroitin 135 mg, chitosan 29.8 mg, and phytoestrogen 1.5 mg once daily for two weeks in addition to paracetamol intake 500 mg three times daily for two weeks. The control group received paracetamol 500 mg three times daily for two weeks with placebo supplementation. The levels of sIL-6R, IL-10, and COMP in synovial fluid, as well as VAS scores and WOMAC scores, were examined before pharmacological intervention and after 2 weeks of pharmacological intervention. After the randomization process, participants were assigned to either the treatment or control group by the pharmacist, while both the researchers and participants remained blinded to the group allocation throughout the study period. All data were collected at Karya Darma Husada General Hospital (RSU), Buleleng, Bali. The research was conducted in the laboratory of FK UNDIKSHA, Bali, in October-December 2024.

Patients and criteria

The sample inclusion criteria in this study are as follows: 1) Post-menopausal women, diagnosed with grade II or III knee OA with effusion; 2) no deformity; 3) body mass index < 30 kg/m²; 4) who have not received anti-inflammatory pharmacological therapy in the last 2 weeks and 5) had never received operative therapy. The exclusion criteria are: 1) patients with a history of knee trauma; 2) history of knee infection; 3) history of hysterectomy. The sample size was calculated using the Charan & Biswas formula [11]:

$$n = \frac{2SD^2(Z_{\alpha/2} + Z_{\beta})^2}{d^2}.$$

The standard deviation (SD) was set at 20, reflecting the variability within the population. A significance level of 5 % ($\alpha = 0.05$) was adopted, corresponding to a Z-value of 1.96 for a two-tailed test. To achieve a statistical power of 80 %, the β error probability was set at 0.20, corresponding to a Z_{β} of 0.84. The effect size (d) was determined to be 15. Standard deviation and effect size were included from the previous study by A.M.T. Lubis et al. [12]. These parameters ensure an adequately powered study. The minimum sample size for our study is 28 samples per group:

$$n = \frac{2 \cdot 20^2 (1.96 + 0.84)^2}{15^2}; n = 27.87.$$

Data collection and study variables

The levels of sIL-6R, IL-10, and COMP were measured from the synovial fluid of a single predefined index knee per patient using the enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) method by the laboratory technician. According to the manufacturer's protocol, the sIL-6R levels were measured using the Biotinylated Human sIL-6R antibody ELISA Kit (BT LAB, Zhejiang, China, E0090Hu). The IL-10 levels were measured using the Biotinylated Human IL-10 antibody ELISA Kit (BT LAB, Zhejiang, China, E0102Hu). The COMP levels were measured using the Biotinylated Human COMP antibody ELISA Kit (BT LAB, Zhejiang, China, E1486Hu). Synovial fluid samples were obtained by aspirating 1 ml of synovial fluid from a single predefined index knee per patient at baseline and after 2 weeks of intervention. Synovial fluid sampling is done with an aseptic technique. Data collection for VAS scores and WOMAC scores was carried out by interviewing patients directly before and after 2 weeks of pharmacological intervention.

Study outcomes

The outcome of this study was the significance of glucosamine-chondroitin, chitosan, and phytoestrogen with paracetamol in improving sIL-6R, IL-10, COMP levels, VAS, and WOMAC scores compared to the paracetamol group. There were no changes to the primary or secondary outcomes after the trial commenced in the study.

Statistical analysis

Laboratory variables such as sIL-6R, IL-10, and COMP were presented in ratios, while clinical variables such as VAS and WOMAC scores were presented in intervals. Each variable was analyzed for mean, median, mode, and standard deviation. Normality and homogeneity tests were performed using the Shapiro-Wilk test and Levene test. The difference between post-therapy and baseline value of sIL-6R, IL-10, and COMP was analyzed with a dependent t-test. The difference between the control and experimental groups following the therapy was analyzed with an independent t-test. Path analysis was performed to explore the association and interaction between sIL-6R, IL-10, and COMP levels after normality test, heteroscedasticity, and autocorrelation between variables had been excluded. Heteroscedasticity between variables was explored with the Breusch-Pagan test while autocorrelation was analyzed with the Durbin-Watson test. Significance level was set at 5 %. Data analysis was performed using SPSS by an independent statistician, who were blinded to the group assignments.

Ethical principles

The authors are accountable for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved. The study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki and its subsequent amendments. The study was approved by the Research Ethics Committee of the Faculty of Medicine, Universitas Udayana (0340/UN14.2.2.VII.14/LT/2025), and informed consent was obtained from all study participants.

RESULTS

A total of 93 participants were assessed for eligibility in this study. Of those, 33 were excluded, 29 participants did not meet the inclusion criteria and 4 declined to participate. The remaining 60 participants were randomized equally into two groups. In the treatment group, all 30 participants received the allocated pharmacological intervention consisting of glucosamine-chondroitin, chitosan, phytoestrogen, and paracetamol according to the study protocol, and none discontinued treatment or were lost to follow-up. All participants in this group were included in the primary outcome analysis. In the control group, all 30 participants received paracetamol therapy with placebo supplementation according to the study protocol. However, there were no discontinuations or losses to follow-up in that group either, and all 30 participants were also included in the primary outcome analysis. In total, there was a 100 % follow-up and analysis rate for both groups. Participants were recruited between October and December 2024, with follow-ups conducted throughout the same period.

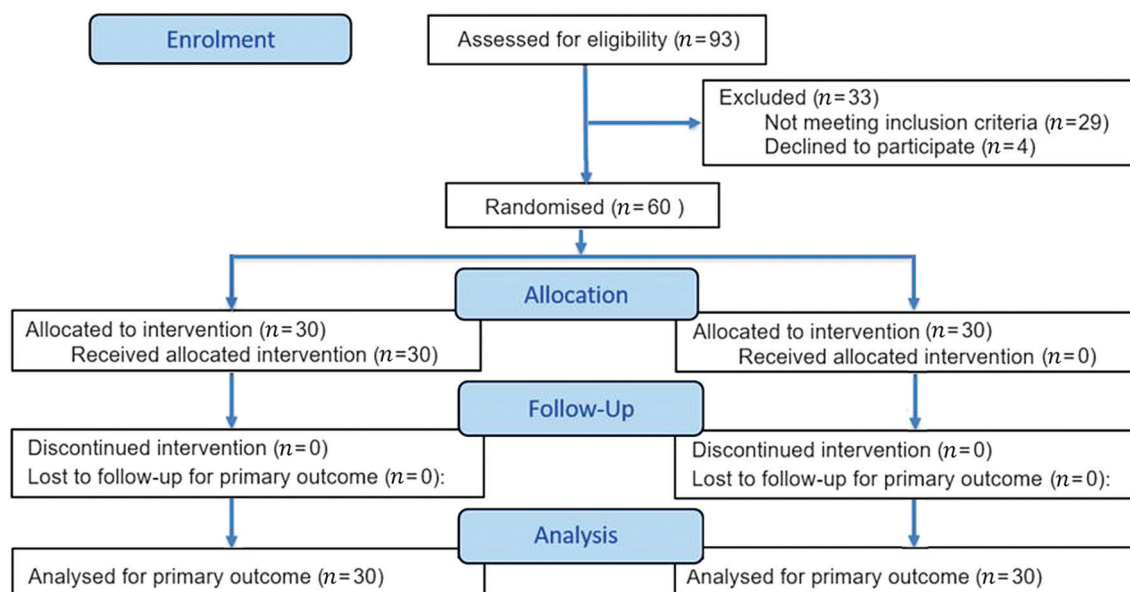


Fig. 1. CONSORT trial diagram

All participants who were randomized, met the eligibility criteria, provided informed consents, and completed the pharmacological intervention and a follow-up as scheduled, resulting in 100 % retention. The trial was completed as planned without early termination. Both treatment and control groups continued receiving standard non-pharmacological management for knee osteoarthritis throughout the study period, and no additional pharmacological treatments were permitted. Concomitant care was monitored for consistency, and no adverse events or harms were reported. Both treatments were administered by pharmacists with high adherence, and no deviations from the study protocol occurred, ensuring high fidelity in the pharmacological intervention delivery.

Baseline characteristics

After screening the patients who met the study criteria, a total of 60 patients were divided into treatment and control groups with a 1:1 ratio. Data distribution with the Shapiro-Wilk test found that age, BMI, VAS, and WOMAC data were distributed according to the Gaussian graph while COMP, sIL-6R, and IL-10 showed non-parametric distribution. The significance value of each variable can be seen in Table 1.

Table 1

Data distribution test

Variables		Shaphiro – Wilk Test (<i>p</i> -value)		Levene Test (<i>p</i> -value)
		Treatment Group	Control Group	
Age (years)		0.315	0.064	0.471
BMI (kg/m ²)		0.688	0.912	0.622
VAS	Before pharmacological intervention	0.212	0.289	0.289
	After pharmacological intervention	0.54	0.174	0.174
WOMAC	Before pharmacological intervention	0.311	0.41	0.122
	After pharmacological intervention	0.562	0.355	0.931
COMP (ng/mL)	Before pharmacological intervention	0.09	< 0.01	0.228
	After pharmacological intervention	0.809	< 0.01	0.014
sIL-6R (ng/mL)	Before pharmacological intervention	< 0.01	< 0.01	0.492
	After pharmacological intervention	< 0.01	< 0.01	0.037
IL-10 (ng/mL)	Before pharmacological intervention	< 0.01	< 0.01	0.852
	After pharmacological intervention	< 0.01	< 0.01	0.107
	Age (years)	0.315	0.064	0.471
BMI (kg/m ²)		0.688	0.912	0.622

The baseline data of the 60 patients after being divided into treatment and control groups can be seen in Table 2. In the treatment group, the mean age of patients was 59.77 years (± 2.99) while the control group had a mean age of 60.4 years (± 3.21). Although the age in the control group was older, there was no significant difference ($p = 0.43$). The BMI in the treatment and control groups were 20.53 kg/m² (± 2.25) and 20.69 kg/m² (± 2.33),

respectively. There was no significant difference in the statistical test ($p = 0.78$). There was also no difference in VAS scores before pharmacological intervention between the two groups (treatment 6.65 ± 0.69 vs. control 6.69 ± 0.56 ; $p = 0.79$). WOMAC score was higher in the control group (58.17 ± 5.59) compared to the treatment group (56.07 ± 3.43) and was tested on statistical tests ($p = 0.047$). The sIL-6R value between groups had a significant difference ($p < 0.01$). COMP and IL-10 between groups showed no difference.

Table 2

Baseline data of patient characteristics before pharmacological intervention

Variables	Treatment Group	Control Group	<i>p</i> -value
Age, mean $\pm$ SD (years)	59.767 $\pm$ 2.991	60.4 $\pm$ 3.212	0.43 ^a
BMI, mean $\pm$ SD (kg/m ²)	20.53 $\pm$ 2.249	20.689 $\pm$ 2.328	0.78 ^a
VAS, mean $\pm$ SD	6.647 $\pm$ 0.694	6.69 $\pm$ 0.56	0.791 ^a
WOMAC, mean $\pm$ SD	56.07 $\pm$ 3.433	58.17 $\pm$ 5.592	0.047 ^a
COMP, median (IQR) (ng/mL)	108.6 (74.6–177.1)	95.6 (53.1–122.6)	0.096 ^b
sIL-6R, median (IQR) (ng/mL)	66.33 (35.5–107.167)	68 (33–129.67)	< 0.01 ^b
IL-10, median (IQR) (ng/mL)	20.4 (9.4–56.4)	26.4 (17.4–77.9)	0.28 ^b

Note: ^a – independent T-test, ^b – Mann – Whitney test

Changes in VAS values and WOMAC scores

The results show that no statistically significant VAS scores in the treatment group compared to the control group (MD (–0.27); 95 % CI (–0.58 – 0.03), ($p = 0.78$)). The WOMAC scores were statistically significant lower in the treatment group than those in the control group (MD (–4.87); 95 % CI (–7.56) – (–2.08); $p = 0.01$) (Table 3).

Table 3

Changes in VAS scores and WOMAC, COMP, sIL-6R, and IL-10 after pharmacological intervention

Variables	Treatment Group	Control Group	Mean difference (95 % CI)	<i>p</i> -value
VAS, mean $\pm$ SD	6.3 $\pm$ 0.6558	6.653 $\pm$ 0.514	–0.273 (–0.578; 0.031)	0.78 ^a
WOMAC, mean $\pm$ SD	52.17 $\pm$ 2.991	60.4 $\pm$ 5.592	–4.867 (–7.565; –2.077)	0.01 ^a
COMP, median (IQR) (ng/mL)	85.6 (62.6–106.6)	173.6 (132.6–246.1)	N/A*	< 0.01 ^b
sIL-6R, median (IQR) (ng/mL)	46.33 (28.83–103.83)	149.67 (68.83–313.83)	N/A*	< 0.01 ^b
IL-10, median (IQR) (ng/mL)	34.4 (18.4–65.9)	133.4 (59.9–271.9)	N/A*	< 0.01 ^b

Note: ^a – independent T-test, ^b – Mann – Whitney test

Changes in sIL-6R, IL-10, and COMP

The level of sIL-6R, IL-10, and COMP in the treatment group were lower than the control group and statistically significant between the group ($p < 0.01$, $p < 0.01$, $p < 0.01$). The results of the analysis of COMP, sIL-6R, and IL-10 values can be seen in Table 3.

Pathway analysis of sIL-6R, IL-10, and COMP

Path analysis was obtained after data cleaning by minimizing outliers. Two pathways were obtained where IL-10 affected COMP by modulating sIL-6R and IL-10 directly modulated COMP (Fig. 2). However, the IL-10 receptor pathway with COMP showed no significance (Table 4). In the sIL-6R-mediated pathway, Sobel test results showed no significance (p -value = 0.14).

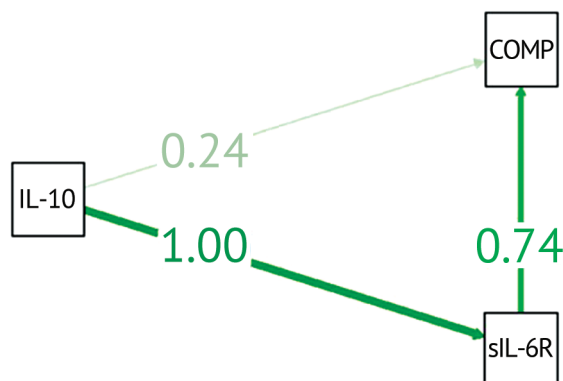


Fig. 2. Pathway analysis of sIL-6R, IL-10, and COMP

Table 4

Changes in VAS scores and WOMAC, COMP, sIL-6R, and IL-10 after pharmacological intervention

	Estimation Coefficient	Standardized Coefficient	Standard Error	<i>p</i> -value
Direct IL-10 and COMP pathway analysis				
Intercept	–9.57984	NA	4.1409	0,026
IL-10	1.35689	0.99672	0.01812	< 0,01
Pathway analysis of IL-10 with sIL-6R-mediated COMP				
Intercept	41.4338	NA	9.9816	<0,01
IL-10	0.3174	0.2434	0.5042	0,533
sIL-6R	0.7083	0.7394	0.3704	0,064

DISCUSSION

This study demonstrated that the combination of glucosamine-chondroitin, chitosan, and phytoestrogen combined with paracetamol improved clinical symptoms, reduced inflammatory and cartilage degradation markers in postmenopausal women with knee osteoarthritis. The reductions in WOMAC scores, COMP, and sIL-6R levels in the treatment group indicate potential chondroprotective and anti-inflammatory effects. Although IL-10 levels increased in both groups, the greater rise in the control group may reflect a compensatory response to inflammation rather than a direct treatment effect.

The combined pharmacological intervention decreased sIL-6R levels by a significant amount, which indicated an anti-inflammatory effect via NF- κ B pathway inhibition. Chitosan, the primary constituent of shrimp shell extracts, has also been reported to inhibit pro-inflammatory cytokines TNF- α , IL-6, and IL-1 β , inhibiting inflammation and cartilage degradation [13–15]. Similarly, phytoestrogens inhibit inflammatory activity by inhibiting mainly JAK/STAT3 activation, which helps in inhibiting inflammatory responses [16–18]. This highlights the therapeutic potential of natural molecules in regulating OA pathogenesis and inhibiting disease progression.

The anti-inflammatory cytokine IL-10 was elevated in the control group compared with the treatment group. In previous studies, the cytokine IL-10 is shown to be a very common anti-inflammatory marker [19]. Glucosamine-chondroitin compounds inhibit the activation of NF- κ B, a transcription factor involved in inflammatory response, which in turn may increase the expression of IL-10 [20]. The chitosan and phytoestrogen compounds contained may also increase IL-10 expression through inhibition of the NF- κ B pathway [21,22]. This could be a compensatory response to inflammation, a phenomenon seen before in aging subjects. In older subjects, increased IL-10 could be secondary to a response against increased inflammatory activity and not because of the treatment [23–26]. This has been seen in other inflammatory conditions and suggests that the role of IL-10 in OA pathophysiology is complex and further studies must be done in order to be able to categorically state its role in disease progression and symptom relief.

This research also demonstrated that the treatment group experienced decreased cartilage oligomeric matrix protein (COMP) levels, a cartilage degradation marker. This concurs with the current body of evidence indicating that chitosan and estrogen analogs are chondroprotective in enhancing type II collagen synthesis and inhibition of matrix metalloproteinase (MMP) activity [27]. Chitosan also enhances extracellular matrix stability and inhibits excessive activation of cartilage tissue degradation [10]. Additionally, estrogen enhances cartilage homeostasis via the ERK-mTOR pathway and could inhibit chondrocyte apoptosis and joint function [28–30]. The inhibition of COMP in the treatment group suggests the therapeutic value of these compounds to slow the progression of OA and preserve cartilage integrity in the long term.

In this study, pain severity assessed with VAS did not show a statistically significant difference between the two groups. This results in line with previous meta-analyses showing modest efficacy of glucosamine-chondroitin and phytoestrogens for pain relief [31–34]. OA pain sensation is regulated by various parameters like inflammatory mediators, joint damage of structure, and patients' tolerance to pain. The variability of the pain effect could be due to the nature of pain, including OA with mechanical and biochemical factors [35]. Further studies could explore other formulations or combination regimens to maximize the analgesic effect of these drugs.

Clinical symptoms were assessed using WOMAC scores, which showed significant improvement in the treatment group. This is consonant with earlier studies highlighting the superiority of glucosamine, chitosan, and phytoestrogens for functional benefit [36–38]. Reduction in WOMAC scores demonstrates that these molecules also hold potential in promoting mobility and activities of daily living in patients with OA. Rehabilitation of joint function is also directly associated with maximizing the quality of life in postmenopausal females, who are also predisposed to disability secondary to OA by virtue of hormonal changes and aging cartilaginous degeneration.

Glucosamine-chondroitin, chitosan, and phytoestrogen possess anti-inflammatory and chondroprotective properties and are useful to joint function in postmenopausal women with knee OA. This study employs a new panel of markers, sIL-6R, IL-10, and COMP. Pathway analysis was also conducted to explain the interventional effects and interaction between these markers. A double-blind randomized controlled trial (RCT) design is additionally used for further minimizing bias and hence reinforcing the reliability and solidity of the findings.

Paracetamol was included as standard symptomatic therapy because previous meta-analyses demonstrated its efficacy in mild to moderate knee OA pain and its favorable safety profile compared with long-term NSAID use [39]. Meanwhile, glucosamine-chondroitin, chitosan, and phytoestrogens were selected based on their potential anti-inflammatory and chondroprotective properties [7–10]. To our knowledge, studies evaluating the combined use of these agents remain limited. Therefore, this study provides preliminary evidence that the combination therapy may contribute to short-term reduction of inflammatory activity and clinical symptom severity, although no conclusions regarding disease-modifying effects can yet be made.

This study had several limitations, including the relatively small sample size and short follow-up duration, which may limit generalizability and prevent evaluation of long-term outcomes. In addition, the study relied primarily on clinical scores and biomarker analysis without radiographic or MRI assessment to evaluate structural cartilage changes in knee osteoarthritis.

CONCLUSION

Glucosamine-chondroitin, chitosan, and phytoestrogen combined with paracetamol can reduce the inflammatory process, as seen from sIL-6R; reduce the process of joint cartilage destruction, as seen from COMP; and improve joint functionality studied at short-term, as seen from significantly lower WOMAC scores compared to the control group. However, the VAS score had comparable outcomes between two groups. On the other hand, the treatment group showed a decrease in anti-inflammatory activity through a significant increase in IL-10, but lower than the control group. In contrast to the control group, the treatment group experienced chronically high IL-10 levels accompanied by substantially lower levels of IL-6, which suggests that glucosamine-chondroitin, chitosan, and phytoestrogen play a role in assisting in anti-inflammatory functions through IL-10 pathways. Thus, there is a need for more studies on the anti-inflammatory pathway of glucosamine-chondroitin, chitosan, and phytoestrogen.

Conflict of Interest. The authors declare no conflict of interest.

Funding. This study did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Ethical Principles. The study was approved by the Research Ethics Committee of the Faculty of Medicine, Universitas Udayana (0340/UN14.2.2.VII.14/LT/2025), and informed consent was obtained from all participants.

Informed Consent. Statement Informed consent was obtained from all participants.

REFERENCES

1. WHO. *Osteoarthritis*. 2023. Available from: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/osteoarthritis>. Accessed Sept 19, 2025.
2. WHO. *Menopause*. 2022. Available from: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/menopause>. Accessed Sept 19, 2025.
3. Primorac D, Molnar V, Maticić V, et al. Comprehensive Review of Knee Osteoarthritis Pharmacological Treatment and the Latest Professional Societies' Guidelines. *Pharmaceuticals (Basel)*. 2021;14(3):205. doi: 10.3390/ph14030205.
4. Hsu H, Siwiec RM. Knee Osteoarthritis. In: *StatPearls [Internet]*. Treasure Island (FL): StatPearls Publ.; 2025. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK507884/>. Accessed Sept 19, 2025.
5. Arellano RD, Aguilar LS, Argüello R, et al. Cartilage Oligomeric Matrix Protein Levels in Synovial Fluid in Patients With Primary Knee Osteoarthritis And Healthy Controls: A Preliminary Comparative Analysis With Serum Cartilage Oligomeric Matrix Protein. *Arch Rheumatol*. 2017;32(3):189-196. doi: 10.5606/ArchRheumatol.2017.6220.
6. Boureau F, Schneid H, Zeghari N, et al. The IPSO study: ibuprofen, paracetamol study in osteoarthritis. A randomised comparative clinical study comparing the efficacy and safety of ibuprofen and paracetamol analgesic treatment of osteoarthritis of the knee or hip. *Ann Rheum Dis*. 2004;63(9):1028-1034. doi: 10.1136/ard.2003.011403.
7. Kermawan P, Karna MB, Jawi IM, et al. Potential use of glucosamine, chondroitine, chitosan and phytoestrogen for patients with osteoarthritis. *Int J Res Med Sci*. 2022;10(10):2316-2319. doi: 10.18203/2320-6012.ijrms20222543.
8. Bannwarth B, Péhourcq F. Pharmacologic basis for using paracetamol: pharmacokinetic and pharmacodynamic issues. *Drugs*. 2003;63 Spec No 2:5-13. (In French)
9. Kirkham SG, Samarasinghe RK. Review article: Glucosamine. *J Orthop Surg (Hong Kong)*. 2009;17(1):72-76. doi: 10.1177/230949900901700116.
10. Oprenyeszk F, Chausson M, Maquet V, et al. Protective effect of a new biomaterial against the development of experimental osteoarthritis lesions in rabbit: a pilot study evaluating the intra-articular injection of alginate-chitosan beads dispersed in an hydrogel. *Osteoarthritis Cartilage*. 2013;21(8):1099-1107. doi: 10.1016/j.joca.2013.04.017.
11. Charan J, Biswas T. How to calculate sample size for different study designs in medical research? *Indian J Psychol Med*. 2013;35(2):121-126. doi: 10.4103/0253-7176.116232.
12. LubisAMT, SiagianC, WonggokusumaE, et al. Comparison of Glucosamine-Chondroitin Sulfate with and without Methylsulfonylmethane in Grade I-II Knee Osteoarthritis: A Double Blind Randomized Controlled Trial. *Acta Med Indones*. 2017;49(2):105-111.
13. Kantor ED, Lampe JW, Navarro SL, et al. Associations between glucosamine and chondroitin supplement use and biomarkers of systemic inflammation. *J Altern Complement Med*. 2014;20(6):479-485. doi: 10.1089/acm.2013.0323.
14. Lecomte S, Demay F, Ferrière F, Pakdel F. Phytochemicals Targeting Estrogen Receptors: Beneficial Rather Than Adverse Effects? *Int J Mol Sci*. 2017;18(7):1381. doi: 10.3390/ijms18071381.
15. Tu J, Xu Y, Xu J, Ling Y, Cai Y. Chitosan nanoparticles reduce LPS-induced inflammatory reaction via inhibition of NF-κB pathway in Caco-2 cells. *Int J Biol Macromol*. 2016;86:848-856. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2016.02.015.
16. Chavda VP, Chaudhari AZ, Balar PC, et al. Phytoestrogens: Chemistry, potential health benefits, and their medicinal importance. *Phytother Res*. 2024;38(6):3060-3079. doi: 10.1002/ptr.8196.
17. Christiansen BA, Bhatti S, Goudarzi R, Emami S. Management of Osteoarthritis with Avocado/Soybean Unsaponifiables. *Cartilage*. 2015;6(1):30-44. doi: 10.1177/1947603514554992.
18. Dresler S, Wójciak-Kosior M, Sowa I, et al. Effect of Long-Term Strontium Exposure on the Content of Phytoestrogens and Allantoin in Soybean. *Int J Mol Sci*. 2018;19(12):3864. doi: 10.3390/ijms19123864.
19. Couper KN, Blount DG, Riley EM. IL-10: the master regulator of immunity to infection. *J Immunol*. 2008;180(9):5771-5777. doi: 10.4049/jimmunol.180.9.5771.
20. Zhang GX, Yu S, Gran B, Rostami A. Glucosamine abrogates the acute phase of experimental autoimmune encephalomyelitis by induction of Th2 response. *J Immunol*. 2005;175(11):7202-7208. doi: 10.4049/jimmunol.175.11.7202.
21. Kong Y, Zhang Y, Zhao X, et al. Carboxymethyl-chitosan attenuates inducible nitric oxide synthase and promotes interleukin-10 production in rat chondrocytes. *Exp Ther Med*. 2017;14(6):5641-5646. doi: 10.3892/etm.2017.5258.
22. Minshawi F, Lanvermann S, McKenzie E, et al. The Generation of an Engineered Interleukin-10 Protein With Improved Stability and Biological Function. *Front Immunol*. 2020;11:1794. doi: 10.3389/fimmu.2020.01794.

23. Bhadriraja H, Patel V, Singh AK, et al. Increased frequency of Th17 cells and IL-17 levels are associated with low bone mineral density in postmenopausal women. *Sci Rep*. 2021;11(1):16155. doi: 10.1038/s41598-021-95640-0.
24. Singh B, Kumari S, Kureel AK, et al. In-vitro evidence indicating that IL-10 causes aging-related hypoalbuminemia via JAK1/STAT3 and CEBP- β . *Exp Cell Res*. 2024;443(1):114327. doi: 10.1016/j.yexcr.2024.114327.
25. Suyasa IK, Kawiya IK, Bakta IM, Widiana IG. Interleukin-6 and ratio of plasma interleukin-6/interleukin-10 as risk factors of symptomatic lumbar osteoarthritis. *World J Orthop*. 2017;8(2):149-155. doi: 10.5312/wjo.v8.i2.149.
26. Hadeel A, Hameed, Hassan AF. The Prophylactic Anti-Inflammatory Effect of Omega-7 Against Paracetamol-Induced Liver Injury in Rats. *Iraqi J Vet Med*. 2022;46(2):43-47. doi: 0000-0001-8089-4726.
27. Tseng S, Reddi AH, Di Cesare PE. Cartilage Oligomeric Matrix Protein (COMP): A Biomarker of Arthritis. *Biomark Insights*. 2009;4:33-44. doi: 10.4137/bmi.s645.
28. Fan X, Chen G, Wang S, et al. Applications of Chitosan and its Derivatives in the Treatment of Osteoarthritis. *Aging Dis*. 2024. doi: 10.14336/AD.2024.1080.
29. Ge Y, Zhou S, Li Y, et al. Estrogen prevents articular cartilage destruction in a mouse model of AMPK deficiency via ERK-mTOR pathway. *Ann Transl Med*. 2019;7(14):336. doi: 10.21037/atm.2019.06.77.
30. Roman-Blas JA, Castañeda S, Largo R, Herrero-Beaumont G. Osteoarthritis associated with estrogen deficiency. *Arthritis Res Ther*. 2009;11(5):241. doi: 10.1186/ar2791.
31. Nguyen C, Coudeyre E, Boutron I, et al. Oral resveratrol in adults with knee osteoarthritis: A randomized placebo-controlled trial (ARTHROL). *PLoS Med*. 2024;21(8):e1004440. doi: 10.1371/journal.pmed.1004440.
32. Vo NX, Le NNH, Chu TDP, et al. Effectiveness and Safety of Glucosamine in Osteoarthritis: A Systematic Review. *Pharmacy (Basel)*. 2023;11(4):117. doi: 10.3390/pharmacy11040117.
33. Honvo G, Bruyère O, Geerinck A, et al. Efficacy of Chondroitin Sulfate in Patients with Knee Osteoarthritis: A Comprehensive Meta-Analysis Exploring Inconsistencies in Randomized, Placebo-Controlled Trials. *Adv Ther*. 2019;36(5):1085-1099. doi: 10.1007/s12325-019-00921-w.
34. Manocchio N, Pirri C, Ljoka C, et al. Long-Term Efficacy of Carboxymethyl-Chitosan in Advanced Knee Osteoarthritis: A Twelve-Month Follow-Up Study on Non-Responders to Hyaluronic Acid. *Biomedicines*. 2025;13(2):270. doi: 10.3390/biomedicines13020270.
35. Basbaum AI, Bautista DM, Scherrer G, Julius D. Cellular and molecular mechanisms of pain. *Cell*. 2009;139(2):267-284. doi: 10.1016/j.cell.2009.09.028.
36. Clegg Daniel O., Reda Domenic J., Harris Crystal L., et al. Glucosamine, chondroitin sulfate, and the two in combination for painful knee osteoarthritis. *N Engl J Med*. 2006;354(8):795-808. doi: 10.1056/NEJMoa052771.
37. Emans PJ, Skaliczki G, Haverkamp D, et al. First-in-human Study to Evaluate a Single Injection of KiOmedine®CM-Chitosan for Treating Symptomatic Knee Osteoarthritis. *Open Rheumatol J*. 2022;16. doi: 10.2174/18743129-v16-e2206100.
38. Marouf BH, Hussain SA, Ali ZS, Ahmmad RS. Clinical efficacy of resveratrol as an adjuvant with meloxicam in the treatment of knee osteoarthritis patients: A double-blind, randomised, placebo-controlled trial. *Braz J Pharm Sci*. 2018;54(4):e17773. doi: 10.1590/s2175-97902018000417773.
39. Zhang W, Jones A, Doherty M. Does paracetamol (acetaminophen) reduce the pain of osteoarthritis? A meta-analysis of randomised controlled trials. *Ann Rheum Dis*. 2004;63(8):901-907. doi:10.1136/ard.2003.018531.

The article was submitted 04.04.2024; approved after reviewing 21.01.2025; accepted for publication 21.02.2025.

Статья поступила 04.09.2024; одобрена после рецензирования 21.01.2025; принята к публикации 21.02.2025.

Information about the authors:

Putu Kermawan — Department of Orthopedic Surgery, Faculty of Medicine;

I Wayan Putu Sutirta Yasa — Department of Clinical Pathology, Faculty of Medicine;

Made Bramantya Karna — Department of Orthopaedics and Traumatology, Prof. Dr. I.G.N.G. Ngoerah General Hospital;

Sianny Herawati — Department of Clinical Pathology, Faculty of Medicine;

I Ketut Suyasa — Department of Orthopaedic and Traumatology, Prof. Dr. I.G.N.G. Ngoerah General Hospital;

Ni Luh Kadek Alit Arsani — Faculty of Medicine;

Kadek Egadia Calisto — Faculty of Medicine;

Ketut Shri Satya Yogananda — Faculty of Medicine;

Ketut Shri Satya Wiwekananda — Faculty of Medicine;

Nyoman Satria Nakayoshi Wijaya — Faculty of Medicine;

I Made Jawi — Department of Pharmacology, Faculty of Medicine.



Диагностика качества жизни детей и подростков на этапе лечения корсетами типа Риго – Шено с использованием русскоязычной версии опросника Brace Questionnaire

Г.А. Леин^{1✉}, А.В. Бехтерева¹, И.В. Павлов², М.О. Демченко¹, А.Г. Магомедова²

¹ Протезно-ортопедический центр «Сколиолоджик.ру», Санкт-Петербург, Россия

² Северо-Западный научно-практический центр реабилитации и протезирования «Ортетика», Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Григорий Аркадьевич Леин, lein@scoliolologic.ru

Аннотация

Введение. Для изучения качества жизни (КЖ) детей и подростков со сколиозом, которые проходят корсетное лечение, используют специальные опросники, рекомендованные SOSORT. Один из них — Brace Questionnaire (BrQ), прошедший этап лингвокультурной адаптации и валидации на русском языке.

Цель работы — с помощью валидированного в России опросника BrQ выявить группы пациентов со сколиозом, требующие особого внимания в процессе лечения корсетами типа Риго – Шено.

Материалы и методы. С использованием автоматизированного BrQ опрошено 405 пациентов, пользующихся корсетом типа Риго – Шено. Статистически исследованы изменения показателей доменов и общего показателя качества жизни в зависимости от пола, возраста, срока использования корсета и продолжительности ежесуточной фиксации корсетом. Изменения в зависимости от величины основной дуги сколиоза прослежены у 325 человек.

Результаты. Статистически значимо у мальчиков выше показатели по домену «Жизнеспособность» ($p = 0,05$) и «Телесная боль» ($p = 0,03$). Выявлена основная тенденция, — снижение показателей доменов и общего показателя КЖ зависит от увеличения возраста, срока пользования корсетом и величины основной дуги. Определены статистически значимые отличия по различным доменам между исследуемыми группами по указанным показателям. Зарегистрирован рост показателей доменов при увеличении продолжительности ежесуточной фиксации корсетом.

Обсуждение. Выявленные тенденции изменения показателей доменов и общего показателя КЖ в зависимости от увеличения возраста, срока пользования корсетом, продолжительности ежесуточной фиксации, а также величины основной дуги согласуются с данными научной литературы.

Заключение. Определение достоверности значимости различий выявило группы пациентов, требующие особого внимания в процессе лечения корсетами типа Риго – Шено. У девочек снижен уровень КЖ за счет доменов «Эмоциональное функционирование» и «Социальное функционирование». У детей среднего и старшего школьного возраста снижены показатели доменов «Общее восприятие здоровья», «Телесная боль», «Самооценка и эстетика», «Социальное функционирование». У пациентов, которые используют корсет четыре года и более, снижены показатели доменов «Общее восприятие здоровья», «Эмоциональное функционирование», «Самооценка и эстетика», а по домену «Телесная боль» нарастание болевых ощущений наблюдается при использовании корсета от двух-трех лет. Особая группа — пациенты на начальном этапе пользования корсетом, имеющие самые низкие показатели КЖ. Высокие степени сколиоза значимо снижают показатели доменов «Общее восприятие здоровья», «Жизнеспособность», «Школьная активность», «Социальная активность» (при дуге более 50°).

Ключевые слова: позвоночник, идиопатический сколиоз, качество жизни, корсет

Для цитирования: Леин Г.А., Бехтерева А.В., Павлов И.В., Демченко М.О., Магомедова А.Г. Диагностика качества жизни детей и подростков на этапе лечения корсетами типа Риго – Шено с использованием русскоязычной версии опросника Brace Questionnaire. *Гений ортопедии*. 2026;32(4):488-498. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-4-488-498.

Original article

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2026-32-4-488-498>



Evaluation of quality of life in children and adolescents during treatment with Rigo – Cheneau type braces using the Russian version of the Brace Questionnaire

G.A. Lein^{1✉}, A.V. Behtereva¹, I.V. Pavlov², M.O. Demchenko¹, A.G. Magomedova²

¹ Prosthetic and orthopedic center Scoliologic.ru, Saint Petersburg, Russian Federation

² North-West scientific-practical center of rehabilitation and prosthetics "Ortetika", Saint Petersburg, Russian Federation

Corresponding author: Grigory A. Lein, lein@scoliologic.ru

Abstract

Introduction Special questionnaires recommended by SOSORT are used to study the quality of life (QoL) of children and adolescents undergoing brace treatment for scoliosis. One of them is the Brace Questionnaire (BrQ) which has undergone the stage of linguistic and cultural adaptation and validation in the Russian language.

Aim To reveal groups of patients with scoliosis requiring special attention during brace treatment using the BrQ which was validated in Russia.

Methods 405 patients that wore braces were surveyed with the automated BrQ. Changes in the domains and the overall quality of life score were statistically analyzed based on gender, age, duration of brace wear, and daily brace wear time. In 325 individuals, changes were tracked based on the magnitude of the main scoliotic curve.

Results Boys showed statistically significantly higher scores in the "Vitality" ($p = 0.05$) and "Bodily Pain" ($p = 0.03$) domains. A main trend was identified: a decrease in domain scores and the overall QoL score with increasing age, duration of brace wear, and magnitude of the main curve. Statistically significant differences in various domains were found between the study groups for these parameters. The dependence of scores on the daily brace wear time was their growth.

Discussion The identified trends in changes of domain scores and the overall QoL score in regard to increase in age, duration of brace wear, daily wear time, and the magnitude of the main curve are consistent with scientific literature data.

Conclusion Determination of the significance of differences revealed groups of patients requiring special attention during brace treatment for scoliosis. These are girls who have a lower QoL level in the "Emotional Functioning" and "Social Functioning" domains; middle and senior school-age children who show a decrease in the "General Health Perception", "Bodily Pain", "Self-Esteem and Esthetics", and "Social Functioning" domains. These are patients who wore a brace for 4 years or more: the "General Health Perception", "Emotional Functioning", and "Self-Esteem and Esthetics" domains decrease; and for the "Bodily Pain" domain, pain increased already after 2–3 years of brace use. A special group of patients are those who at the initial stage of brace wear had the lowest Quality of Life (QoL) scores. High grades of scoliosis significantly reduce the scores in the domains such as "General Health Perception", "Vitality", and "School Activity", while the "Social Activity" domain score is reduced with a curve more than 50°.

Keywords: spine, idiopathic scoliosis, quality of life, brace

For citation: Lein GA, Behtereva AV, Pavlov IV, Demchenko MO, Magomedova AG. Evaluation of quality of life in children and adolescents during treatment with Rigo – Cheneau type braces using the Russian version of the Brace Questionnaire. *Genij Ortopedii*. 2026;32(4):488–498. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-4-488-498.

ВВЕДЕНИЕ

Идиопатический сколиоз (ИС) — прогрессирующее заболевание, связанное с психосоциальными последствиями. На качество жизни (КЖ) детей и подростков с ИС могут влиять как сам сколиоз, так и терапевтические вмешательства, например, корсетное лечение. Тем не менее, влияние использования корсетов на параметры КЖ, связанные со здоровьем, у людей с ИС остается спорным. Некоторые исследования свидетельствуют, что у людей с ИС ношение корсета не оказывает побочных эффектов на параметры КЖ, связанные со здоровьем [1–4]. Другие авторы сообщают, что ношение корсета может привести к различным психологическим реакциям, например, негативным мыслям, стрессу и тревоге, эмоциональной нестабильности и нарушению самовосприятия и самооценки [5–8].

Для эффективного улучшения КЖ людей, длительно пользующихся корсетом, необходимо с помощью использования соответствующих опросников выявлять, какие именно факторы наиболее заметно влияют на КЖ. В 2006 году греческими исследователями разработан специализированный опросник по изучению КЖ для детей и подростков со сколиозом, которым назначено корсетное лечение, — Brace Questionnaire (BrQ) [9], прошедший этап лингвокультурной адаптации и валидации на русском языке [10].

Цель работы — с помощью валидированного в России опросника BrQ выявить группы пациентов со сколиозом, требующие особого внимания в процессе лечения корсетами типа Риго – Шено.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследование включены пришедшие на амбулаторный прием пациенты школьного возраста с ИС ($n = 405$), которые пользуются корсетами по типу Риго – Шено, смоделированными в программной среде Rodin 4D и выполненными по технологии CAD/CAM производства из термопластов в условиях протезно-ортопедического центра «Сколиолджик.ру» и Северо-Западного научно-практического центра реабилитации и протезирования «Ортетика».

Опрос проводили с помощью автоматизированного русскоязычного опросника BrQ, встроенного в сайт протезно-ортопедического центра «Сколиолджик.ру». Кроме 34 вопросов опросника BrQ анкета включала данные о поле, возрасте, сроке использования корсета и продолжительности ежедневной фиксации корсетом. Пациент заполнял анкету самостоятельно с использованием планшета в зале ожидания перед приемом врача — травматолога-ортопеда.

Группы пациентов по возрасту (сформированы на основании педагогической практики [11]): младший школьный возраст (от 6 до 10 лет); средний школьный возраст (от 10 до 15 лет), в котором выделены две подгруппы (от 10 до 13 лет и от 13 до 15 лет); старший школьный возраст (от 15 до 18 лет).

Группы по длительности использования корсета: один год; два–три года; четыре года и более.

Группы по ежедневному периоду фиксации корсетом: менее 8 часов; 8–14 часов; более 15 часов.

Дополнительно случайной выборкой отобрано 325 человек, у которых прослежены изменения показателей доменов и общего показателя КЖ в зависимости от величины основной дуги сколиоза. Степень сколиоза по величине основной дуги определяли в соответствии с национальными клиническими рекомендациями.

Группы по степени сколиоза: II степень — 11–25°; III степень — 26–40°; IV степень — $\geq 41^\circ$, в которой выделены две подгруппы ($< 50^\circ$ и $> 50^\circ$).

BrQ содержит 34 элемента шкалы Лайкерта и охватывает восемь доменов для измерения КЖ пациентов с подростковым ИС, получающих лечение корсетом:

1. «Общее восприятие здоровья» (вопросы 1, 2);
2. «Физическое функционирование» (вопросы 3–9);
3. «Эмоциональное функционирование» (вопросы 10–14);
4. «Самооценка и эстетика» (вопросы 15, 16);
5. «Жизнеспособность» (вопросы 17, 18);
6. «Школьная активность» (вопросы 19–21);
7. «Телесная боль» (вопросы 22–27);
8. «Социальное функционирование» (вопросы 28–34).

Оценка BrQ для вопросов 4, 5, 6, 12, 14, 15, 16 и 17:

- всегда — 5 баллов;
- большую часть времени — 4 балла;
- иногда — 3 балла;
- почти никогда — 2 балла;
- никогда — 1 балл.

Оценка BrQ для вопросов 1, 2, 3, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33 и 34:

- всегда — 1 балл;
- большую часть времени — 2 балла;
- иногда — 3 балла;
- почти никогда — 4 балла;
- никогда — 5 баллов.

Методика подсчета. Каждый балл умножается на 20, а общий показатель делится на 34. Теоретически минимальный показатель равен 20, а максимальный — 100. Более высокий показатель указывает на лучшее КЖ.

Показатель подшкалы может быть рассчитан для каждой из восьми областей путем деления общего показателя каждого измерения на число составляющих его элементов [9, 10].

Материал статистически обработан с определением значимости различий между показателями сформированных групп.

Публикация исследования одобрена Комитетом по этике Протезно-ортопедического центра «Сколи-олоджик.ру», опираясь на принципы Всемирной Хельсинской медицинской декларации (протокол № 6 от 25 августа 2025 года). В статье приведены результаты исследований без идентификации личности пациентов, которые не противоречат этическим стандартам Хельсинской декларации Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения научных исследований с участием человека» с поправками 2000 года и «Правилами клинической практики в Российской Федерации», утвержденными Приказом Минздрава РФ от 19.06.2003 г. № 266. Участники исследования и их законные представители информированы о целях, методах, ожидаемой пользе исследования и сопряженных с участием в исследовании риске и неудобствах.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате опроса получены данные на 405 человек. Среди них мальчиков — 58 чел. (14,3 %), девочек — 347 чел. (85,7 %). Возраст — $(14,2 \pm 1,7)$ года, основная группа — средний школьный возраст (65,4 %). Фиксацию позвоночника корсетом проводили, начиная с возраста $(11,98 \pm 1,90)$ лет, в течение $(2,47 \pm 1,37)$ лет, при этом ежесуточный период фиксации корсетом составлял $(15,00 \pm 3,78)$ часов.

Показатели доменов и общий показатель КЖ в зависимости от пола представлены в таблице 1.

Таблица 1

Показатели доменов и общий показатель КЖ по опроснику BrQ в зависимости от пола и значимость различий

Домены	Показатели КЖ, баллы			p между столбцами М и Ж
	Пол		Средние показатели	
	М (n = 58)	Ж (n = 347)		
Общее восприятие здоровья	3,56 ± 0,64	3,54 ± 0,68	3,54 ± 0,68	0,87
Физическое функционирование	4,00 ± 0,49	4,00 ± 0,49	4,00 ± 0,49	0,99
Эмоциональное функционирование	3,76 ± 0,63	3,64 ± 0,61	3,65 ± 0,62	0,30
Самооценка и эстетика	3,53 ± 0,76	3,55 ± 0,75	3,55 ± 0,75	0,92
Жизнеспособность	3,67 ± 0,53	3,47 ± 0,71	3,50 ± 0,68	0,05
Школьная активность	4,19 ± 0,59	4,21 ± 0,70	4,2 ± 0,69	0,86
Телесная боль	4,42 ± 0,43	4,24 ± 0,53	4,27 ± 0,52	0,03
Социальное функционирование	3,88 ± 0,47	3,81 ± 0,61	3,82 ± 0,59	0,46
Общий показатель КЖ	79,15 ± 6,55	77,71 ± 8,86	77,91 ± 8,53	0,26

Показатели доменов «Общее восприятие здоровья», «Физическое функционирование», «Самооценка и эстетика», «Школьная активность» у мальчиков и девочек практически одинаковые. У мальчиков отмечается незначительное преобладание показателей доменов «Эмоциональное функционирование» и «Социальное функционирование». Статистически значимо у мальчиков выше показатели доменов «Жизнеспособность» ($p = 0,05$) и «Телесная боль» ($p = 0,03$). За счет показателей этих доменов общий показатель КЖ у мальчиков выше, чем у девочек.

Исследованы показатели доменов и общий показатель КЖ по опроснику BrQ в зависимости от возраста (табл. 2).

Таблица 2

Показатели доменов и общий показатель КЖ по опроснику BrQ в зависимости от возраста и значимость различий

Домены	Показатели КЖ, баллы				p между столбцами			
	Младший возраст	Средний возраст		Старший возраст				
	от 6 до 10 лет ($n = 16$)	от 10 до 13 лет ($n = 117$)	от 13 до 15 лет ($n = 148$)	от 15 до 18 лет ($n = 124$)				
	1	2	3	4	1 и 2	1 и 4	2 и 3	3 и 4
Общее восприятие здоровья	$3,88 \pm 0,59$	$3,71 \pm 0,65$	$3,52 \pm 0,65$	$3,38 \pm 0,73$	0,42	0,03	0,07	0,22
Физическое функционирование	$3,71 \pm 0,59$	$3,92 \pm 0,50$	$4,09 \pm 0,45$	$4,00 \pm 0,49$	0,29	0,15	0,02	0,24
Эмоциональное функционирование	$3,85 \pm 0,54$	$3,65 \pm 0,61$	$3,64 \pm 0,59$	$3,64 \pm 0,66$	0,29	0,26	0,91	0,95
Самооценка и эстетика	$4,03 \pm 0,60$	$3,53 \pm 0,78$	$3,68 \pm 0,69$	$3,34 \pm 0,80$	0,02	0,001	0,21	0,001
Жизнеспособность	$3,75 \pm 0,56$	$3,42 \pm 0,74$	$3,60 \pm 0,71$	$3,42 \pm 0,63$	0,10	0,09	0,11	0,08
Школьная активность	$4,23 \pm 0,73$	$4,20 \pm 0,72$	$4,25 \pm 0,59$	$4,15 \pm 0,75$	0,89	0,74	0,57	0,32
Телесная боль	$4,65 \pm 0,28$	$4,28 \pm 0,55$	$4,31 \pm 0,48$	$4,16 \pm 0,53$	0,001	0,001	0,72	0,07
Социальное функционирование	$4,23 \pm 0,56$	$3,78 \pm 0,58$	$3,83 \pm 0,56$	$3,81 \pm 0,62$	0,03	0,04	0,56	0,85
Общий показатель КЖ	$81,62 \pm 7,24$	$77,51 \pm 8,51$	$78,75 \pm 8,06$	$76,82 \pm 8,89$	0,11	0,07	0,36	0,18

Выявлены следующие закономерности изменения показателей доменов в зависимости от возраста.

Показатели доменов «Общее восприятие здоровья» и «Жизнеспособность» с увеличением возраста снижаются, показатели домена «Физическое функционирование» нарастают. Отметим, что статистически значимое снижение отмечено по домену «Общее восприятие здоровья» между детьми младшего и старшего школьного возраста ($p = 0,03$), а увеличение — по домену «Физическое функционирование» между группами детей среднего школьного возраста «от 10 до 13 лет» и «от 13 до 15 лет» ($p = 0,02$).

Несколько снижаются показатели домена «Эмоциональное функционирование», что указывает на нарастание возможных переживаний и тревог в связи с корсетированием, а более значительно, статистически значимо, — домена «Телесная боль» в группах младшего и среднего школьного возраста ($p = 0,001$), а также младшего и старшего школьного возраста ($p = 0,001$), что следует расценивать как нарастание с возрастом болевых ощущений пациента с ИС.

Аналогичные тенденции выявлены и в изменении показателей домена «Самооценка и эстетика», причем статистически доказанное снижение показателей наблюдается между детьми младшего и старшего школьного возраста ($p = 0,001$), а также между детьми среднего и старшего школьного возраста ($p = 0,001$).

Показатели домена «Социальное функционирование» также снижаются, достоверная разница обнаружена между детьми младшего и среднего школьного возраста ($p = 0,03$) и младшего и старшего школьного возраста ($p = 0,04$).

Показатели домена «Школьная активность» остается практически без изменений.

Наибольший общий показатель КЖ наблюдается в младшем школьном возрасте — ($81,62 \pm 7,24$). В группе детей от 10 до 13 лет уровень КЖ снижается до ($77,51 \pm 8,51$) баллов и в старшем школьном возрасте составляет ($76,82 \pm 8,89$) баллов.

Проанализированы домены и общий показатель КЖ в зависимости общей от длительности использования корсета (табл. 3).

Таблица 3

Показатели доменов и общий показатель КЖ по опроснику BrQ в зависимости от срока использования корсета и значимость различий

Домены	Показатели КЖ, баллы			p между столбцами		
	1 год использования (n = 159)	2–3 года использования (n = 162)	≥ 4 лет использования (n = 84)			
	1	2	3	1 и 2	1 и 3	2 и 3
Общее восприятие здоровья	3,75 ± 0,63	3,44 ± 0,70	3,36 ± 0,73	0,001	0,001	0,51
Физическое функционирование	4,03 ± 0,49	4,01 ± 0,49	3,94 ± 0,50	0,79	0,29	0,41
Эмоциональное функционирование	3,79 ± 0,51	3,62 ± 0,68	3,45 ± 0,64	0,06	0,001	0,12
Самооценка и эстетика	3,70 ± 0,77	3,55 ± 0,75	3,23 ± 0,68	0,16	0,001	0,01
Жизнеспособность	3,54 ± 0,69	3,51 ± 0,69	3,40 ± 0,65	0,80	0,24	0,36
Школьная активность	4,24 ± 0,66	4,13 ± 0,72	4,27 ± 0,65	0,27	0,76	0,22
Телесная боль	4,34 ± 0,47	4,17 ± 0,58	4,31 ± 0,47	0,03	0,68	0,12
Социальное функционирование	3,88 ± 0,54	3,77 ± 0,64	3,81 ± 0,57	0,21	0,51	0,69
Общий показатель КЖ	79,45 ± 7,67	77,08 ± 9,46	76,60 ± 7,97	0,06	0,04	0,75

Показатели доменов «Общее восприятие здоровья», «Эмоциональное функционирование», «Самооценка и эстетика» снижаются по мере нарастания длительности пользования корсетом. Отметим, что высокий уровень значимости различий показателей домена «Общее восприятие здоровья» отмечен между группами пользования корсетом «один год» и «более четырех лет» ($p = 0,001$), а также между группами «один год» и «два–три года» ($p = 0,001$).

Аналогичная значимость различий выявлена в показателях домена «Эмоциональное функционирование» между группами «один год» и «более четырех лет» ($p = 0,001$).

По домену «Самооценка и эстетика» высокий уровень значимости различий выявлен между группами «один год» и «более четырех лет» ($p = 0,001$) и менее значимая разница — между группами «один год» и «два–три года» ($p = 0,01$).

Значимые различия показателей доменов «Физическое функционирование», «Жизнеспособность», «Социальное функционирование», «Школьная активность» в зависимости от срока пользования корсетом не выявлены.

Показатели домена «Телесная боль» значимо указывают, что пациенты, которые используют корсет два–три года, дают больше утвердительных ответов о наличии болевых ощущений, чем пациенты, которые носят корсет один год ($p = 0,03$), а показатели КЖ пациентов, которые используют корсет четыре года и более практически сравниваются с пациентами, пользующимися корсетами один год. Самый высокий общий показатель КЖ ($79,45 \pm 7,67$) наблюдается при сроке использования корсета в течение одного года. При сроке пользования два–три года этот показатель снижается на две единицы и более, — ($77,08 \pm 9,46$). Наименьший показатель КЖ ($76,60 \pm 7,97$) отмечен при сроке использования корсета четыре года и более. При этом значимые различия выявлены между группами «один год» и «четыре года и более» ($p = 0,04$).

Показатели доменов и общий показатель КЖ по опроснику BrQ в зависимости от ежесуточного периода фиксации и показатели значимости различий представлены в таблице 4.

Самые низкие показатели доменов «Физическое функционирование», «Эмоциональное функционирование», «Самооценка и эстетика», «Жизнеспособность», «Школьная активность» отмечаются при ежесуточном периоде фиксации корсетом менее восьми часов. В эту группу, в основном, попадают пациенты, которые находятся на стадии привыкания к корсету. При более длительном пользовании корсетом указанные показатели возрастают. Значимые различия выявлены между группами «менее восьми часов» и «более 15 часов» ($p = 0,03$) и между группами «8–14 часов» и «более 15 часов» ($p = 0,001$).

Показатели доменов «Общее восприятие здоровья» и «Социальное функционирование» остаются практически неизменными.

Показатель домена «Телесная боль» незначительно нарастает, что свидетельствует об уменьшении болевых ощущений по мере привыкания к корсету.

Наиболее низкий общий показатель КЖ наблюдается при ежесуточном периоде фиксации корсетом менее восьми часов, — ($72,65 \pm 9,58$). В остальные периоды показатель КЖ нарастает, а самый высокий показатель ($78,31 \pm 8,53$) наблюдается при длительности фиксации корсетом от 15 часов и более в сутки.

Результаты опроса 325 детей и подростков соотнесены с данными медицинской базы по величине угла Кобба основной дуги деформации (табл. 5).

Таблица 4

Показатели доменов и общий показатель КЖ по опроснику BrQ
в зависимости от ежесуточного периода фиксации и значимость различий

Домены	Показатели КЖ, баллы			p между столбцами		
	< 8 час. в сут (n = 14)	8–14 час. в сут (n = 122)	≥15 час. в сут (n = 269)			
	1	2	3	1 и 2	1 и 3	2 и 3
Общее восприятие здоровья	3,61 ± 0,54	3,48 ± 0,63	3,57 ± 0,71	0,58	0,86	0,36
Физическое функционирование	3,72 ± 0,48	3,98 ± 0,49	4,03 ± 0,49	0,13	0,07	0,44
Эмоциональное функционирование	3,31 ± 0,56	3,65 ± 0,61	3,67 ± 0,62	0,11	0,08	0,78
Самооценка и эстетика	3,11 ± 0,77	3,32 ± 0,81	3,67 ± 0,72	0,46	0,05	0,001
Жизнеспособность	3,21 ± 0,53	3,50 ± 0,57	3,52 ± 0,73	0,16	0,13	0,82
Школьная активность	3,90 ± 0,82	4,26 ± 0,70	4,20 ± 0,67	0,24	0,32	0,52
Телесная боль	3,95 ± 0,70	4,26 ± 0,44	4,29 ± 0,54	0,22	0,18	0,70
Социальное функционирование	3,65 ± 0,75	3,85 ± 0,60	3,82 ± 0,57	0,44	0,52	0,67
Общий показатель КЖ	72,65 ± 9,58	77,65 ± 8,18	78,31 ± 8,53	0,15	0,10	0,59

Таблица 5

Показатели доменов и общий показатель КЖ по опроснику BrQ
в зависимости от степени сколиоза и значимость различий

Домены	Показатели КЖ (баллы)				p между столбцами				
	II степень сколиоза основная дуга 11–25° (n = 89)	III степень сколиоза основная дуга 26–40° (n = 121)	IV степень сколиоза основная дуга 41° и более						
			< 50° (n = 46)	> 50° (n = 69)	1 и 2	1 и 4	2 и 3	2 и 4	3 и 4
	1	2	3	4					
Общее восприятие здоровья	3,78 ± 0,57	3,55 ± 0,75	3,61 ± 0,70	3,30 ± 0,61	0,05	0,001	0,69	0,07	0,06
Физическое функционирование	4,09 ± 0,39	4,07 ± 0,49	3,97 ± 0,51	3,97 ± 0,52	0,76	0,20	0,35	0,30	0,99
Эмоциональное функционирование	3,80 ± 0,57	3,68 ± 0,61	3,52 ± 0,64	3,66 ± 0,56	0,22	0,23	0,25	0,87	0,36
Самооценка и эстетика	3,61 ± 0,75	3,50 ± 0,76	3,59 ± 0,75	3,51 ± 0,71	0,44	0,53	0,63	0,94	0,69
Жизнеспособность	3,66 ± 0,57	3,42 ± 0,74	3,40 ± 0,67	3,59 ± 0,67	0,04	0,55	0,90	0,22	0,26
Школьная активность	4,40 ± 0,56	4,14 ± 0,73	4,17 ± 0,74	4,22 ± 0,64	0,02	0,12	0,83	0,53	0,80
Телесная боль	4,37 ± 0,43	4,26 ± 0,52	4,25 ± 0,55	4,22 ± 0,54	0,22	0,15	0,94	0,68	0,80
Социальное функционирование	3,92 ± 0,52	3,82 ± 0,59	3,61 ± 0,68	3,95 ± 0,58	0,32	0,79	0,15	0,26	0,03
Общий показатель КЖ	80.36 ± 6.91	77.97 ± 8.82	76.41 ± 9.32	77.94 ± 8.35	0.10	0.15	0.47	0.98	0.51

Статистически значимых изменений по доменам «Физическое функционирование», «Эмоциональное функционирование», «Самооценка и эстетика» выявить не удалось.

По домену «Общее восприятие здоровья» значимое снижение показателей наблюдалось между группами со II и III степенями сколиоза ($p = 0,05$), наиболее значительное — между группами со II степенью и IV степенью с углом более 50° ($p = 0,001$).

Показатели доменов «Жизнеспособность» и «Школьная активность» по мере нарастания величины дуги также снижаются, причем значимо между группами со II и III степенями сколиоза ($p = 0,04$ и $p = 0,02$ соответственно).

Аналогичная тенденция выявлена по домену «Социальная активность», при этом значимые различия выявлены между показателями подгрупп IV степени сколиоза «менее 50°» и «более 50°» ($p = 0,03$).

Показатели домена «Телесная боль» при увеличении размера дуги снижаются, что указывает на нарастание боли по мере увеличения выраженности деформации, но статистически это не подтверждено.

Статистически незначимо снижается и общий показатель КЖ.

Таким образом, основная тенденция — это снижение показателей доменов и общего показателя КЖ в зависимости от увеличения возраста, срока использования корсета и увеличения размера основной дуги.

Выявлено увеличение показателей доменов и общего показателя КЖ по мере нарастания продолжительности ежесуточной фиксации корсетом.

ОБСУЖДЕНИЕ

Значительное внимание международных научных обществ изучения сколиоза (SOSORT, SRS) уделяется субъективной оценке пациентом КЖ с применением различных опросников. Наиболее информативными из них, с точки зрения проводимого корсетного лечения, являются специфический греческий опросник BrQ, валидированный в России, и итальянский опросник ISYQOL, пока не прошедший в России этап языковой адаптации и валидации.

Полученные нами данные о более высоком КЖ у мальчиков с ИС подтверждаются исследованием итальянских ученых [12]. V. Moradi et al. отмечали, что для девочек с ИС, находящихся на лечении корсетами, внешний вид и форма тела имеют большое значение и могут влиять на их социальные отношения [13]. Наши данные свидетельствуют, что у мальчиков отмечается незначительное преобладание показателей доменов «Эмоциональное функционирование» и «Социальное функционирование», но статистически значимо у мальчиков выше показатели домена «Жизнеспособность» ($p = 0,05$) и «Телесная боль» ($p = 0,03$).

Данные по показателям доменов и общему показателю КЖ в зависимости от возраста подтвердило исследование P. Korovessis et al. [6], показавшее, что комплаентность к корсетам выше у детей младшего школьного возраста, чем у подростков старшего школьного возраста. Действительно, показатели доменов «Общее восприятие здоровья», «Эмоциональное функционирование», «Жизнеспособность», «Самооценка и эстетика», «Социальное функционирование» с нарастанием возраста снижаются. Однако значимость различий показателей домена «Физическое функционирование» нарастает между группами детей среднего школьного возраста: от 10 до 13 лет и от 13 до 15 лет ($p = 0,02$). Следует отметить, что с возрастом наблюдается снижение показателей домена «Телесная боль», особенно значимо в группах младшего и среднего школьного возраста ($p = 0,001$), а также младшего и старшего школьного возраста ($p = 0,001$), что указывает на нарастание с возрастом болевых ощущений. Наибольший общий показатель КЖ наблюдается именно в младшем школьном возрасте — $(81,62 \pm 7,24)$.

По данным V. Moradi et al., показатели школьной активности и социального функционирования по опроснику BrQ были лучше у участников в возрасте 13 лет, чем у участников старше 13 лет [13]. Наши данные по домену «Школьная активность» не подтверждают это утверждение. Показатели домена «Социальное функционирование» достоверно снижаются в группах детей младшего и среднего школьного возраста ($p = 0,03$) и младшего и старшего школьного возраста ($p = 0,04$), что подтверждает полученные ранее данные.

Исследование влияния на КЖ срока пользования корсетом T. Babaee et al. показало, что на ранней стадии ношения корсета у подростков с ИС может возникнуть эмоциональный стресс и психологические реакции, влияющие на их самооценку [5]. Однако после первоначального шока, вызванного использованием корсета, дети адаптируются к нему, и проблемы уменьшаются. В подтверждение этих данных нами установлено, что показатели домена «Телесная боль» значимо указывают на то, что пациенты, пользующиеся корсетом два–три года, дают больше утвердительных ответов о наличии болевых ощущений, чем пациенты, использующие корсет один год ($p = 0,03$), а группа пациентов, использующих корсет четыре года и более, практически сравнивается по показателям с группой использующих корсеты один год. Однако нами установлено, что показатели доменов «Общее восприятие здоровья», «Эмоциональное функционирование», «Самооценка и эстетика» снижаются по мере нарастания длительности пользования корсетом. Самый высокий общий показатель КЖ ($79,45 \pm 7,67$) выявлен при сроке пользования один год. При сроке пользования два–три года этот показатель снижается на две единицы и более — $(77,08 \pm 9,46)$. Наименьший показатель КЖ ($76,60 \pm 7,97$) отмечен при сроке пользования корсетом четыре года и более. При этом значимые различия выявлены между группами «один год» и «четыре года и более» ($p = 0,04$).

V. Moradi et al. отмечали, что существует значимая связь между доменом BrQ «Эмоциональное функционирование» и соблюдением режима лечения корсетами [13]. Пациенты с более высокой степенью соблюдения режима фиксации корсетов имеют худшие показатели эмоционального функционирования. Настоящим исследованием указанные данные не подтверждены. Наоборот, самые низкие показатели доменов «Физическое функционирование», «Эмоциональное функционирование», «Самооценка и эстетика», «Жизнеспособность», «Школьная активность» и общий показатель КЖ ($72,65 \pm 9,58$) отмечены при длительности ежесуточной фиксации корсетом менее восьми часов. В эту группу в основном попадают пациенты, находящиеся на стадии привыкания к корсету. Это согласуется с данными W.E. Jr. MacLean et al. [14], которые начальный период ношения корсетов описывали как стрессовый у 84 % пациентов, и с данными S.L. Chan et al., указывающими, что общий показатель КЖ по шкале BrQ в группе с ежесуточной фиксацией корсетом 0–8 часов был на 16,28 меньше, чем в группе с ежесуточной фиксацией 17–23 часа [15]. Показатели доменов «Общее восприятие здоровья» и «Социальное функционирование» остаются практически неизменными, а показатель «Телесная боль» незначительно нарастает, что свидетельствует об уменьшении болевых ощущений по мере привыкания к корсету.

Нами определено, что по мере нарастания деформации основной дуги снижается общий показатель КЖ, однако статистическую значимость этих изменений доказать не удалось. Этот результат подтверждается исследованием A.G. Aulisa et al., в котором показатели КЖ коррелируют с выраженностью кривизны [12]. В своих работах M.H. Kaya et al. и M. Asher et al. также указывают, что тяжесть сколиоза влияет на КЖ пациентов с ИС [16, 17]. В настоящем исследовании установлено, что наиболее выражено изменяются показатели доменов «Жизнеспособность» и «Школьная активность», по мере нарастания величины дуги они снижаются, причем разница значима между группами со II и III степенями сколиоза ($p = 0,04$ и $p = 0,02$ соответственно). Аналогичная тенденция выявлена по домену «Социальная активность», при этом значимые различия обнаружены между подгруппами IV степени сколиоза (менее 50° и более 50° , $p = 0,03$).

Мы сравнили количество утвердительных ответов респондентов по отдельным вопросам BrQ на испанском языке в выборке, опубликованной L. Piantoni et al. [18] с собственными данными. В таблице 6 представлены вопросы с ощутимой разницей в количестве утвердительных ответов.

Таблица 6

Количество утвердительных ответов респондентов по отдельным вопросам BrQ в аргентинской и российской выборках

№ вопроса	Содержание вопроса	Доля утвердительных ответов, %	
		L. Piantoni et al. [18]	Собственные данные
В области эмоционального функционирования			
12.	Вы чувствовали себя счастливой(ым)?	24	64,7
14.	Вы считали, что лечение корсетом Вам помогает?	39	87,4
15.	Вы гордились собой?	18	52,1
16.	Вы были довольны своим телом?	27	53,4
В двигательной сфере			
5.	Вы могли надевать корсет без посторонней помощи?	50	86,4
6.	Вы могли снимать корсет без посторонней помощи?	50	94,4
В области социального функционирования			
31.	У Вас были проблемы с семьей?	42	26,2
32.	Вы думали, что отношения с Вашими родственниками и друзьями были бы лучше, если бы Вы не носили корсета?	50	30,4
33.	Вы сидели дома из-за того, что Вам было стыдно?	42	25,7
В области боли			
23.	У Вас ночью была боль?	55	20,8
24.	У Вас была боль при ходьбе?	47	27,4
25.	У Вас была боль, когда Вы сидите?	58	38,5
26.	У Вас была боль, когда Вы поднимались по лестнице?	43	16,3
В области школьной среды			
19.	У Вас были сложности с уроками?	48	27,4
20.	Вы не посещали школу?	35	16,3
21.	Вам было сложно сосредоточиться на уроках в классе?	36	27,4

Данные таблицы показывают, что российские дети и подростки, проходящие консервативное лечение корсетами, более уверенно чувствуют себя в области эмоционального функционирования. Обратим внимание, что 87,4 % опрошенных нами детей на вопрос «Вы считали, что лечение корсетом Вам помогает?» дали положительный ответ, что можно считать успехом командной работы. Опрос по домену «Физическое функционирование» показал, что на вопросы «Вы ощущали себя уставшим во время ходьбы?», «Вы не могли хорошо есть, дышать?» в российской популяции дано меньше утвердительных ответов. На вопросы, связанные с проблемами при надевании и снятии корсета, пациенты протезно-ортопедического центров «Сколиолджик.ру» и «Ортетика» также в подавляющем большинстве случаев ответили, что таких проблем не испытывали.

Обучение процедуре надевания и снятия корсета — один из приоритетов в работе наших специалистов. По домену «Социальное функционирование» ответы российских детей и подростков показывают, что они более уверенно чувствуют себя в социальной среде. Однако на вопросы «Вы чувствовали, что отличаетесь от сверстников?» и «Вы носили объемную одежду, скрывающую корсет?» в двух исследованиях были даны идентичные ответы. Более низкий процент утвердительных ответов был дан детьми и подростками из России также по вопросам, касающимся домена «Телесная боль». Однако на вопрос «Вы ощущали покалывание в руках и ногах?» ответы были практически идентичные. Что касается вопросов по домену «Школьная активность», то здесь тенденция сохраняется, — собственные данные демонстрируют меньшее количество утвердительных ответов. Таким образом, общий показатель КЖ в настоящем исследовании — 77,9 балла, в аргентинском исследовании — 63,7 балла.

На рис. 1 представлены собственные данные средних величин показателей доменов в сравнении с данными научной литературы, представленных в работах A.G. Aulisa et al. [19], J. Deceuninck et al. [20], E. Kinel et al. [21] и СММ. Peeters et al. [22]. Из диаграммы следует вывод о том, что величины значительно друг от друга не отличаются. То же можно сказать и об общем показателе КЖ: Россия — 77,9 б.; Польша — 77,1 б.; Италия — 78,8 б.; Франция — 76,0 б.; Дания — 75,9 б.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из результатов проведенного исследования следует, что при лечении корсетом пациенты детского и подросткового возраста оценивают качество жизни в 77,9 баллов из 100 возможных.

Выявлена следующая тенденция, — в начале корсетного лечения при увеличении продолжительности ежесуточной фиксации корсетом показатели КЖ по мере привыкания к корсету увеличиваются, что говорит о снижении первичного стресса на начальном этапе лечения. В то же время при продолжительном многолетнем лечении показатели КЖ уменьшаются из-за психологической усталости от лечения.

Проведенное исследование показало, что особого внимания команды специалистов в процессе лечения корсетами требуют девочки, так как уровень КЖ у них снижается более значительно, особенно по доменам «Эмоциональное функционирование» и «Социальное функционирование».

Следует обращать более значительное внимание на детей среднего и старшего возраста, у которых достоверно снижаются показатели доменов «Общее восприятие здоровья», «Телесная боль», Самооценка и эстетика», «Социальное функционирование».

В центре внимания специалистов должны быть пациенты, использующие корсет четыре года и более, из-за значимо снижающихся показателей доменов «Общее восприятие здоровья», «Эмоциональное функционирование», «Самооценка и эстетика». По домену «Телесная боль» нарастание болевых ощущений наблюдается уже со срока пользования два–три года.

В особую группу следует выделять пациентов на начальном этапе пользования корсетом, которые имеют самые низкие показатели качества жизни.

Высокие степени сколиоза значимо снижают показатели доменов «Общее восприятие здоровья», «Жизнеспособность» и «Школьная активность», а показатель домена «Социальная активность» значимо снижается при дуге более 50°.

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

Источник финансирования. Исследование выполнено без дополнительных источников финансирования.

Этическая экспертиза. Публикация исследования одобрена Комитетом по этике Протезно-ортопедического центра «Сколиолоджик.ру» (протокол № 6 от 25 августа 2025 года). Результаты исследований приведены без идентификации личности пациентов. Участники исследования и/или их законные представители подписали информированное согласие на публикацию результатов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Dunn J, Henrikson NB, Morrison CC, et al. Screening for Adolescent Idiopathic Scoliosis: Evidence Report and Systematic Review for the US Preventive Services Task Force. *JAMA*. 2018;319(2):173–187. doi: 10.1001/jama.2017.11669.
2. Savvides P, Gerdhem P, Grauers A, et al. Self-Experienced Trunk Appearance in Individuals With and Without Idiopathic Scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2020;45(8):522–527. doi: 10.1097/BRS.0000000000003308.
3. Weinstein SL, Dolan LA, Wright JG, Dobbs MB. Effects of bracing in adolescents with idiopathic scoliosis. *N Engl J Med*. 2013;369(16):1512–1521. doi: 10.1056/NEJMoa1307337.
4. Khoshhal Y, Jalali M, Babaei T, et al. The Effect of Bracing on Spinopelvic Rotation and Psychosocial Parameters in Adolescents with Idiopathic Scoliosis. *Asian Spine J*. 2019;13(6):1028–1035. doi: 10.31616/asj.2018.0307.

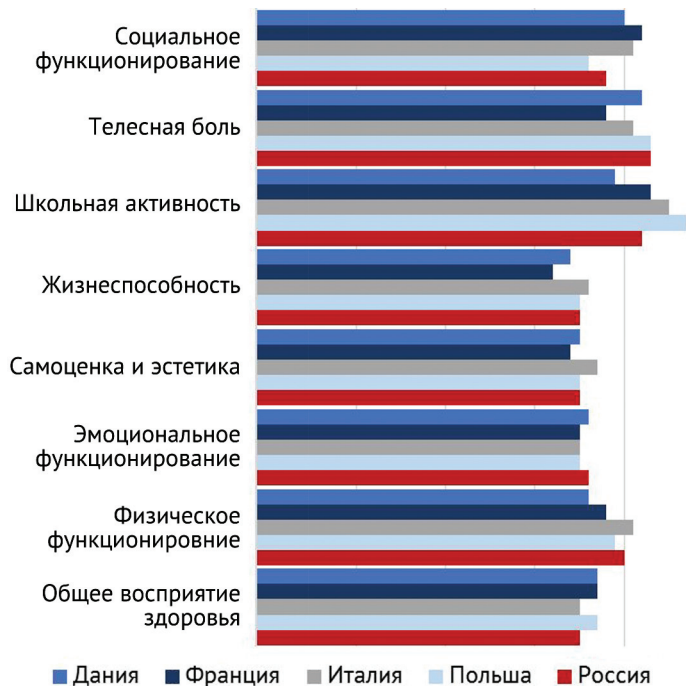


Рис. 1. Сравнение собственных данных (Россия) по средним величинам показателей доменов с данными научной литературы

5. Babae T, Kamyab M, Ganjavian MS, et al. Milwaukee brace or thoracolumbosacral orthosis? Which one affects the quality of life of adolescents with idiopathic scoliosis more? A cross-sectional study using the SRS-22 questionnaire. *Curr Orthop Pract.* 2014;25(5):478-483.
6. Koroivessis P, Zacharatos S, Koureas G, Megas P. Comparative multifactorial analysis of the effects of idiopathic adolescent scoliosis and Scheuermann kyphosis on the self-perceived health status of adolescents treated with brace. *Eur Spine J.* 2007;16(4):537-546. doi: 10.1007/s00586-006-0214-9.
7. Tones M, Moss N, Polly DW Jr. A review of quality of life and psychosocial issues in scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976).* 2006;31(26):3027-3038. doi: 10.1097/01.brs.0000249555.87601.fc.
8. Kinel E, Kotwicki T, Podolska A, et al. Quality of life and stress level in adolescents with idiopathic scoliosis subjected to conservative treatment. *Stud Health Technol Inform.* 2012;176:419-422.
9. Vasiladis E, Grivas TB, Gkoltsiou K. Development and preliminary validation of Brace Questionnaire (BrQ): a new instrument for measuring quality of life of brace treated scoliotics. *Scoliosis.* 2006;1:7. doi: 10.1186/1748-7161-1-7.
10. Леин Г.А., Павлов И.В., Демченко М.О. и др. Лингвокультурная адаптация и валидация русскоязычной версии опросника Brace Questionnaire. *Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста.* 2023;11(2):139-148. doi: 10.17816/PTORS322807.
11. Микрюков В.Ю. *Краткий курс педагогики.* СПб.: БХВ-Петербург; 2011:240.
12. Aulisa AG, Guzzanti V, Perisano C, et al. Determination of quality of life in adolescents with idiopathic scoliosis subjected to conservative treatment. *Scoliosis.* 2010;5:21. doi: 10.1186/1748-7161-5-21.
13. Moradi V, Memari AH, Saeedi M, et al. Brace-Related Stress and Quality-of-Life Parameters in Adolescents with Idiopathic Scoliosis. *Spine Surg Relat Res.* 2022;6(5):545-554. doi: 10.22603/ssrr.2021-0051.
14. MacLean WE Jr, Green NE, Pierre CB, Ray DC. Stress and coping with scoliosis: psychological effects on adolescents and their families. *J Pediatr Orthop.* 1989;9(3):257-261.
15. Chan SL, Cheung KM, Luk KD, et al. A correlation study between in-brace correction, compliance to spinal orthosis and health-related quality of life of patients with Adolescent Idiopathic Scoliosis. *Scoliosis.* 2014;9(1):1. doi: 10.1186/1748-7161-9-1.
16. Kaya MH, Erbahçeci F, Alkan H, et al. Factors influencing of quality of life in adolescent idiopathic scoliosis. *Musculoskelet Sci Pract.* 2022;62:102628. doi: 10.1016/j.msksp.2022.102628.
17. Asher M, Lai SM, Burton D, Manna B. The influence of spine and trunk deformity on preoperative idiopathic scoliosis patients' health-related quality of life questionnaire responses. *Spine (Phila Pa 1976).* 2004;29(8):861-868. doi: 10.1097/00007632-200404150-00008.
18. Piantoni L, Tello CA, Remondino RG, et al. Quality of life and patient satisfaction in bracing treatment of adolescent idiopathic scoliosis. *Scoliosis Spinal Disord.* 2018;13:26. doi: 10.1186/s13013-018-0172-0.
19. Aulisa AG, Guzzanti V, Galli M, et al. Validation of Italian version of Brace Questionnaire (BrQ). *Scoliosis.* 2013;8(1):13. doi: 10.1186/1748-7161-8-13.
20. Deceuninck J, Tirat-Herbert A, Rodriguez Martinez N, Bernard JC. French validation of the Brace Questionnaire (BrQ). *Scoliosis Spinal Disord.* 2017;12:18. doi: 10.1186/s13013-017-0126-y.
21. Kinel E, Kotwicki T, Podolska A, et al. Polish validation of Brace Questionnaire. *Eur Spine J.* 2012;21(8):1603-1608. doi: 10.1007/s00586-012-2188-0.
22. Peeters CMM, Bonsel JM, Munnik-Hagewoud R, et al. Validity and reliability of the adapted Dutch version of the Brace Questionnaire (BrQ). *Acta Orthop.* 2023;94:460-465. doi: 10.2340/17453674.2023.18492

Статья поступила 12.09.2025; одобрена после рецензирования 07.10.2025; принята к публикации 09.06.2026.

The article was submitted 12.09.2025; approved after reviewing 07.10.2025; accepted for publication 09.06.2026.

Информация об авторах:

Григорий Аркадьевич Леин — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, генеральный директор, lein@scoliologic.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7904-8688>;

Арина Валериевна Бехтерева — психолог, заместитель генерального директора, behтерева@scoliologic.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5579-4362>;

Иван Викторович Павлов — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, генеральный директор, pavlov@scoliologic.ru, <https://orcid.org/0009-0001-4486-7840>;

Михаил Олегович Демченко — кандидат экономических наук, советник генерального директора, dmo@scoliologic.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8422-8779>;

Алина Гусейновна Магомедова — врач — травматолог-ортопед, alinavr@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-3734-927X>.

Information about the authors:

Grigory A. Lein — Candidate of Medical Sciences, Orthopaedic Surgeon, General Director, lein@scoliologic.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7904-8688>;

Arina V. Behtereva — psychologist, Deputy General Director, behтерева@scoliologic.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5579-4362>;

Ivan V. Pavlov — candidate of Medical Sciences, Orthopaedic Surgeon, General Director, pavlov@scoliologic.ru, <https://orcid.org/0009-0001-4486-7840>;

Mihail O. Demchenko — Candidate of Economic Sciences, Advisor to the General Director, dmo@scoliologic.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8422-8779>;

Alina G. Magomedova — Orthopaedic Surgeon, alinavr@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-3734-927X>.

Вклад авторов:

Леин Г.А. — Концепция и дизайн исследования, редактирование текста.

Бехтерева А.В. — Проведение опроса, анализ полученных данных.

Павлов И.В. — Интерпретация полученных данных, написание текста.

Демченко М.О. — Статистическая обработка материалов исследования, анализ полученных данных.

Магомедова А.Г. — Проведение опроса, предварительный анализ данных.

Научная статья

УДК 612.766:616.831-009.12-053.7

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2026-32-4-499-509>

Оценка состояния пациентов подросткового возраста со спастическими формами церебрального паралича, поступивших на оперативное ортопедическое лечение: кросс-секционное исследование

Э.Р. Мингазов¹, О.Ф. Насипжанов¹, Т.И. Долганова¹, О.И. Гатамов², У.Ф. Мамедов¹, Д.А. Попков¹¹ Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова, Курган, Россия² Клинская Областная больница, Клин, Московская область, Россия**Автор, ответственный за переписку:** Дмитрий Арнольдович Попков, dropkov@mail.ru**Аннотация**

Введение. Детский церебральный паралич (ДЦП) является самым распространенным неврологическим заболеванием у детей, сопровождающимся двигательными нарушениями. Максимальным возрастом для выполнения реконструктивных вмешательств является граница двенадцати лет, но оптимальным возрастом для сохранения результата многоуровневых ортопедических вмешательств признается вторая половина подросткового периода. Анализ сформированных ортопедических нарушений и их влияния на походку, а также их особенностей в зависимости от ранее проведенных вмешательств представляет интерес с точки зрения определения оптимальных условий для выполнения реконструктивных операций на нижних конечностях у подростков.

Цель работы — в кросс-секционном сравнительном анализе оценить кинематические и кинетические параметры походки подростков с ДЦП (GMFCS I–III) перед ортопедической операцией; нулевая гипотеза — отсутствие различий в параметрах походки между пациентами с предшествующими ортопедическими операциями и теми, кто их не проходил.

Материалы и методы. В ретроспективное исследование включены 102 подростка 13–17 лет с ДЦП, разделенные на две группы: группа А (GMFCS I–II, $n = 63$) и группа Б (GMFCS III, $n = 39$). С учетом хирургического анамнеза в обеих группах выделено по три подгруппы. Всем пациентам проводили компьютерный видеоанализ походки. В анализе походки показатели представлены медианой с уровнем распределения процентилей 25 %–75 %. Для сравнения использовали непарный критерий Вилкоксона ($p \leq 0,05$). Взаимосвязь между параметрами оценивали с помощью ранговой корреляции Спирмена. Для сравнения встречаемости признака «паттерн crouch gait» применяли критерий хи-квадрат для бинарных выборов.

Результаты. Из характеристик походки отмечено преобладание нарушений движений в горизонтальной плоскости (вследствие торсионных деформаций) у ранее не оперированных пациентов уровня GMFCS I–II и возрастание доли паттерна crouch gait в остальных подгруппах. Зарегистрировано нарастание декомпенсированных типов crouch gait в подгруппах пациентов после ранних вмешательств на трицепсах голени. При этом выявлено достоверное отличие между группами 1А и 2А по признаку частоты встречаемости декомпенсированного crouch gait (критерий хи-квадрат, $p = 0,002$). Между прочими подгруппами достоверных различий по данному критерию не было.

Обсуждение. Системный характер нарушения двигательных функций у детей с ДЦП, а также возникающие ортопедические нарушения подразумевают не только оценку и наблюдение за отдельными ортопедическими нарушениями локомоторных цепей нижних конечностей, но и рассмотрение интегральных показателей движений (GPS), а также кинематических и кинетических данных во взаимосвязи.

Заключение. У пациентов уровня GMFCS I–II при отсутствии каких-либо ранее выполненных ортопедических вмешательств показания определяются контрактурами суставов и торсионными деформациями сегментов нижних конечностей, в то время как при уровне GMFCS III в подростковом возрасте преобладает паттерн crouch gait, остающийся компенсированным. У группы пациентов с выполненными в раннем возрасте удлиннениями трицепса голени наблюдали развитие компенсированных и декомпенсированных форм crouch gait с высокой энергоемкостью движений, что необходимо учитывать как при выборе тактики хирургического лечения, так и при проведении последующих реабилитационных мероприятий и ортезировании. При выполнении многоуровневых вмешательств в предыдущий период, у подростков показаниями к оперативному лечению оставались торсионные деформации, рецидивы контрактур, развитие сгибательной установки коленного сустава, однако пространственно-временные и силовые характеристики движений при этом оставались на сравнительно высоком уровне.

Ключевые слова: спастическая диплегия, кросс-секционное исследование, crouch gait, подростки

Для цитирования: Мингазов Э.Р., Насипжанов О.Ф., Долганова Т.И., Гатамов О.И., Мамедов У.Ф., Попков Д.А. Оценка состояния пациентов подросткового возраста со спастическими формами церебрального паралича, поступивших на оперативное ортопедическое лечение: кросс-секционное исследование. *Гений ортопедии*. 2026;32(4):499–509. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-4-499-509.



Evaluation of the condition of adolescent patients with spastic types of cerebral palsy admitted for orthopedic surgery: a cross-sectional study

E.R. Mingazov¹, O.F. Nasipzhanov¹, T.I. Dolganova¹, O.I. Gatamov², U.F. Mamedov¹, D.A. Popkov¹✉

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

² Klin Regional Hospital, Klin, Moscow Region, Russian Federation

Corresponding author: Dmitry A. Popkov, dpopkov@mail.ru

Abstract

Introduction Cerebral palsy (CP) is the most common neurological disorder in children, associated with movement disorders. The maximum age for reconstructive surgery is twelve years, but the optimal age for maintaining the results of multi-level orthopedic interventions is considered to be the second half of the adolescence period. Analysis of established orthopedic impairments and their impact on gait, as well as their characteristics depending on previous interventions, is of interest for determining the optimal conditions for reconstructive surgery on the lower extremities in adolescents.

The **purpose** of this study was to evaluate the kinematic and kinetic gait parameters of adolescents with cerebral palsy (GMFCS I–III) before orthopedic surgery using a cross-sectional comparative analysis. The null hypothesis was the absence of differences in gait parameters between patients with previous orthopedic surgery and those who did not undergo it.

Materials and methods This retrospective study included 102 adolescents aged 13–17 years with cerebral palsy, divided into two groups: Group A (GMFCS I–II, $n = 63$) and Group B (GMFCS III, $n = 39$). Three subgroups were identified in each group based on surgical history. All patients underwent computer video gait analysis. The gait analysis presents the parameters as medians with a percentile distribution level of 25 %–75 %. The unpaired Wilcoxon test ($p \leq 0.05$) was used for comparison. The relationship between the parameters was assessed using Spearman's rank correlation. The chi-square test for binary samples was used to compare the incidence of the crouch gait pattern.

Results Gait characteristics revealed a predominance of horizontal movement disorders (due to torsional deformities) in previously unoperated GMFCS I–II patients, while the prevalence of crouch gait increased in the remaining subgroups. An increase in decompensated crouch gait patterns was observed in the subgroups of patients who underwent early triceps surae interventions. A significant difference was found between groups 1A and 2A in the incidence of decompensated crouch gait (chi-square test, $p = 0.002$). No significant differences were found between the other subgroups.

Discussion The systemic nature of motor impairments in children with cerebral palsy and the resulting orthopedic disorders, necessitate not only the assessment and monitoring of individual orthopedic impairments of the lower extremity locomotor chains but also the consideration of integrated movement indices (GPS), as well as kinematic and kinetic data in their interrelationships.

Conclusion In patients with GMFCS levels I–II and no previous orthopedic interventions, indications for surgical treatment are determined by joint contractures and torsional deformities of the lower extremity segments. In patients with GMFCS level III, the crouch gait pattern, which remains compensated, predominates in adolescence. In the group of patients with triceps surae lengthening performed at an early age, the development of compensated and decompensated types of crouch gait with high-energy movements was observed. This should be taken into account both when choosing a surgical treatment strategy and during subsequent rehabilitation measures and orthotics. In adolescents with previous multilevel interventions, torsional deformities, recurrent contractures, and the development of knee flexion remained indications for surgical treatment. However, the spatiotemporal and strength characteristics of movements remained relatively high.

Keywords: spastic diplegia, cross-sectional study, crouch gait, adolescents

For citation: Mingazov ER, Nasipzhanov OF, Dolganova TI, Gatamov OI, Mamedov UF, Popkov DA. Evaluation of the condition of adolescent patients with spastic types of cerebral palsy admitted for orthopedic surgery: a cross-sectional study. *Genij Ortopedii*. 2026;32(4):499–509. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-4-499-509.

ВВЕДЕНИЕ

Церебральный паралич (детский церебральный паралич, ДЦП) является самым распространенным неврологическим заболеванием у детей, сопровождающимся двигательными нарушениями [1]. Отмечается значимая гетерогенность симптомов ДЦП, включая аспекты этиологии, клинических проявлений, нарушений движений и позы, функциональной тяжести, эволюции нарушений, в т.ч. развитие ортопедических осложнений [2, 3]. Такая гетерогенность затрудняет мониторинг состояния пациентов, особенно с точки зрения эволюции нарушений на протяжении длительного временного периода.

В среднем 50–80 % детей с ДЦП развивают способность к ходьбе [4]. Однако у них наблюдается широкий спектр отклонений как кинематических, так и кинетических параметров. Суммирующим объективным исследованием в оценке походки признан компьютерный анализ походки, позволяющий достоверно отслеживать эволюцию движений на протяжении всего периода наблюдения [1, 5].

Фактором, ведущим к снижению двигательных возможностей детей с ДЦП вплоть до потери способности самостоятельного перемещения, является развитие вторичных ортопедических осложнений [6]. Метод многоуровневых хирургических вмешательств в настоящее время признан и остается наиболее эффективным способом коррекции этих вторичных ортопедических проблем [7, 8].

Н.К. Graham, резюмируя многолетний клинический опыт, выделяет два периода, совпадающих по возрасту (4–12 лет), когда место ортопедической хирургии становится обоснованным, — период контрактур и период костных деформаций [9]. В данные периоды характер ортопедической хирургии носит реконструктивный характер, а паллиативные элементы операций (артродезы, реориентирующие остеотомии) еще не находят свои показания. В публикациях B.J. Shore et al. [10], P. Thomason et al. [11], M. Gough et al. [12] подчеркивается, что предельным возрастом для реконструктивных ортопедических вмешательств на нижних конечностях является период не старше 12 лет. С другой стороны, оптимальным возрастом выполнения многоуровневых вмешательств признается период второй половины пубертатного ускорения роста (13–16 лет), когда риск рецидивов ортопедических проблем снижается [13, 14]. C. Putz et al. [15] указывают на существенное снижение эффекта от многоуровневых вмешательств при выполнении операции в детском возрасте. Другие авторы указывают на стабильность положительного эффекта от многоуровневых операций, но только после двухлетнего интервала [16]. Таким образом, существует диссонанс, когда максимальным возрастом для выполнения реконструктивных вмешательств является граница двенадцати лет, но оптимальным возрастом для сохранения результата многоуровневых ортопедических вмешательств признается вторая половина подросткового периода.

Кроме того, существует достаточно широкая когорта пациентов, выявления показаний к операциям у которых происходит достаточно поздно, уже в подростковом возрасте [17, 18]. Первоначальным этапом определения оптимальных условий для выполнения реконструктивных операций на нижних конечностях у подростков является анализ сформированных ортопедических нарушений и их влияния на походку, а также их особенностей в зависимости от ранее проведенных вмешательств.

Цель работы — в кросс-секционном сравнительном анализе оценить кинематические и кинетические параметры походки подростков с ДЦП (GMFCS I–III) перед ортопедической операцией; нулевая гипотеза — отсутствие различий в параметрах походки между пациентами с предшествующими ортопедическими операциями и теми, кто их не проходил.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данное ретроспективное исследование включены 102 пациента со спастической формой церебрального паралича, которым проводили двустороннее ортопедическое многоуровневое вмешательство.

Критерии включения:

- возраст второй половины подросткового периода (от 13 до 18 лет);
- возможность оценки результатов компьютерного анализа походки, уровни поражения глобальных моторных функций — I, II, III GMFCS;
- интервал не менее шести месяцев после сеанса ботулинотерапии;
- отсутствие в анамнезе выполнения селективной дорзальной ризотомии;
- интервал не менее трех лет после последней ортопедической операции на нижних конечностях.

Критерии не включения: более тяжелые уровни нарушения глобальных моторных функций; недостаточное проведение или отсутствие инструментального анализа походки; возраст на момент выполнения многоуровневого вмешательства младше 13 и старше 18 лет.

В соответствии с уровнем нарушения глобальных моторных функций пациенты разделены на две группы: группа А (GMFCS I–II, $n = 63$) и группа Б (GMFCS III, $n = 39$).

Внутри каждой группы, учитывая хирургический анамнез, пациенты разделены на три подгруппы:

- 1А и 1Б — пациенты, которым ранее не проводили хирургические вмешательства на мышечном аппарате нижних конечностей;
- 2А и 2Б — пациенты, которым выполняли вмешательства на трицепсах голени (удлинение ахиллова сухожилия или чрескожные «малоинвазивные» фибромиотенотомии) в раннем возрасте;
- 3А и 3Б — пациенты, которым выполняли многоуровневые ортопедические вмешательства.

Помимо клинико-лучевого обследования пациентам проводили компьютерный анализ походки, во время которого они ходили самостоятельно или придерживаясь за одну руку родителя босиком на семиметровой дорожке с привычной для них скоростью. Кинематические данные регистрировали оптическими камерами Qualisys 7+ с технологией видеозахвата пассивных маркеров; синхронизированными с шестью динамометрическими платформами KISTLER (Швейцария). При установке маркеров использовали модель IOR. Анализ кинематики и кинетики проводили в программах QTM (Qualisys) и Visual3D (C-Motion) с автоматизированным расчетом значений. В качестве нормы соответствующих возрастных параметров использовали результаты ранее проведенного анализа походки у когорты детей без двигательных нарушений [19].

Для статистической обработки данных применяли программу AtteStat 12.0.5 (© 2002–2025 Igor Gaydyshev). Популяционные показатели представлены средними значениями со стандартным отклонением. Исследование гипотезы соответствия количественных параметров походки нормальному распределению по критерию Колмогорова при уровне значимости $\leq 0,05$ показало, что гипотеза нормальности отвергается. Именно поэтому в выборочных совокупностях (выделенных подгруппах) показатели анализа походки представлены в виде медианы с уровнем распределения процентилей 25 %÷75 %. Статистическую значимость различий определяли с использованием непарного критерия Вилкоксона с принятием уровня значимости $p \leq 0,05$. Взаимосвязь между параметрами оценивали с помощью ранговой корреляции Спирмена. Для сравнения встречаемости признака «паттерн crouch gait» применяли критерий хи-квадрат для бинарных выборов.

На проведение исследований получено разрешение комитета по этике НМИЦ ТО имени академика Г.А. Илизарова. Исследования проводили в соответствии с этическими стандартами Хельсинской декларации Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» с поправками 2000 г., «Правилами клинической практики в Российской Федерации», утвержденными Приказом Минздрава РФ от 19.06.2003 № 266. Родители детей, участвовавших в исследовании, давали информированное согласие на публикацию результатов и присутствовали при проведении исследования.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Распределение демографических признаков и типов походки пациентов по подгруппам представлена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика пациентов

Параметр	GMFCS I–II			GMFCS III		
	1А	2А	3А	1Б	2Б	3Б
Количество пациентов	29	21	13	12	15	12
Возраст, лет	14,9 ± 1,2	15,2 ± 1,3	15,4 ± 1,98	14,6 ± 1,3	14,9 ± 1,5	15,1 ± 2,4
Пол, Ж/М	13/16	9/12	5/8	5/7	9/6	7/5
ИМТ	17,9 ± 3,9	19,4 ± 2,8	18,4 ± 3,22	19,3 ± 4,2	20,2 ± 3,7	19,6 ± 2,8
Тип/особенности походки						
Equinus gait с ротационными отклонениями	4	1	3	–	–	–
Jump gait с ротационными отклонениями	10	3	1	2	2	–
Apparent equinus	2	1	–	1	–	–
Crouch gait компенсированный	12	7	3	7	5	5
Crouch gait декомпенсированный	1	4	1	2	4	1
Crouch gait+stiff knee gait	–	5	–	–	2	1
Ротационные отклонения, изолированные	–	–	4	–	1	–
Пяточная установка и ротационные отклонения	–	–	1	–	–	–
Ротационные отклонения и stiff knee gait	–	–	–	–	1	2
Flexed knee и ротационные отклонения	–	–	–	–	–	3

Данные табл. 1 показывают отсутствие различий по возрасту, полу и индексу массы тела (ИМТ) между подгруппами пациентов. Из характеристик походки отметим преобладание нарушений движений в горизонтальной плоскости (вследствие торсионных деформаций) у ранее неоперированных пациентов уровня GMFCS I–II и возрастание доли паттерна crouch gait в остальных подгруппах. Очевидным является нарастание доли декомпенсированных типов crouch gait в подгруппах пациентов после ранних вмешательств на трицепсах голеней. При этом выявлено достоверное отличие между подгруппами 1А и 2А по признаку частоты встречаемости декомпенсированного crouch gait (критерий хи-квадрат, $p = 0,002$). Между прочими подгруппами достоверных различий по данному критерию не было.

При сравнении пространственно-временных характеристик походки (табл. 2) между подгруппами пациентов уровня GMFCS I–II становится очевидным, что наихудшие показатели параметров отмечаются в подгруппе 2А (ранние изолированные удлинения трицепса голени): достоверно ниже скорость походки и длина периода шага, увеличена ширина шага и длительность периода двуопорной фазы, что отражает неустойчивость положения тела.

Таблица 2

Индекс походки, пространственно-временные характеристика походки

Параметр	GMFCS I–II			GMFCS III		
	1А	2А	3А	1Б	2Б	3Б
Индекс походки (GPS — gait profile score), °	12 (10,7÷15,6)	14,9 (13,68÷17,43)*	12,1 (11,4÷13,7)	20,2 (16,0÷23,9)	16,1 (15,0÷18,9)	14,5 (14,3÷15,9)* ¹
Скорость, м/сек	0,93 (0,67÷1,05)	0,65 (0,53÷0,84)*	0,84 (0,66÷1,0) ¹	0,71 (0,58÷0,78)	0,65 (0,44÷0,76)	0,42 (0,38÷0,49)* ¹
Длина периода шага, м	1,03 (0,85÷1,12)	0,84 (0,68÷0,95)*	0,95 (0,86÷1,07) ¹	0,8 (0,76÷0,91)	0,78 (0,56÷0,93)	0,74 (0,57÷0,79)
Ширина шага, м	0,13 (0,1÷0,18)	0,17 (0,14÷0,19)*	0,17 (0,14÷0,23)* ¹	0,14 (0,135÷0,16)	0,15 (0,14÷0,18)	0,19 (0,17÷0,20)* ¹
Количество циклов шага/мин	53,5 (48,4÷59)	51,5 (47,85÷55,45)	53,5 (51,65÷56,38)	51,4 (42,4÷55,6)	47,6 (41,6÷54,2)	39,8 (29,2÷46,3)* ¹
Длительность периода опоры от цикла шага, %	62,8 (61,85÷66,55)	65,7 (64,15÷72,35)*	64,1 (62,7÷67,45) ¹	64,1 (62,1÷68,9)	69,0 (66,3÷72,9)*	72,1 (68,0÷76,8)*
Длительность периода переноса от цикла шага, %	36,9 (33,13÷38,28)	33,9 (27,65÷35,48)*	35,9 (32,8÷37,6) ¹	35,4 (30,9÷38,3)	31,1 (27,4÷33,9)*	27,8 (22,4÷31,9)*
Длительность двойного двуопорного периода от цикла шага, %	25,9 (24,85÷31,23)	32,3 (28,18÷44,98)*	29,7 (26,7÷32,8)* ¹	29,8 (26,2÷35,9)	36,7 (30,4÷46)*	39,1 (36,4÷45,2)*

Примечание: * — достоверные отличия с подгруппой 1А по идентичному уровню GMFCS; ¹ — достоверные отличия между группами 2 и 3 по идентичному уровню GMFCS.

Параметры в подгруппе 2А (GMFCS III) отражают закономерную деградацию параметров ходьбы, коррелирующую с развитием паттерна crouch gait: значительное увеличение индекса нарушений движений (GPS), ширины шага и длительности двуопорного периода при сохранении сравнительно высокой скорости ходьбы.

В контексте сравнения скорости ходьбы и GPS интересным представляется сочетание низких значений GPS и сравнительно медленной скорости ходьбы у пациентов с ранее выполненными многоуровневыми вмешательствами (подгруппа 3Б). Можно сказать, что они ходят медленнее, но движения (амплитуда, ее распределение) в суставах нижних конечностей ближе к нормальным параметрам.

Кинематические данные (табл. 3) в группе 1 (GMFCS I–II) характеризуют развитие паттерна crouch gait преимущественно у пациентов после изолированного удлинения трицепса в раннем периоде, — постоянная позиция стопы в тыльной флексии, избыточное сгибание коленного сустава как в момент первичного контакта, так и в опорную фазу (с максимальным средним сгибанием 35,6° в точке Г1), что сопровождается значимым снижением амплитуды движений в суставе на протяжении всего цикла шага в сравнении с подгруппами 1А и 3А. Обращает внимание и снижение амплитуды подошвенного сгибания в момент толчка в подгруппе 3А и его отсутствие в подгруппе 2А. Установка стопы в положении подошвенной флексии при первичном контакте и достоверно увеличенная амплитуда ротационных движений в подгруппе 1А в сравнении с подгруппами 2А и 3А свидетельствуют о преобладании особенностей движений паттернов jump gait и equinus gait у пациентов, ранее не оперированных.

В группе 2 (GMFCS III) во всех подгруппах наблюдается избыточное сгибание коленного сустава в момент первичного контакта, однако наименее выраженное в подгруппе 3Б. Достаточное активное подошвенное сгибание стопы в момент пропульсии присутствует лишь в подгруппах 1Б и 3Б, что указывает на сохранение функции подошвенных флексоров в отличие от подгруппы 2Б. Максимальное разгибание коленного сустава в опорную фазу можно считать достаточным лишь в подгруппе 3Б,

что отражает эффективность ранее выполненных многоуровневых вмешательств для коррекции патологии движений в сагиттальной плоскости. Однако значимое увеличение ротационных движений тазом и бедром в этой же подгруппе указывает на сохранение торсионных деформаций сегментов нижних конечностей и присутствие показаний к их коррекции. Для неоперированных пациентов и пациентов после ранних вмешательств на трехглавых мышцах голени характерны значимые элементы паттерна crouch gait (избыточное сгибание в коленном суставе в опорную фазу) либо полноценное формирование данного паттерна.

Таблица 3

Отдельные кинематические параметры

Параметр	GMFCS I–II			GMFCS III		
	1А	2А	3А	1Б	2Б	3Б
Позиция стопы при первичном контакте (Г0), °	-2,5 (-9,1÷4,4)	6,4 (1,7÷10,8)*	5,7 (0,3÷7,1)*	5,1 (-2,8÷9,75)	7,9 (2,6÷10,5)	-1,1 (-7,5÷3,1) ¹
Максимальная тыльная флексия в опорную фазу (Г2), °	13,1 (7,3÷15,9)	17,9 (13,7÷24,4)*	15,3 (10,7÷19,6)	19 (9,9÷24,14)	24,5 (14,9÷29,8)	11,7 (8,8÷13,98) ¹
Максимальное подошвенное сгибание при пропульсии (Г3), °	-7,4 (-17,7÷-0,6)	4,8 (-0,95÷9,95)*	0,3 (-6,9÷6,5)*	-5,3 (-11,2÷7,58)	1,8 (-4,4÷9,05)*	-3,1 (-7,4÷2,95)
Позиция стопы в фазу переноса (Г4), °	5,9 (-3,5÷13,9)	14,6 (9,7÷19)*	11,8 (6,2÷14,5)	11,4 (1,98÷15,95)	13,2 (7,7÷18,4)	3,3 (-0,6÷12,3) ¹
Позиция колена при первичном контакте (К0), °	21,7 (14÷30)	33 (28,3÷40,2)*	22,2 (16,6÷26,7) ¹	46,9 (29,85÷55,3)	45,9 (29,2÷48,7)	28,7 (25,1÷35,2)* ¹
Максимальное сгибание коленного сустава в опорную фазу (К1), °	28,6 (22,7÷33,2)	35,6 (31,9÷43,4)*	28,3 (19,2÷31,5) ¹	52,3 (30,8÷56,9)	47,9 (26,7÷52,0)	31,4 (29,2÷35,1)* ¹
Максимальное разгибание коленного сустава в опорную фазу (К2), °	9,5 (5,4÷15,4)	22,7 (14,8÷31,3)*	5,4 (1,6÷10,7) ¹	35,9 (22,8÷45,4)	33,7 (10,4÷41,7)	9,6 (1,38÷21,6)* ¹

Кинетические данные (табл. 4) показывают сохранение достаточного уровня силовых характеристик подошвенных сгибателей после многоуровневых вмешательств в подгруппе 3А, что не требует компенсаторного увеличения мощности движений коленным суставом в отличие от подгрупп 1А и 2А. В группах более тяжелого нарушения глобальных моторных функций (GMFCS III) отмечаются высокие значения генерируемой мощности для обеспечения походки в подгруппе 2Б, что отражает повышенную энергоёмкость ходьбы как таковой. Достоверно низкие усилия разгибания коленного сустава на фоне достаточной амплитуды разгибания в опорную фазу в подгруппе многоуровневых вмешательств вновь указывают на сравнительное благополучие движений в сагиттальной плоскости после многоуровневых вмешательств. Высокие значения момента разгибания тазобедренного сустава и генерируемой мощности движений бедром отражают увеличенный вклад в обеспечение походки мышц тазового пояса во всех подгруппах. Наконец, в подгруппе 2Б необходимость генерации высоких значений мощности движений в коленном и голеностопном суставах вновь свидетельствуют о повышенной энергоёмкости ходьбы после ранних изолированных вмешательств на трицепсах голени.

Выявлены некоторые умеренные и сильные корреляции между кинематическими, пространственно-временными и кинетическими параметрами во всех подгруппах, кроме подгруппы 1А. Отрицательная корреляция ИМТ-скорость ходьбы (-0,521) в подгруппе 2А закономерно отражает критичное значение массы тела для замедления передвижения при хирургическом ослаблении функции подошвенного толчка после ранних операций, даже у пациентов с умеренными неврологическими нарушениями. Во многих подгруппах сила подошвенного сгибания стопы имела положительную достоверную корреляцию со скоростью ходьбы: подгруппы 2А (0,631), 1Б (0,738), 2Б (0,797), 3Б (0,673). При этом скорость ходьбы снижается при увеличении амплитуды движений в голеностопном суставе, как следствие появления патологической избыточной тыльной флексии стопы у пациентов уровня GMFCS III, — корреляция становится отрицательной для подгрупп 1Б (-0,761) и 3Б (-0,689). На важность силы подошвенного сгибания указывает и отрицательная корреляция этого параметра с GPS (-0,522) в подгруппе 3А. Положительная корреляция между амплитудой разгибания коленного сустава (К1–К2) в опорную фазу и эффективностью генерируемой мощности при движениях в коленном суставе в подгруппе 2А отражает достаточный компенсаторный потенциал даже при раннем ослаблении подошвенных сгибателей. Однако при более тяжелом уровне нарушений глобальных моторных функций (GMFCS III) проявляется значимая положительная корреляция между GPS и кинематическими или кинетическими параметрами и в подгруппе 3Б. Это отражает развитие декомпенсации функциональных возможностей на фоне ортопедических нарушений: с силой разгибания тазобедренного сустава (0,522), с силой разгибания коленного сустава (0,533), с суммарной мощностью движений в коленном (0,739) и голеностопном (0,565) суставах. При этом для данной подгруппы выявлена положительная корреляция ИМТ с силой

разгибания коленного сустава (0,630) и подошвенной флексии стопы (0,649). Кроме того, обнаружена положительная корреляция значений ИМТ и суммарной генерируемой мощности движений в голеностопном суставе (0,543), что отражает сохранение адаптационных возможностей подошвенных флексоров у пациентов после многоуровневых вмешательств. Наконец, отметим важность выявленной значимой отрицательной корреляции «GPS-амплитуда движений в сагиттальной плоскости в тазобедренном суставе» (–0,619) в подгруппе 1Б, вероятно, отражающей возможность компенсации снижений двигательных возможностей коленного и голеностопного суставов увеличением двигательной активности мышц тазового пояса.

Таблица 4

Отдельные кинетические параметры

Параметр	GMFCS I–II			GMFCS III		
	1А	2А	3А	1Б	2Б	3Б
Момент силы разгибания тазобедренного сустава, Nm/kg	0,9 (0,66÷1,07)	0,9 (0,76÷1,34)	0,8 (0,66÷0,98)	1,11 (0,79÷1,17)	0,94 (0,63÷1,18)	0,83 (0,49÷0,97)
Момент силы разгибания коленного сустава, Nm/kg	0,6 (0,38÷0,81)	0,7 (0,49÷0,96)*	0,7 (0,48÷0,84)	1,0 (0,61÷1,18)	0,89 (0,63÷1,15)	0,53 (0,33÷0,87)* ¹
Момент силы подошвенного сгибания, Nm/kg	1,04 (0,89÷1,2)	0,99 (0,71÷1,21)	1,12 (1,03÷1,29) ¹	0,81 (0,55÷0,88)	0,9 (0,74÷0,99)*	0,87 (0,85÷0,93)*
Полезная мощность, генерируемая на уровне тазобедренного сустава, W/kg	0,34 (0,06÷0,86)	0,48 (0,23÷0,86)	0,29 (0,04÷0,64)	0,47 (0,36÷0,85)	0,55 (0,4÷0,83)	0,27 (0,04÷0,57) ¹
Полезная мощность, генерируемая на уровне коленного сустава, W/kg	–0,45 (–0,74÷–0,09)	–0,24 (–0,69÷0,01)	–0,01 (–0,58÷0,02) ¹	–0,21 (–0,61÷0,01)	–0,34 (–0,71÷–0,03)	–0,02 (–0,23÷0,0) ¹
Полезная мощность, генерируемая на уровне голеностопного сустава, W/kg	0,17 (–0,01÷1,12)	0,2 (–0,06÷0,42)	0,17 (0,03÷0,63)	0,15 (–0,01÷0,38)	0,29 (0,01÷0,45)	0,01 (–0,06÷0,07) ¹

ОБСУЖДЕНИЕ

Крайне важным элементом патогенеза двигательных нарушений и вторичных ортопедических осложнений является прогрессирующее на протяжении взросления организма уменьшение объема пассивных движений [20]. Развитие дефицита длины мышц, первоначально обусловленное спастичностью, эволюционирует в направлении ретракции [21]. Отмечаемые морфологические изменения в мышцах сопровождаются увеличением длины саркомеров, снижением числа сателлитных клеток и увеличением содержания коллагеновых структур, что обуславливает уменьшение силы сокращения, снижение регенераторного потенциала и увеличение жесткости мышц, наблюдаемых на фоне других ортопедических осложнений ДЦП [22, 23].

В клинической практике выполнение многоуровневых вмешательств обычно проводят в возрасте 11–15 лет, что сопровождается стабильностью результата операции без его регрессии, особенно если вмешательство выполнено после пубертатного ускорения роста [24, 25]. В возрасте старше 12 лет часто уже невозможно полноценное анатомическое восстановление структур и взаимоотношений между сегментами конечностей, пропорциями мышц, а нередко единственным решением остается паллиативная ортопедическая хирургия при crouch gait [9, 26]. Именно поэтому Н.К. Graham et al. [9] выделяют возрастной период 4–12 лет (период контрактур и костных деформаций), когда место ортопедической хирургии становится обоснованным. В данные периоды характер ортопедической хирургии носит реконструктивный характер, а паллиативные вмешательства еще не находят своих показаний.

Подростковый возраст, после прохождения пика ускорения роста на нижних конечностях, еще относится к периоду детства и может интерпретироваться как старший школьный возраст [27, 28]. В этом возрасте по-прежнему существует немалая когорта пациентов, имеющих показания к хирургической коррекции осложнений ДЦП [17, 18]. Особенностью выполнения операций и прогноза их результата является отсутствие ремоделирующего потенциала в процессе резидуального роста и начало развития ранних артрозных изменений [9, 15]. Именно поэтому в подростковом возрасте, когда пубертатное ускорение роста замедляется, а у ребенка постепенно увеличивается ИМТ, оперативное лечение часто направлено уже на коррекцию паттерна crouch gait [9]. При этом результаты коррекции ввиду прекращения активного продольного роста длинных костей нижних конечностей остаются относительно стабильными в отдаленном периоде [7, 15].

Причиной сравнительно позднего выполнения ортопедического вмешательства, часто носящего уже паллиативный характер, могут являться различные факторы. Ряд авторов находит объяснение такой ситуации в недостаточной организации системы здравоохранения. Причинами отсутствия преем-

ственного и комплексного подхода лечения детей с ДЦП называют невысокую доступность медицинской помощи, недостаточную информированность врачей о методах лечения с высокой доказательной базой, позднюю диагностику заболевания и недостаточную информированность родителей пациентов о характере заболевания и эффективности различных методов лечения, а также отсутствие национальных регистров [29, 30, 31].

Неблагоприятным фактором, объединяющим возрастные и хирургические аспекты, является выполнение так называемых фибромиотенотомий, фибротомий, а также удлинений ахиллова сухожилия в раннем возрасте. Необоснованное ортопедическое вмешательство на спастичных мышцах, даже увеличивая пассивную амплитуду движений в суставах, ведет к их чрезмерному ослаблению, что проявляется ранней функциональной декомпенсацией и развитием ятрогенных нарушений, ортопедических осложнений в подростковом возрасте, имеющих результатом формирование ятрогенного паттерна crouch gait [5, 32, 33].

Отметим, что существует определенная группа пациентов, в которой коррекцию ортопедических осложнений ДЦП даже при выполнении многоуровневых вмешательств производили не в полном объеме, в частности, коррекция торсионных деформаций не была выполнена [34, 35, 36]. В некоторых случаях возможны рецидивы контрактур, что также может потребовать повторных вмешательств, частота которых (без учета удаления материала остеосинтеза) в отдаленном периоде после первичных многоуровневых операций достигает 39 %. Так, T. Terjesen et al. [25] указывают на развитие легкой эквинусной установки стопы через три–четыре года наблюдения при нормальных показателях кинематики в опорную фазу, что сопровождается прогрессивным уменьшением амплитуды тыльной флексии в процессе последующего роста со средним темпом 4° в год. Наконец, планирование объема многоуровневых вмешательств без использования компьютерного анализа походки повышает риск неполноценности, недостаточности или неточности величины хирургической коррекции, что требует в будущем выполнения повторных вмешательств [37, 38].

В нашем исследовании параметры движений при ходьбе существенно различались между подгруппами. У пациентов с нетяжелым уровнем нарушения глобальных моторных функций (GMFCS I–II) и при отсутствии каких-либо ранее выполненных ортопедических вмешательств доминирующими элементами нарушения походки являлись ротационные нарушения движений и контрактуры коленных и голеностопных суставов. При этом кинетические характеристики движений оставались сравнительно сохраненными. И, соответственно, оперативные вмешательства, которые показаны в данной ситуации, носили строго реконструктивный характер, так как отсутствовала декомпенсация движений в сагиттальной плоскости. В группе пациентов с такими же нетяжелыми двигательными нарушениями (GMFCS I–II), но с выполненными в раннем возрасте операциями изолированного удлинения трицепса, в большинстве случаев наблюдали декомпенсацию двигательных нарушений с развитием ятрогенного паттерна crouch gait, сопровождавшегося как ухудшением пространственно-временных характеристик походки, так и увеличением ее энергоемкости. В подгруппе многоуровневых вмешательств у пациентов GMFCS I–II показания к оперативному лечению были обусловлены отдельными нерешенными ортопедическими проблемами, — ротационными установками или рецидивами контрактур.

Мы полагаем, что в подгруппе уровня GMFCS III без ранее выполненных оперативных вмешательств двигательные расстройства естественным образом отражали финальную точку в формировании типичного паттерна crouch gait с полной характеристикой ухудшения пространственно-временных показателей и увеличения энергоемкости движений, но с преобладанием компенсированных форм. В подгруппе подростков с характеристикой нарушений глобальных движений этого же уровня (GMFCS III), но после изолированных вмешательств на трицепсе голени, преобладали декомпенсированные формы crouch gait. В подгруппе после ранее перенесенных многоуровневых вмешательств у пациентов уровня GMFCS III нарушения характеризовались ротационными отклонениями, сгибательной установкой коленного сустава без избыточной тыльной флексии стопы, компенсированным паттерном crouch gait. При этом сохранялись адаптационные возможности подошвенных флексоров у пациентов после многоуровневых вмешательств, а интегральный показатель GPS имел наименьшие значения для пациентов уровня GMFCS III.

В целом можно отметить, что наилучшие значения пространственно-временных показателей ходьбы и отсутствие паттерна crouch gait отмечается у пациентов, у которых сохранены достаточные силовые характеристики подошвенного сгибания и отсутствует избыточное тыльное сгибание стопы в опорную фазу. Подтверждением этому служит и достоверная отрицательная корреляция в подгруппе 2Б между ИМТ и скоростью ходьбы, а также отрицательная корреляция между суммарной амплитудой движений в голеностопном суставе и скоростью ходьбы.

Существует естественная эволюция двигательных нарушений в направлении паттерна crouch gait, развивающегося в подростковом возрасте у пациентов со спастической диплегией, обусловленная, среди прочего, торсионными деформациями бедренных костей, деформацией стоп и высокой позицией надколенников [9, 25, 35, 39]. Однако предиктором данной неблагоприятной эволюции,

как очевидно доказали исследования G. Pilloni et al. [32], является хирургическое ослабление подошвенных сгибателей, что ведет к увеличению минимального сгибания коленного сустава в опорную фазу. В исследовании N.M. Bernthal et al. [40] отмечено, что декомпенсация разгибательной функции нижней конечности первоначально проявлялась тенденцией избыточной тыльной флексии стопы в опорную фазу. В нашем исследовании очевидное неблагополучие параметров ходьбы у подростков, имеющих в анамнезе изолированное удлинение трицепса, подтверждает негативный эффект от чрескожных фибромиотенотомий, удлинений ахиллова сухожилия, который проявляется в старшем детском и подростковом возрасте.

Ограничениями нашего исследования являются: характере кросс-секционного исследования, отсутствии ретроспективного анализа кинематических и кинетических параметров походки у данной группы пациентов; сравнительно небольшое количество пациентов в сравниваемых группах; сравнение групп, разделенных по признаку уровня поражения глобальных моторных функций, но без углубленного неврологического анализа. Кроме того, в исследование не включены пациенты, которым ранее проводили многоуровневые вмешательства, но в отдаленном периоде не возникли показания к повторным хирургическим вмешательствам. Для получения исчерпывающего заключения о двигательном статусе изучаемых групп пациентов мы планируем в следующих работах провести сопоставления данных с параметрами ходьбы по шкале FMS, а также оценить качество жизни пациентов, что даст более полную картину состояния пациентов с ДЦП подросткового возраста, поступающих для ортопедического хирургического лечения. Наконец, отметим, что целью исследования было не сравнение групп пациентов, а именно выявление характерных особенностей двигательных нарушений, позволяющих описать и индивидуализировать категории нарушений походки у пациентов подросткового возраста, поступающих для оперативного лечения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

У пациентов со спастической диплегией, поступивших для оперативного лечения в подростковом возрасте, показания к ортопедическому вмешательству определяют уровнем нарушений глобальных моторных функций, а также типом и полнотой ранее выполненным оперативным вмешательствам. При отсутствии каких-либо ранее выполненным оперативным вмешательствам у пациентов уровня GMFCS I–II показания определяют наличием контрактур суставов и торсионных деформаций сегментов нижних конечностей, в то время как при уровне GMFCS III в подростковом возрасте преобладает паттерн crouch gait, остающийся компенсированным. У группы пациентов с выполненными в раннем возрасте удлинениями трицепса голени в нашем исследовании наблюдалось развитие компенсированных и декомпенсированных форм crouch gait с высокой энергоемкостью движений, что необходимо учитывать при выборе тактики хирургического лечения, проведении последующих реабилитационных мероприятий и ортезировании. При выполненных многоуровневых вмешательствах в предыдущий период показаниями к оперативному лечению у подростков являлись торсионные деформации, рецидивы контрактур, развитие сгибательной установки коленного сустава, однако пространственно-временные и силовые характеристики движений при этом оставались на сравнительно высоком уровне.

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

Источник финансирования. Дополнительные источники финансирования не привлекались.

Этическая экспертиза. На проведение исследований получено разрешение комитета по этике НМИЦ ТО имени академика Г.А. Илизарова от 17.05.2018 № 2(57).

Информированное согласие. Пациенты или родители пациентов / уполномоченные сотрудники социальных учреждений подтверждали согласие на проведение исследования и публикацию результатов без идентификации личности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Valluri H, Mohanty M, Mongil CR, et al. Investigating the burden of cerebral palsy in low- and middle-income countries: Implications and priorities for pediatric neurology. *Semin Pediatr Neurol.* 2025;55:101225. doi: 10.1016/j.spen.2025.101225.
- Rosenbaum P, Paneth N, Leviton A, et al. A report: the definition and classification of cerebral palsy April 2006. *Dev Med Child Neurol Suppl.* 2007;109:8-14.
- Томов А.Д., Бабайцев А.В., Кадырова М.А. и др. Паттерны роста у детей с церебральным параличом и спектр проводимого лечения: кросс-секционное исследование данных пяти реабилитационных центров. *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова.* 2025;32(1):35-43. doi: 10.17816/vto626900.
- Armand S, Decoulon G, Bonnefoy-Mazure A. Gait analysis in children with cerebral palsy. *EFORT Open Rev.* 2016;1(12):448-460. doi: 10.1302/2058-5241.1.000052.
- Долганова Т.И., Долганов Д.В., Чибиров Г.М. и др. Количественные параметры кинетики и кинематики ятрогенного crouch паттерна. *Гений ортопедии.* 2022;28(5):675-683. doi: 10.18019/1028-4427-2022-28-5-675-683.
- Baird G, Chandler S, Shortland A, et al. Acquisition and loss of best walking skills in children and young people with bilateral cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol.* 2022;64(2):235-242. doi: 10.1111/dmcn.15015.
- Lamberts RP, Burger M, du Toit J, Langerak NG. A Systematic Review of the Effects of Single-Event Multilevel Surgery on Gait Parameters in Children with Spastic Cerebral Palsy. *PLoS One.* 2016;11(10):e0164686. doi: 10.1371/journal.pone.0164686.

8. Попков Д.А., Змановская В.А., Губина Е.Б. и др. Результаты многоуровневых одномоментных ортопедических операций и ранней реабилитации в комплексе с ботулинотерапией у пациентов со спастическими формами церебрального паралича. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2015;115(4):41-48. doi: 10.17116/nevro20151154141-48.
9. Graham HK, Thomason P, Willoughby K, et al. Musculoskeletal Pathology in Cerebral Palsy: A Classification System and Reliability Study. *Children (Basel)*. 2021;8(3):252. doi: 10.3390/children8030252.
10. Shore BJ, White N, Kerr Graham H. Surgical correction of equinus deformity in children with cerebral palsy: a systematic review. *J Child Orthop*. 2010;4(4):277-290. doi: 10.1007/s11832-010-0268-4.
11. Thomason P, Selber P, Graham HK. Single Event Multilevel Surgery in children with bilateral spastic cerebral palsy: a 5 year prospective cohort study. *Gait Posture*. 2013;37(1):23-28. doi: 10.1016/j.gaitpost.2012.05.022.
12. Gough M, Schneider P, Shortland AP. The outcome of surgical intervention for early deformity in young ambulant children with bilateral spastic cerebral palsy. *J Bone Joint Surg Br*. 2008;90(7):946-951. doi: 10.1302/0301-620X.90B7.20577.
13. Rutz E, Tirosh O, Thomason P, et al. Stability of the Gross Motor Function Classification System after single-event multilevel surgery in children with cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol*. 2012;54(12):1109-1113. doi: 10.1111/dmcn.12011.
14. Edwards TA, Theologis T, Wright J. Predictors affecting outcome after single-event multilevel surgery in children with cerebral palsy: a systematic review. *Dev Med Child Neurol*. 2018;60(12):1201-1208. doi: 10.1111/dmcn.13981.
15. Putz C, Döderlein L, Mertens EM, et al. Multilevel surgery in adults with cerebral palsy. *Bone Joint J*. 2016;98-B(2):282-288. doi: 10.1302/0301-620X.98B2.36122.
16. Гатамов О.И., Долганова Т.И., Томов А.Д., Попков Д.А. Эволюция походки после многоуровневых ортопедических операций, выполненных для коррекции ортопедических осложнений у детей дошкольного и младшего школьного возраста со спастической диплегией. *Гений ортопедии*. 2025;31(5):602-613. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-5-602-613.
17. Фатхулislamов Р.Р., Гатамов О.И., Мамедов У.Ф., Попков Д.А. Оценка состояния пациентов со спастическими формами церебрального паралича при переходе во взрослую сеть лечебно-профилактических учреждений: кросс-секционное исследование. *Гений ортопедии*. 2023;29(4):376-381. doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-4-376-381.
18. Bonnefooy-Mazure A, De Coulon G, Lascombes P, Armand S. Follow-up of walking quality after end of growth in 28 children with bilateral cerebral palsy. *J Child Orthop*. 2020;14(1):41-49. doi: 10.1302/1863-2548.14.190125.
19. Долганова Т.И., Попков Д.А., Долганов Д.В., Чибиров Г.М. Показатели кинетики локомоторных стереотипов у здоровых детей в различных скоростных диапазонах передвижения. *Гений ортопедии*. 2022;28(3):417-424. doi: 10.18019/1028-4427-2022-28-3-417-424.
20. Nordmark E, Häglund G, Lauge-Pedersen H, et al. Development of lower limb range of motion from early childhood to adolescence in cerebral palsy: a population-based study. *BMC Med*. 2009;7:65. doi: 10.1186/1741-7015-7-65.
21. Cloodt E, Lindgren A, Rodby-Bousquet E. Knee and ankle range of motion and spasticity from childhood into adulthood: a longitudinal cohort study of 3,223 individuals with cerebral palsy. *Acta Orthop*. 2024;95:200-205. doi: 10.2340/17453674.2024.40606.
22. Wohlgenuth RP, Kulkarni VA, Villalba M, et al. Collagen architecture and biomechanics of gracilis and adductor longus muscles from children with cerebral palsy. *J Physiol*. 2024;602(14):3489-3504. doi: 10.1113/JP285988.
23. Mathewson MA, Lieber RL. Pathophysiology of muscle contractures in cerebral palsy. *Phys Med Rehabil Clin N Am*. 2015;26(1):57-67. doi: 10.1016/j.pmr.2014.09.005.
24. Rutz E, Baker R, Tirosh O, Brunner R. Are results after single-event multilevel surgery in cerebral palsy durable? *Clin Orthop Relat Res*. 2013;471(3):1028-1038. doi: 10.1007/s11999-012-2766-9.
25. Terjesen T, Lofterød B, Skaaret I. Gait improvement surgery in ambulatory children with diplegic cerebral palsy. *Acta Orthop*. 2015;86(4):511-517. doi: 10.3109/17453674.2015.1011927.
26. Dreher T, Thomason P, Švehlík M, et al. Long-term development of gait after multilevel surgery in children with cerebral palsy: a multicentre cohort study. *Dev Med Child Neurol*. 2018;60(1):88-93. doi: 10.1111/dmcn.13618.
27. Ваганов П.Д., Яновская Э.Ю., Манджиева Э.Т. Периоды детского возраста. *Российский медицинский журнал*. 2018;24(4):185-190. doi: 10.18821/0869-2106-2018-24-4-185-190.
28. Clark R, Locke M, Bialocerkowski A. Paediatric terminology in the Australian health and health-education context: a systematic review. *Dev Med Child Neurol*. 2015;57(11):1011-1018. doi: 10.1111/dmcn.12803.
29. Leite HR, Jindal P, Malek SA, Rosenbaum P. Research on Children With Cerebral Palsy in Low- and Middle-Income Countries. *Pediatr Phys Ther*. 2022;34(4):551-555. doi: 10.1097/PEP.0000000000000949.
30. Karim T, Dossetor R, Huong Giang NT, et al. Data on cerebral palsy in Vietnam will inform clinical practice and policy in low and middle-income countries. *Disabil Rehabil*. 2022;44(13):3081-3088. doi: 10.1080/09638288.2020.1854872.
31. Al-Jabri BA, Al-Amri AS, Jawhari AA, et al. Prevalence, Types, and Outcomes of Cerebral Palsy at a Tertiary Center in Jeddah, Saudi Arabia. *Cureus*. 2022;14(8):e27716. doi: 10.7759/cureus.27716.
32. Pilloni G, Pau M, Costici PF, et al. Use of 3D gait analysis as predictor of Achilles tendon lengthening surgery outcomes in children with cerebral palsy. *Eur J Phys Rehabil Med*. 2019;55(2):250-257. doi: 10.23736/S1973-9087.18.05326-1.
33. Ong CF, Geijtenbeek T, Hicks JL, Delp SL. Predicting gait adaptations due to ankle plantarflexor muscle weakness and contracture using physics-based musculoskeletal simulations. *PLoS Comput Biol*. 2019;15(10):e1006993. doi: 10.1371/journal.pcbi.1006993.
34. Ounpuu S, DeLuca P, Davis R, Romness M. Long-term effects of femoral derotation osteotomies: an evaluation using three-dimensional gait analysis. *J Pediatr Orthop*. 2002;22(2):139-145.
35. Theologis T. Lever arm dysfunction in cerebral palsy gait. *J Child Orthop*. 2013;7(5):379-382. doi: 10.1007/s11832-013-0510-y.
36. Ławniczak D, Józwiak M, Manikowska F. Assessment of absolute knee joint linear and angular velocity in patients with spastic cerebral palsy after operative treatment of lever arm disfunction deformities--prospective study. *Chir Narzadow Ruchu Ortop Pol*. 2010;75(2):92-97. (In Polish).
37. Ma N, Gould D, Camathias C, et al. Single-Event Multi-Level Surgery in Cerebral Palsy: A Bibliometric Analysis. *Medicina (Kaunas)*. 2023;59(11):1922. doi: 10.3390/medicina59111922.
38. Чибиров Г.И., Долганова Т.И., Долганов Д.В., Попков Д.А. Анализ причин патологических паттернов кинематического локомоторного профиля по данным компьютерного анализа походки у детей со спастическими формами ДЦП. *Гений ортопедии*. 2019;25(4):493-500. doi: 10.18019/1028-4427-2019-25-4-493-500.
39. Кольцов А.А., Аксенов А.Ю., Джомардлы Э.И. Сравнительная характеристика кинематических параметров ходьбы детей с ДЦП в зависимости от типа фиксации стопы и голеностопного сустава. *Травматология и ортопедия России*. 2022;28(4):102-113. doi: 10.17816/2311-2905-1682.
40. Bernthal NM, Gamradt SC, Kay RM, et al. Static and dynamic gait parameters before and after multilevel soft tissue surgery in ambulating children with cerebral palsy. *J Pediatr Orthop*. 2010;30(2):174-179. doi: 10.1097/BPO.0b013e3181d04fb5.

Статья поступила 22.01.2026; одобрена после рецензирования 10.03.2026; принята к публикации 09.06.2026.

The article was submitted 22.01.2026; approved after reviewing 10.03.2026; accepted for publication 09.06.2026.

Информация об авторах:

Эдуард Рифович Мингазов — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, заведующий отделением, <https://orcid.org/0000-0001-9096-9218>;

Орифжан Фарходжанович Насипжанов — аспирант 1 года, Onasipzanov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-4732-7816>;

Тамара Игоревна Долганова — доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник, rjik532007@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0117-3451>;

Орхан Ильхам оглы Гатамов — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, or-gatamov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4244-5774>;

Улви Фаиг Оглы Мамедов — врач — травматолог-ортопед, аспирант, <https://orcid.org/0009-0008-0266-6515>;

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

Information about the authors:

Eduard R. Mingazov — Candidate of Medical Sciences, Orthopaedic Surgeon, Head of the Department, <https://orcid.org/0000-0001-9096-9218>;

Orifzhan F. Nasipzhanov — Postgraduate Student, Onasipzanov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-4732-7816>;

Tamara I. Dolganova — Doctor of Medical Sciences, Leading Researcher, rjik532007@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0117-3451>;

Orkhan I. Gatamov — Candidate of Medical Sciences, Orthopaedic Surgeon, or-gatamov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4244-5774>;

Ulvi F. Mamedov — Orthopaedic Surgeon, Postgraduate Student, <https://orcid.org/0009-0008-0266-6515>;

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

Вклад авторов:

Мингазов Э.Р. — создание моделей, оформления, проведение исследовательской деятельности.

Долганова Т.И. — применение статистических, математических, вычислительных или других формальных методов для анализа или синтеза данных исследования.

Насипжанов О.Ф. — подготовка и написание первоначального проекта (черновика) работы.

Гатамов О.И. — ответственность за управление и координацию планирования и проведения исследовательской деятельности.

Мамедов У.Ф. — проведение исследовательской деятельности.

Попков Д.А. — сбор данных/доказательств, подготовка и написание первоначального проекта работы, применение статистических, математических, вычислительных или других формальных методов для анализа или синтеза данных исследования.

Научная статья

УДК 616.727.3-77-089.843]-089.168.1-06

<https://doi.org/10.18019/1028-4427-2026-32-4-510-519>

Анализ причин осложнений при эндопротезировании локтевого сустава: опыт 622 операций и перспективы разработки имплантатов

Т.И. Александров, А.А. Иванова✉, В.М. Прохоренко

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

Автор, ответственный за переписку: Анастасия Александровна Иванова, aivanova.nsk@yandex.ru

Аннотация

Введение. Тотальное эндопротезирование локтевого сустава (ТЭЛС) является эффективным методом лечения пациентов с поздними стадиями заболеваний локтевого сустава, однако частота послеоперационных осложнений остаётся высокой.

Цель работы — проанализировать структуру и причины осложнений после ТЭЛС в зависимости от биомеханического дизайна имплантата, а также оценить влияние резекции блока плечевой кости на силовые показатели кисти.

Материалы и методы. Проведено ретроспективное нерандомизированное когортное исследование 622 пациентов с первичным и ревизионным ТЭЛС (2002–2025 гг.). В зависимости от биомеханического принципа фиксации имплантированных конструкций пациенты разделены на две группы: группа жесткосвязанных систем (ЭСИ, $n = 404$) и группа полусвязанных систем (Zimmer Coonrad – Morrey, Connet, Treza, Logeeks, $n = 218$). Анализировали клинко-рентгенологические данные, интраоперационные находки при ревизиях и результаты инструментальной динамометрии ($n = 80$) до операции и через шесть недель после вмешательства. Статистический анализ выполнен непараметрическими методами (Манна – Уитни, Уилкоксона, χ^2).

Результаты. Общая частота осложнений составила 7,0 % (44/622). В группе жесткосвязанных имплантатов доминирующим механизмом неудачи стало асептическое расшатывание компонентов (4,5 %, 18/404), обусловленное концентрацией напряжений на костно-цементном интерфейсе. В группе полусвязанных систем ведущей причиной ревизий явилась механическая несостоятельность шарнирного узла / износ полиэтиленового вкладыша (3,2 %, 7/218). Резекция блока плечевой кости не оказала клинически значимого влияния на силу кистевого и щипкового хвата ($p > 0,05$).

Обсуждение. Существующие конструкции ТЭЛС демонстрируют предсказуемый профиль осложнений, напрямую связанный с их биомеханическим дизайном. Оптимизация результатов требует не только совершенствования хирургической техники, но и перехода к имплантатам нового поколения, учитывающим сложную трехмерную кинематику сустава, обеспечивающим сбалансированное перенаправление нагрузок и обладающим усиленной, износостойкой шарнирной системой.

Заключение. Профиль осложнений после ТЭЛС детерминирован конструктивным дизайном имплантата. Жесткосвязанные системы предрасполагают к асептическому расшатыванию, полусвязанные — к усталостному износу шарнира. Резекция блока плечевой кости не ухудшает функциональные силовые показатели кисти. Перспективное развитие имплантатов должно базироваться на оптимизации контролируемого варус-вальгусного люфта (5–7°), инженерном усилении узла сопряжения и учете естественной анатомической торсии дистального метаэпифиза плечевой кости.

Ключевые слова: локтевой сустав, тотальное эндопротезирование, осложнения, ревизионное эндопротезирование, биомеханика, дизайн эндопротеза

Для цитирования: Александров Т.И., Иванова А.А., Прохоренко В.М. Анализ причин осложнений при эндопротезировании локтевого сустава: опыт 622 операций и перспективы разработки имплантатов. *Гений ортопедии*. 2026;32(4):510-519. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-4-510-519.



Complications of total elbow arthroplasty: experience with 622 cases and implant developments

T.I. Alexandrov, A.A. Ivanova✉, V.M. Prokhorenko

Novosibirsk Research Institute of Traumatology and Orthopedics n.a. Ya.L. Tsivyan, Novosibirsk, Russian Federation

Corresponding author: Anastasia A. Ivanova, aivanova.nsk@yandex.ru

Abstract

Introduction Total elbow arthroplasty (TEA) is increasingly used for the treatment of advanced elbow conditions with the rate of adverse events after surgery being high.

The **objective** was to analyze the spectrum and causes of complications following TEA depending on the biomechanical implant design and evaluate the effect of humeral trochlear resection on hand grip strength.

Material and methods A retrospective non-randomized cohort study of 622 primary and revision TEA procedures was performed between 2002 and 2025. Depending on the biomechanical principle of implant fixation, patients were stratified into two groups to include constrained implants (ESI, $n = 404$) and semi-constrained implants (Zimmer Coonrad – Morrey, Conmet, Treza, Logeeks, $n = 218$). Clinical and radiological data, intraoperative findings during revisions, and instrumented dynamometry results ($n = 80$) were analyzed preoperatively and at 6 weeks of surgery. Statistical analysis was performed using non-parametric tests (Mann – Whitney U, Wilcoxon, Chi-square).

Results The overall complication rate was 7.0 % (44/622). Aseptic loosening of TEA was more common for constrained implants (4.5 %, 18/404) due to stress concentration at the bone-cement interface. Mechanical failure of the hinge joint/polyethylene wear (3.2 %, 7/218) was the leading cause of revision in the semi-constrained group. Resection of the humeral trochlea had no clinically significant effect on hand and pinch grip strength ($p > 0.05$).

Discussion Existing TEA constructs exhibit a predictable complication profile directly related to their biomechanical design. Optimizing outcomes is associated with advanced surgical techniques and a transition to new-generation implants considering the complex three-dimensional kinematics of the joint and providing balanced load transfer with a reinforced, wear-resistant hinge system.

Conclusion The complication profile after TEA was implant dependent. Constrained systems could predispose to aseptic loosening, and semi-constrained systems can be associated with fatigue wear of the hinge. Trochlear resection did not compromise the hand strength. Future implant developments should focus on optimization of controlled varus-valgus laxity ($5-7^\circ$), reinforcing the hinge coupling mechanism, considering the anatomical torsion of the distal humerus.

Keywords: elbow joint, total elbow arthroplasty, complications, revision arthroplasty, biomechanics, implant design

For citation: Alexandrov TI, Ivanova AA, Prokhorenko VM. Complications of total elbow arthroplasty: experience with 622 cases and implant developments. *Genij Ortopedii*. 2026;32(4):510-519. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-4-510-519.

ВВЕДЕНИЕ

Тотальное эндопротезирование локтевого сустава (ТЭЛС) является операцией выбора при лечении пациентов с тяжелыми формами ревматоидного артрита, посттравматическим артрозом и бесперспективными, с точки зрения реконструкции, переломами дистального метаэпифиза плечевой кости, позволяя купировать болевой синдром и восстанавливать управляемую функцию конечности [1, 2, 3]. Традиционно основным показанием к проведению ТЭЛС являлся выраженный ревматоидный артрит со стойкой утратой функции сустава и болевым синдромом. С течением времени, благодаря совершенствованию конструкций протезов и хирургических методов, ТЭЛС стало вариантом лечения тяжёлых оскольчатых переломов дистального отдела плечевой кости у пожилых людей. E. Kholinne et al. в своем метаанализе указывают, что 71,7 % пациентов, которым проводили ТЭЛС, были старше 70 лет [4, 5, 6]. Функциональные и клинические результаты ТЭЛС, а также выживаемость эндопротезов у пациентов после травмы статистически значимо лучше, чем у пациентов, которым данный вид оперативного вмешательства проводили по поводу ревматоидного артрита [5, 7, 8]. Несмотря на более чем полувековую историю развития, частота осложнений и ревизионных вмешательств после ТЭЛС, по данным мировой литературы, достигает 20–40 %, что значительно превышает аналогичные показатели при эндопротезировании тазобедренного и коленного суставов [9, 10, 11, 12, 13, 14].

Эволюция конструкций эндопротезов локтевого сустава прошла путь от несвязанных к жесткосвязанным и полусвязанным системам. Жесткосвязанные (*англ.*: constrained) имплантаты, обеспечивая максимальную первичную стабильность, не способны противодействовать торсионным и изгибающим силовым изменениям, что приводит к концентрации напряжения на границе «кость-цемент-протез» и, как следствие, к асептическому расшатыванию. Полусвязанные (*англ.*: semi-constrained) конструкции, обладая некоторой подвижностью в шарнире, призваны снизить эти нагрузки, однако их «ахиллесовой пятой» становится недостаточная механическая прочность самого узла сочленения [15, 16, 17]. При выраженных посттравматических или ревматоидных дефектах дистального отдела плечевой кости, а также при устранении стойких сгибательных контрактур, хирургический этап нередко включает резекцию блока плечевой кости для достижения достаточного объема движений и корректной установки компонентов. Данная манипуляция неизбежно сопровождается изменением точек приложения коллатеральных связок и мышц-стабилизаторов, что потенциально может влиять на биомеханику кистевого хвата. В литературе существуют противоречивые данные о влиянии резекции блока на функциональный исход, — ряд авторов указывает на снижение силы хвата в послеоперационном периоде [18], что может критически ограничивать бытовую активность пациентов. В то же время объективные доказательства клинически значимого нарушения силовых показателей кисти при сохранении интактных сухожильно-мышечных комплексов остаются недостаточными, а методология оценки варьирует между исследованиями.

Несмотря на клиническую значимость силового хвата для качества жизни пациентов, его зависимость от объема костной резекции и типа имплантируемой конструкции изучена недостаточно. В связи с этим анализ структуры осложнений в зависимости от дизайна эндопротеза, а также объективная оценка влияния резекции блока плечевой кости на силовые показатели кисти представляются актуальными задачами современной ортопедии [19, 20, 21, 22, 23].

Цель работы — проанализировать структуру и причины осложнений после ТЭЛС в зависимости от биомеханического дизайна имплантата, а также оценить влияние резекции блока плечевой кости на силовые показатели кисти.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проведено ретроспективное нерандомизированное когортное исследование на базе ННИИТО им. Я.Л. Цивьяна. В период с 2002 по 2025 гг. проанализированы результаты 622 операций первичного и ревизионного ТЭЛС.

В зависимости от биомеханического принципа фиксации имплантированных конструкций пациенты разделены на две группы:

- группа жесткосвязанных систем ($n = 404$) — эндопротез ЭСИ (Россия), рис. 1, а;
- группа полусвязанных систем ($n = 218$) — объединённая когорта, включающая:
 - эндопротезы Zimmer Coonrad – Morrey (Zimmer Biomet, США), рис. 1, б;
 - Conmet (Россия), рис. 1, в;
 - Treza (Россия) и Logeeks (Россия), рис. 1, г.



Рис. 1. Эндопротезы локтевого сустава: а — ЭСИ; б — Zimmer Coonrad – Morrey Total Elbow; в — Conmet; г — Logeeks

Объединение отечественных аналогов (Conmet, Treza, Logeeks) в единую подгруппу обусловлено идентичным конструктивным принципом (наличие варус-вальгусного люфта в шарнирном узле 5–7°) и недостаточной мощностью выборки для проведения попарного статистического сравнения каждой модели ($n < 30$ для Conmet, Treza и Logeeks отдельно).

Клинико-демографические характеристики пациентов представлены в таблице 1. Статистический анализ подтвердил сопоставимость групп по полу, возрасту, сроку наблюдения и нозологической структуре ($p > 0,05$), что минимизирует влияние ковариат на оценку частоты и характера осложнений.

Таблица 1

Клинико-демографическая характеристика пациентов

Показатель		Все пациенты ($n = 622$)		Группа жесткосвязанных систем ($n = 404$)		Группа полусвязанных систем ($n = 218$)		p
Возраст, лет, Ме [Q1; Q3]		61,0 [52; 71]		61,5 [53; 72]		59,0 [50; 69]		0,312
Срок наблюдения, лет, Ме [Q1; Q3]		7,2 [4,1;11,5]		9,5 [5,8; 14,2]		4,8 [2,3; 7,9]		0,184
Пол	Мужчины	абс.	%	абс.	%	абс.	%	0,415
	Женщины	199	32,0	106	26,2	93	42,7	
Нозология	Посттравматический артроз	423	68,0	298	73,8	125	57,3	0,682
	Ревматоидный артрит	280	45,0	179	44,3	101	46,3	
	Острые многооскольчатые переломы дистального отдела плечевой кости	236	38,0	123	30,4	113	51,8	
	Другие патологии	75	12,1	71	17,6	4	1,8	
		31	4,9	31	7,7	0	0,0	

Примечание: Ме — медиана, [Q1; Q3] — интерквартильный диапазон; p — уровень статистической значимости (критерий Манна – Уитни для количественных признаков, χ^2 Пирсона или точный тест Фишера для качественных).

Хирургическая техника и интраоперационный протокол

Все оперативные вмешательства выполняли через стандартный задний доступ с сохранением или рефиксацией сухожилия трёхглавой мышцы плеча [24, 25]. При имплантации жесткосвязанного эндопротеза ЭСИ доступ через сухожилие трицепса с сохранением точки крепления к локтевому отростку обеспечивал достаточную визуализацию для установки и сборки компонентов в ране, что позволяло проводить раннюю функциональную активизацию без дополнительной рефиксации.

Имплантация полусвязанных систем требовала расширения доступа за счёт формирования дополнительных медиального и латерального «окон» для визуального контроля установки цанги и оси шарнирного механизма. При использовании эндопротеза Logeeks в ряде случаев выполняли временное отсечение сухожилия трицепса с последующей трансоссальной рефиксацией и соблюдением щадящего ортопедического режима в раннем послеоперационном периоде.

Тактику ведения локтевого нерва определяли по исходному клиническому статусу. При первичном ТЭЛС локтевой нерв не выделяли для сохранения его васкуляризации и анатомического взаимодействия с окружающими тканями. При ревизионных вмешательствах выполняли декомпрессию путём вскрытия апоневротической мембраны без полной мобилизации. Тотальное выделение локтевого нерва с использованием держалок применяли исключительно при первично диагностированной нейропатии.

Методы диагностики и верификации осложнений

Верификация послеоперационных осложнений базировалась на комплексном анализе клинической картины, стандартной рентгенографии в двух проекциях и мультиспиральной компьютерной томографии (МСКТ). Рентгенологическими критериями асептического расшатывания служили:

- прогрессирующие зоны просветления > 2 мм на границе «кость–цемент–имплантат», охватывающие всю зону фиксации компонента;
- миграция, проседание или изменение угла наклона компонентов;
- перелом или отрыв цементной мантии;
- перипротезный остеолит: локализованные зоны резорбции костной ткани, ассоциированные с реакцией на частицы износа;
- перипротезные переломы, являющиеся причиной или следствием нестабильности;
- механическое разрушение конструкции (износ вкладыша, поломка оси, диссоциация шарнира).

При выполнении ревизионных вмешательств интраоперационно оценивали:

- степень износа полиэтиленового вкладыша;
- целостность механизма блокировки шарнира;
- стабильность фиксации ножек;
- состояние цементной мантии;
- характер костного ложа.

Оценка функциональных результатов (динамометрия)

Для объективизации влияния резекции блока плечевой кости на функцию кисти у части пациентов ($n = 80$) проводили инструментальную динамометрию. Измеряли силу кистевого хвата (кистевой динамометр) и щипковый хват (щипковый динамометр) на доминантной и недоминантной конечностях. Исследование выполняли до операции и через шесть недель после неё. Выбор указанного срока обусловлен завершением первичного заживления мягких тканей, формированием стабильного рубца и возможностью безопасной функциональной нагрузки.

Этические нормы

Исследование одобрено Локальным этическим комитетом ФГБУ «ННИИТО им. Я.Л. Цивьяна» Минздрава России (выписка № 014/25 из протокола от 05.09.2025 № 006/25). Все пациенты подписали информированное добровольное согласие на участие в исследовании и обработку персональных данных.

Статистический анализ

Обработка данных выполнена в программной среде SPSS v.26 / R v.4.2. Нормальность распределения количественных признаков оценивали с помощью критерия Шапиро – Уилка. В связи с отсутствием нормального распределения, сравнение независимых выборок проводили непараметрическим критерием Манна – Уитни, для парных измерений (динамика до/после операции) — критерием Уилкоксона. Качественные признаки сравнивали с использованием точного теста Фишера или критерия χ^2 Пирсона. Результаты представлены в виде медианы и интерквартильного диапазона [Q1; Q3], абсолютных (n) и относительных (%) частот. Статистически значимыми считали различия при уровне значимости $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В общей когорте из 622 выполненных операций ТЭЛС в отдаленном послеоперационном периоде выявлено 44 случая различных осложнений, что составило 7,0 % от общего числа вмешательств. Анализ структуры неблагоприятных исходов продемонстрировал прямую зависимость характера и частоты осложнений от биомеханического принципа имплантированной конструкции.

Характер осложнений в группе жесткосвязанных систем (рис. 2)

В группе пациентов, которым имплантирован эндопротез ЭСИ ($n = 404$), ревизионные вмешательства потребовались в 29 случаях (7,2 %). Доминирующей причиной неудовлетворительного результата стало асептическое расшатывание компонентов, зафиксированное у 18 пациентов (4,5 %), преимущественно в области плечевого компонента. Биомеханически это обусловлено полной сопряженностью системы, при которой все физиологические торсионные и варус-вальгусные нагрузки передаются непосред-

ственно на костно-цементный интерфейс, инициируя перипротезный остеолит и потерю стабильности фиксации (злокачественный остеолит). Помимо расшатывания, в данной группе отмечены: усталостный перелом металлической оси шарнира ($n = 3$; 0,7 %); перипротезная инфекция глубоких тканей ($n = 3$; 0,7 %); нейропатия локтевого нерва ($n = 3$; 0,7 %); перипротезный перелом ($n = 1$; 0,2 %). Случаев вывиха или диссоциации шарнира не зарегистрировано, что подтверждает высокую первичную стабильность жесткосвязанной конструкции, однако ценой этого является повышенный риск асептической нестабильности.



Рис. 2. Рентгенограммы локтевого сустава, осложнения эндопротеза ЭСИ: а — злокачественный остеолит; б — разрушение шарнирного узла

Характер осложнений в группе полусвязанных систем (рис. 3)

В когорте пациентов с полусвязанными имплантатами (Zimmer Coonrad – Morrey, Conmet, Treza, Logeeks; $n = 218$) зарегистрировано 15 осложнений (6,9 %). Ведущей причиной ревизий ($n = 7$; 3,2 %) стала механическая несостоятельность узла сочленения, — критический износ полиэтиленового вкладыша или усталостный перелом фиксирующего механизма, приводящий к диссоциации шарнира. Асептическое расшатывание компонентов выявлено у пяти пациентов (2,3 %). Остальные осложнения включали перипротезную инфекцию ($n = 1$; 0,5 %), перипротезный перелом ($n = 1$; 0,5 %) и повреждение локтевого нерва ($n = 1$; 0,5 %). В когорте отечественных полусвязанных эндопротезов (Conmet, Treza, Logeeks; $n < 10$) зафиксированы один случай асептического расшатывания и два случая разрушения шарнирного механизма.



Рис. 3. Разрушение шарнирного узла эндопротеза Zimmer Coonrad – Morrey

Частота осложнений в группе Zimmer Coonrad – Morrey соответствовала общемировым показателям для данной конструкции. Точные абсолютные и относительные значения по каждому типу осложнения представлены в таблице 2.

Таблица 2

Осложнения в группе Zimmer Coonrad – Morrey

Тип осложнения	ЭСИ		Coonrad – Morrey		Conmet / Trez / Logeeks		Всего	
	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%
Асептическое расшатывание	18	4,5	4	1,8	1	0,4	23	3,7
Разрушение / износ замка	3	0,7	5	2,3	2	0,8	10	1,6
Перипротезная инфекция	3	0,7	0	0,4	0	0,0	3	0,5
Перипротезный перелом	3	0,7	1	0,4	0	0,0	4	0,6
Нейропатия локтевого нерва	1	0,3	1	0,4	0	0,0	2	0,3
Реинсерция сухожилия трицепса	1	0,3	0	0,0	1	0,4	2	0,3

Примечание: данные представлены в формате n (% от группы). Объединение отечественных систем выполнено ввиду идентичного конструктивного принципа и малой мощности выборки для попарного анализа.

Структурные и биомеханические особенности отдаленного периода

При анализе отдаленных результатов в группе полусвязанных систем выявлена тенденция к изменению нативной механической оси конечности. У части пациентов сформировалась статическая варусная деформация локтевого сустава по типу «ружейного приклада» (англ.: gunstock deformity), что связано

с особенностями балансировки связочного аппарата и конструктивной геометрией плечевого компонента (рис. 4). Конструкционная особенность замка полусвязанного эндопротеза создает ощущение «падения» предплечья, связанное с люфтом шарнирного соединения. Отдельного внимания заслуживает проблема гетеротопической оссификации (ГО). В подгруппе из 10 пациентов, которым при имплантации жесткосвязанного эндопротеза ЭСИ были сохранены надмышечки плечевой кости, во всех случаях (100 %) в послеоперационном периоде развились гетеротопические оссификаты в проекции шарнирного механизма. Рентгенологический и клинический контроль подтвердили, что эктопическое костеобразование приводило к существенному ограничению амплитуды движений в локтевом суставе, требующему в ряде случаев хирургической коррекции (рис. 5).

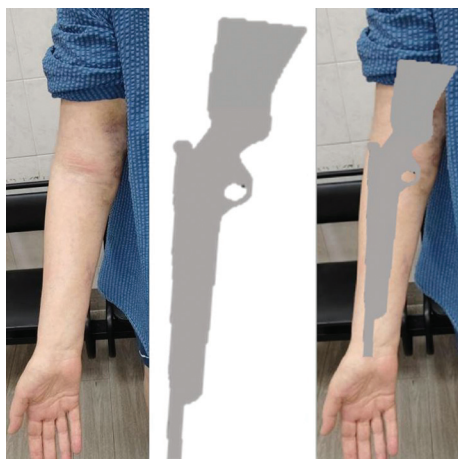


Рис. 4. Варусная деформация локтевого сустава: фотография пациента после ТЭЛС

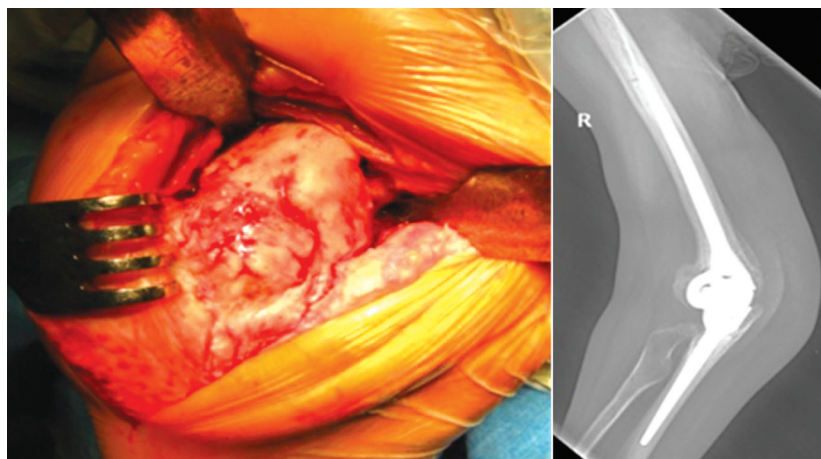


Рис. 5. Гетеротопическая оссификация вокруг замка эндопротеза ЭСИ

Оценка функционального состояния кисти (динамометрия)

Для объективной оценки влияния резекции дистального блока плечевой кости на функцию верхней конечности проведено инструментальное динамометрическое обследование подгруппы из 80 пациентов (первичное и ревизионное ТЭЛС с подтвержденным дефектом блока). Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты проведения динамометрии и щипкового хвата

Показатель	До операции	Через 6 недель после операции	Величина эффекта	Критерий Вилкоксона, <i>p</i> -уровень
	МЕД [Q1; Q3]		ПСЕВДО МЕД [95 %ДИ]	
Динамометрия правой кисти (<i>n</i> = 80, 100 %)	38,5 [25; 50]	38,5 [25; 52,5]	-1 [-1; -0,5]	0,152
Щипковый хват справа (<i>n</i> = 79, 99 %)	9 [7,25; 10,75]	10 [7; 11,75]	-0,25 [-0,25; -0,25]	0,009*
Динамометрия левой кисти (<i>n</i> = 78, 98 %)	39,5 [20,5; 53,75]	40 [24,25; 53]	-0,5 [-0,5; -0,5]	0,187
Щипковый хват слева (<i>n</i> = 77, 96 %)	9 [7; 11]	9 [7,4; 11]	0 [0; 0]	0,290

* $p < 0,05$.

При анализе проведенной динамометрии в динамике (при сравнении показателей предоперационного периода и через шесть недель после операции) отмечено сохранение уровня динамометрии правой и левой кисти и щипкового хвата слева. Показатели щипкового хвата справа после операции статистически значимо различаются в сравнении с показателями, зафиксированными до операции.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты настоящего исследования подтверждают, что частота и характер осложнений после ТЭЛС находятся в прямой зависимости от биомеханического дизайна имплантата. Общая частота ревизионных вмешательств в нашей когорте составила 7,0 %, что находится на нижней границе диапазонов, приводимых в современной литературе (10–25 %) [7, 10, 26, 27]. Данный показатель может быть обусловлен строгим соблюдением хирургического протокола, централизацией операций в специализированном центре и особенностями отбора пациентов. Тем не менее, анализ структуры неудач выявил фундаментальный биомеханический компромисс между первичной стабильностью и отдаленной долговечностью конструкции [9, 15, 22, 23, 28].

Жесткосвязанные системы и асептическое расшатывание. В группе имплантатов ЭСИ доминирующим осложнением стало асептическое расшатывание плечевого компонента (4,5 %). Биомеханический механизм данного явления хорошо описан в литературе: полная сопряженность шарнира компенсирует патологическую нестабильность, но блокирует физиологическую варус-вальгусную и торсионную подвижности. В результате пиковые нагрузки не амортизируются мягкотканым комплексом, а передаются напрямую на костно-цементный интерфейс. Это инициирует реакцию организма на микрочастицы износа (металл, полиэтилен, цемент), формирование толстой фиброзной мембраны и прогрессию перипротезного остеолита, что мы объективно верифицировали во время ревизионных оперативных вмешательств. Наши данные полностью согласуются с результатами исследований, указывающих на то, что ригидные конструкции демонстрируют более раннюю рентгенологическую нестабильность, несмотря на отсутствие диссоциаций шарнира [1, 30, 31]. При этом усталостный перелом металлической оси (0,7 %) свидетельствует о запредельных циклических нагрузках, превышающих предел прочности материала в условиях заблокированной кинематики [26, 29, 32, 33].

Полусвязанные системы и механическая несостоятельность узла сочленения. В когорте полусвязанных эндопротезов ведущей причиной ревизий (3,1 %) стала усталостная поломка фиксирующего механизма или критический износ полиэтиленового вкладыша с последующей диссоциацией шарнира. Инженерное решение, заложенное в конструкцию Coonrad – Morrey и её аналогов, предполагает наличие заложенного варус-вальгусного люфта (5–7°). Это позволяет перенаправить часть угловых и торсионных нагрузок с костного ложа на узел сочленения, существенно снижая риск раннего асептического расшатывания. Однако шарнирный модуль становится новым «слабым звеном», подверженным циклическим срезающим и компрессионным воздействиям. Частота разрушения узла в нашей выборке соответствует общему среднему показателю для данного типа конструкций [9, 29, 32]. Примечательно, что в отличие от жесткосвязанных систем, при ревизии полусвязанных имплантатов мы редко наблюдали тотальный остеолит костного ложа. Нестабильность чаще носила местный характер с массивным дебрисом в проекции самого шарнирного узла [1, 30].

Влияние хирургического доступа и гетеротопическая оссификация. Отдельного внимания заслуживает проблема сохранения надмыщелков плечевой кости. В подгруппе из 10 пациентов с сохраненными надмыщелками, которым имплантирован жесткосвязанный эндопротез, во всех случаях развилась гетеротопическая оссификация вокруг шарнира. Это подтверждает данные литературы о том, что сохранение костных выступов создает зоны повышенного трения мягких тканей и локальной ишемии, запуская каскад эктопического костеобразования [25, 34]. Мы полагаем, что при эндопротезировании локтевого сустава целесообразна резекция надмыщелков на уровне локтевой ямки для профилактики гетеротопической оссификации. Конструкцию шарнирного узла необходимо разрабатывать с учетом деликатного отношения к мягким тканям, исключая или минимизируя технически более сложный доступ с формированием дополнительных медиального и латерального «окон» [35, 36, 37, 38].

Функциональный исход: динамометрия и резекция блока плечевой кости. Важным практическим наблюдением стало отсутствие клинически значимого снижения силы кистевого и щипкового хвата после резекции дистального блока плечевой кости. Статистически значимое улучшение щипкового хвата справа ($p = 0,009$) на 1,0 кг не превышает минимальную клинически значимую разницу (MCID) и, вероятно, отражает купирование болевого синдрома и послеоперационную реабилитацию, а не биомеханическое изменение. Наши результаты опровергают утверждения о критическом ослаблении хвата после резекции блока [19, 20, 22]. Это объясняется тем, что основная тяга мышц-сгибателей и разгибателей пальцев проходит интактно, а коллатеральные связки, прикрепляющиеся к надмыщелкам, сохраняют свою функцию при правильной балансировке. Данное наблюдение имеет прямое клиническое значение: хирург может выполнять необходимую резекцию для корректной установки компонентов, не опасаясь функциональной инвалидизации кисти.

Перспективы биомеханического дизайна. Анализ собственных данных и результатов ревизионных вмешательств позволяет сформулировать вектор развития имплантатов нового поколения. Во-первых, необходимо учитывать и использовать концепцию «контролируемой аксиальной ротации» в локтевом компоненте, поскольку эндопротез является искусственным шарниром, помещенным в патологически измененные ткани, и не может копировать нативный локтевой сустав. Приоритетным должна стать оптимизация варус-вальгусной подвижности шарнира в пределах 5–7° с усилением узла сопряжения, способного выдерживать циклические срезающие нагрузки. Во-вторых, плечевой компонент должен учитывать естественные антеверсию и торсию дистального метаэпифиза для минимизации асимметричного контакта цементной мантии. В-третьих, дальнейшая разработка должна быть направлена на создание модульных систем с износостойкими парами трения и улучшенной геометрией ножек, что позволит снизить концентрацию напряжений на границе «имплантат–цемент–кость» и обеспечить сбалансированное перенаправление нагрузок [1, 17, 38, 39, 40].

Таким образом, существующие конструкции ТЭЛС демонстрируют предсказуемый профиль осложнений, напрямую связанный с их биомеханическим дизайном. Оптимизация результатов требует не только совершенствования хирургической техники, но и перехода к имплантатам нового поколения, учитывающим сложную трехмерную кинематику сустава, обеспечивающим сбалансированное перенаправление нагрузок и обладающим усиленной износостойкой шарнирной системой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общая частота осложнений после тотального эндопротезирования локтевого сустава в изученной когорте составила 7,0 %. Характер и частота неблагоприятных исходов находятся в прямой зависимости от биомеханического принципа фиксации имплантата.

Для жесткосвязанных систем доминирующим механизмом неудачи является асептическое расшатывание компонентов, обусловленное передачей пиковых варус-вальгусных и торсионных нагрузок непосредственно на костно-цементный интерфейс без их физиологической амортизации.

В группе полусвязанных эндопротезов ведущей причиной ревизионных вмешательств стала механическая несостоятельность шарнирного узла и критический износ полиэтиленового вкладыша, что связано с циклическими срезающими воздействиями на механизм сопряжения. Кроме того, имплантация данных систем сопровождается тенденцией к формированию статической варусной деформации конечности.

Инструментальная динамометрия подтвердила, что необходимая для корректной установки компонентов резекция дистального блока плечевой кости не оказывает клинически значимого влияния на силу кистевого и щипкового хвата. Выявленное статистически значимое улучшение щипкового хвата справа не превышает минимальную клинически значимую разницу и отражает результат послеоперационной реабилитации, а не биомеханическое изменение.

Разработка имплантатов нового поколения должна базироваться на принципах сбалансированного перенаправления нагрузок: оптимизации варус-вальгусной подвижности шарнира в пределах 5–7°, инженерного усиления узла сопряжения и фиксирующих механизмов, а также учета естественной анатомической торсии и версии дистального метаэпифиза плечевой кости.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено без финансовой поддержки.

Этическая экспертиза. Исследование одобрено Локальным Этическим Комитетом ФГБУ «ННИИТО имени Я.Л. Цивьяна» Минздрава России (выписка № 014/25 из протокола № 006/25 от 05 сентября 2025 г.).

Информированное согласие. Все пациенты подписали информированное добровольное согласие на участие в исследовании и обработку персональных данных.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Little CP, Graham AJ, Carr AJ. Total elbow arthroplasty: a systematic review of the literature in the English language until the end of 2003. *J Bone Joint Surg Br.* 2005;87(4):437–44. doi: 10.1302/0301-620X.87B4.15692.
- Гранкин Д.Ю., Авдейчик Н.В., Голяна С.И., Сафонов А.В. Тотальное эндопротезирование локтевого сустава, обзор литературы. Перспективы использования у детей. *Современные проблемы науки и образования.* 2022. doi: 10.17513/spno.31425.
- Кесян Г.А., Арсеньев И.Г., Уразгильдеев Р.З. и др. Современные тенденции и перспективы тотальной артропластики локтевого сустава (обзор литературы). *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова.* 2021;28(3):75–92. doi: 10.17816/vto76056.
- Kholinne E, Altamimi LA, Aldayel A, et al. Primary Linked Total Elbow Arthroplasty for Acute Distal Humerus Fracture Management: A Systematic Review of Clinical Outcome. *Clin Orthop Surg.* 2020;12(4):503–513. doi: 10.4055/cios20012.
- Singh V, Nazar N, Wiyono L, et al. Outpatient total elbow arthroplasty-outcomes and complications: a systematic review and meta-analysis. *JSES Rev Rep Tech.* 2025;6(1):100592. doi: 10.1016/j.xrrt.2025.100592.
- Hamoodi Z, Sayers A, Whitehouse MR, et al. Prognostic factors associated with failure of total elbow replacement: a protocol for analysis of National Joint Registry data in England. *BMJ Open.* 2025;15(7):e098729. doi: 10.1136/bmjopen-2025-098729.
- Kholinne E, Arya A, Jeon IH. Complications of modern design total elbow replacement. *J Clin Orthop Trauma.* 2021;19:42–49. doi: 10.1016/j.jcot.2021.05.008.
- You D, King G, Dehghan N, et al. Optimizing Outcomes in Total Elbow Arthroplasty. *J Am Acad Orthop Surg.* 2026;34(3):e358–e369. doi: 10.5435/JAAOS-D-25-00473.
- Sanchez-Sotelo J. Total elbow arthroplasty. *Open Orthop J.* 2011;5:115–123. doi: 10.2174/1874325001105010115.
- Tarallo L, Celli A, Delvecchio M, et al. Long-term outcomes and trends in elbow arthroplasty with Coonrad-Morrey prosthesis: a retrospective study in large group of patients. *Int Orthop.* 2024;48(10):2689–2698. doi: 10.1007/s00264-024-06272-8.
- Cutler HS, Collett G, Farahani F, et al. Thirty-day readmissions and reoperations after total elbow arthroplasty: a national database study. *J Shoulder Elbow Surg.* 2021;30(2):e41–e49. doi: 10.1016/j.jse.2020.06.033.
- Satalich J, Smith M, Whitaker S, et al. Indications for total elbow arthroplasty revision: a systematic review. *J Shoulder Elbow Surg.* 2026;35(2):625–633. doi: 10.1016/j.jse.2025.05.024.
- Boyle AB, Frampton C, Poon PC, MacLean SBM. A comparison of survivorship and functional outcomes for total elbow arthroplasty performed for distal humerus fracture, rheumatoid arthritis, and osteoarthritis, a New Zealand Joint Registry study. *J Shoulder Elbow Surg.* 2026;S1058-2746(26)00091-1. doi: 10.1016/j.jse.2026.01.019.
- Mahamid A, Jayyusi F, Laver L, et al. Analyzing Declining Trends, Patient Demographics, and Complications in Total Elbow Arthroplasty: Nationwide Retrospective Data Analysis. *J Clin Med.* 2025;14(5):1645. doi: 10.3390/jcm14051645.
- Marsh JP, King GJ. Unlinked total elbow arthroplasty. *Instr Course Lect.* 2015;64:231–242.
- Satalich J, Savsani K, Setliff J, et al. Total elbow arthroplasty—a historical review. *JSES Rev Rep Tech.* 2026;6(3):100717. doi: 10.1016/j.xrrt.2026.100717.
- Martin B, Gutierrez Y, Nwose J, et al. Systematic Review and Meta-Analysis of Total Elbow Arthroplasty in Outpatient Versus Inpatient Settings. *Cureus.* 2024;16(10):e72378. doi: 10.7759/cureus.72378.
- Morrey BF, Sanchez-Sotelo J, Morrey ME. *Morrey's the elbow and its disorders.* 5th edition. Elsevier; 2018:1124.
- McKee MD, Veillette CJ, Hall JA, et al. A multicenter, prospective, randomized, controlled trial of open reduction—internal fixation versus total elbow arthroplasty for displaced intra-articular distal humeral fractures in elderly patients. *J Shoulder Elbow Surg.* 2009;18(1):3–12. doi: 10.1016/j.jse.2008.06.005.

20. Ovesen J, Falstie-Jensen T, Thillemann TM. Short- and mid-term results after total elbow replacement with the Nexel total elbow arthroplasty: a consecutive case series of 45 elbows. *Seminars in Arthroplasty: JSES*. 2024;34(10):632-638. doi: 10.1053/j.sart.2024.03.011.
21. Krane F, Heck VJ, Leyendecker J, et al. The Future of Total Elbow Arthroplasty: A Statistical Forecast Model for Germany. *Healthcare (Basel)*. 2024;12(13):1322. doi: 10.3390/healthcare12131322.
22. Rodriguez-Merchan EC, Kachooei AR, Tabeayo E. Elbow Arthroplasty: A Concise Literature Update. *Arch Bone Jt Surg*. 2023;11(7):465-472. doi: 10.22038/ABJS.2023.71082.3323.
23. Evans JP, Evans JT, Mohammad HR, et al. How long does an elbow replacement last? A systematic review and meta-analysis of case-series and national registry reports with more than 10 years of follow-up. *Acta Orthop*. 2022;93:495-502. doi: 10.2340/17453674.2022.2753.
24. Burden EG, Batten T, Smith C, Evans JP. Hemiarthroplasty or total elbow arthroplasty for unreconstructable distal humeral fractures in patients aged over 65 years : a systematic review and meta-analysis of patient outcomes and complications. *Bone Joint J*. 2022;104-B(5):559-566. doi: 10.1302/0301-620X.104B5.BJJ-2021-1207.R2.
25. Leschinger T, Hackl M, Lanzerath F, et al. Elbow prosthesis after acute fractures : Indications and technique. *Unfallchirurgie (Heidelb)*. 2022;125(9):699-708. (In German) doi: 10.1007/s00113-022-01215-7.
26. Kim JM, Mudgal CS, Konopka JF, Jupiter JB. Complications of total elbow arthroplasty. *J Am Acad Orthop Surg*. 2011;19(6):328-339. doi: 10.5435/00124635-201106000-00003.
27. Алиев А.Г., Амбросенков А.В., Бояров А.А. и др. Структура ревизионного эндопротезирования локтевого сустава. *Гений ортопедии*. 2021;27(5):232-539. doi: 10.18019/1028-4427-2021-27-5-532-539.
28. Meijering D, Boerboom AL, Gerritsma CLE, et al. Mid-term results of the Latitude primary total elbow arthroplasty. *J Shoulder Elbow Surg*. 2022;31(2):382-390. doi: 10.1016/j.jse.2021.08.028.
29. Davey MS, Hurley ET, Gaafar M, et al. Long-term outcomes of total elbow arthroplasty: a systematic review of studies at 10-year follow-up. *J Shoulder Elbow Surg*. 2021;30(6):1423-1430. doi: 10.1016/j.jse.2020.11.014.
30. Watts AC, Hamoodi Z, McDaid C, Hewitt C. Elbow arthroplasty research methods, outcome domains, and instruments used in clinical outcome studies : a scoping review. *Bone Joint J*. 2022;104-B(10):1148-1155. doi: 10.1302/0301-620X.104B10.BJJ-2022-0570.R1.
31. Macken AA, Prkić A, van Oost I, et al. Implant survival of total elbow arthroplasty: analysis of 514 cases from the Dutch Arthroplasty Registry. *Bone Jt Open*. 2023;4(2):110-119. doi: 10.1302/2633-1462.42.BJO-2022-0152.R1.
32. Baxter NB, Davis ES, Chen JS, et al. Utilization, Complications, and Costs of Inpatient versus Outpatient Total Elbow Arthroplasty. *Hand (N Y)*. 2023;18(3):509-515. doi: 10.1177/15589447211030693.
33. El-Najjar D, Mehta A, Gupta P, et al. Revision total elbow arthroplasty is associated with a high rate of 30-day complications: A descriptive analysis of a national database. *Shoulder Elbow*. 2024;17(5):634-640. doi: 10.1177/17585732241269001.
34. Barret H, Laumonerie P, Delclaux S, et al. Revision Total Elbow Arthroplasty with the Semiconstrained Coonrad/Morrey Prosthesis: Follow-up to 21 Years. *J Bone Joint Surg Am*. 2021;103(7):618-628. doi: 10.2106/JBJS.20.00889.
35. Athwal GS, Morrey BF. Revision total elbow arthroplasty for prosthetic fractures. *J Bone Joint Surg Am*. 2006;88(9):2017-2026. doi: 10.2106/JBJS.E.00878.
36. Zhang D, Earp BE, Blazar P. Factors associated with 30-day complication, reoperation, readmission, and length of stay after primary total elbow arthroplasty: a database study of 555 patients. *Seminars in Arthroplasty: JSES*. 2023;33(1):59-66. doi: 10.1053/j.sart.2022.07.021.
37. Hamoodi Z, Sayers A, Whitehouse MR, et al. Total elbow arthroplasty in England. *Bone Joint J*. 2024;106-B(11):1312-1320. doi: 10.1302/0301-620X.106B11.BJJ-2024-0427.R1.
38. Morrey ME, Songy C, Triplet JJ, et al. Unexpected high early failure rate of the Nexel total elbow arthroplasty. *JSES Int*. 2022;6(4):690-695. doi: 10.1016/j.jseint.2022.04.001.
39. Tai DBG, Hanson S, Brennan P, et al. Outcomes and risk factors for failure after débridement, antibiotics, and implant retention for elbow periprosthetic joint infection. *J Shoulder Elbow Surg*. 2023;32(3):475-479. doi: 10.1016/j.jse.2022.11.009.
40. Martinez-Catalan N, Nguyen NTV, Morrey ME, et al. Two-stage reimplantation for deep infection after total elbow arthroplasty. *Shoulder Elbow*. 2022;14(6):668-676. doi: 10.1177/17585732211043524.
41. Gupta P, Quan T, Manzi JE, Zimmer ZR. Thirty-day morbidity and mortality following primary total elbow arthroplasty in octogenarians. *Shoulder Elbow*. 2022;14(5):562-567. doi: 10.1177/1758573221107668.

Статья поступила 04.03.2026; одобрена после рецензирования 03.06.2026; принята к публикации 09.06.2026.

The article was submitted 04.03.2026; approved after reviewing 03.06.2026; accepted for publication 09.06.2026.

Информация об авторах:

Тимофей Игоревич Александров — кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, врач — травматолог-ортопед, tymus@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6257-8356>;

Анастасия Александровна Иванова — кандидат медицинских наук, ученый секретарь, врач — анестезиолог-реаниматолог, aivanova.nsk@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7815-8487>;

Валерий Михайлович Прохоренко — доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник, vprohorenko@niito.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0655-9644>.

Information about the authors:

Timofey I. Aleksandrov — Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher, tymus@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6257-8356>;

Anastasia A. Ivanova — Candidate of Medical Sciences, Scientific Secretary, Anesthesiologist-Resuscitator, aivanova.nsk@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7815-8487>;

Valery M. Prokhorenko — Doctor of Medical Sciences, Professor, Chief Researcher, vprohorenko@niito.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0655-9644>.

Вклад авторов:

Александров Т.И. — существенный вклад в разработку концепции или дизайна исследования, сбор, анализ и интерпретация данных, написание текста рукописи.

Иванова А.А. — сбор данных, написание текста рукописи.

Прохоренко В.М. — редактирование текста рукописи, утверждение окончательного варианта рукописи для публикации.



Хирургическая коррекция плосковальгусной деформации стопы при остеоартрозе голеностопного сустава: клинично-функциональные результаты

А.А. Ширинов^{1✉}, Н.В. Загородний^{1,2}, Д.В. Бурков³, М.А. Иманкулов¹, А.Р. Закирова^{1,2}, А.А. Неверова¹

¹ Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН), Москва, Россия

² Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени Н.Н. Приорова, Москва, Россия

³ Городская клиническая больница № 31 имени академика Г.М. Савельевой, Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Айнуллох Абдурахмонович Ширинов, Shirinov_0101@mail.ru

Аннотация

Введение. Плосковальгусная деформация стопы — прогрессирующая коллаптирующая деформация стопы IV стадии (подтип IV В по классификации Myerson), сопровождающаяся поражением голеностопного сустава. Данная патология остается одной из наиболее сложных и инвалидизирующих в хирургии стопы и голеностопного сустава. Хирургическая коррекция заднего отдела стопы при сопутствующем остеоартрозе голеностопного сустава требует тщательного планирования и может включать изолированные артротомизирующие вмешательства и стратегии с последующим тотальным эндопротезированием голеностопного сустава.

Цель работы — оценить клинично-функциональные результаты хирургической коррекции плосковальгусной деформации стопы у пациентов с сопутствующим остеоартрозом голеностопного сустава.

Материалы и методы. В ретроспективное одноцентровое исследование включены данные 13 случаев хирургического лечения пациентов с плосковальгусной деформацией стопы IV В стадии и сопутствующим остеоартрозом голеностопного сустава. Всем пациентам выполняли операции, направленные на коррекцию деформации заднего отдела стопы, в зависимости от клинической ситуации применяли различные варианты артротомизирующих вмешательств. Клинично-функциональные результаты оценивали по визуально-аналоговой шкале боли (VAS), шкале AOFAS и опроснику FAOS до и после операции. Минимальный срок наблюдения — 12 месяцев. Для статистического анализа применяли точный критерий знаковых рангов Уилкоксона с расчетом точных двусторонних значений p .

Результаты. В результате хирургического лечения медиана VAS снизилась с 8 [7; 8] до 2 [2; 3,5] баллов ($p = 0,000244$). Медиана FAOS возросла с 22 [16,5; 42] до 86 [69; 89,5] баллов ($p = 0,001709$). Медиана AOFAS улучшилась с 40 [32,5; 42,5] до 88 [80; 90] баллов ($p = 0,000977$).

Обсуждение. Полученные результаты согласуются с данными литературы и демонстрируют высокую эффективность артротомизирующих вмешательств на заднем отделе стопы при данной патологии. Значимое улучшение всех функциональных показателей свидетельствует о правомерности выбранной хирургической тактики. В ряде случаев артротомия заднего отдела стопы является первым этапом перед тотальным эндопротезированием голеностопного сустава.

Заключение. Хирургическая коррекция плосковальгусной деформации стопы посредством артротомизирующих вмешательств на заднем отделе стопы обеспечивает статистически значимое уменьшение болевого синдрома и улучшение функционального статуса у пациентов с сопутствующим остеоартрозом голеностопного сустава.

Ключевые слова: плосковальгусная деформация стопы, остеоартроз голеностопного сустава, подтаранный артротомия, тотальное эндопротезирование голеностопного сустава, AOFAS, клинично-функциональные результаты

Для цитирования: Ширинов А.А., Загородний Н.В., Бурков Д.В., Иманкулов М.А., Закирова А.Р., Неверова А.А. Хирургическая коррекция плосковальгусной деформации стопы при остеоартрозе голеностопного сустава: клинично-функциональные результаты. *Гений ортопедии*. 2026;32(4):520-528. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-4-520-528.



Surgical correction of pes planovalgus deformity in ankle osteoarthritis: clinical and functional outcomes

A.A. Shirinov^{1✉}, N.V. Zagorodniy^{1,2}, D.V. Burkov³, M.A. Imankulov¹, A.R. Zakirova^{1,2}, A.A. Neverova¹

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

² Priorov National Medical Research Center for Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russian Federation

³ City Clinical Hospital No. 31 named after Academician G.M. Savelyeva, Moscow, Russian Federation

Corresponding author: Ainullok A. Shirinov, Shirinov_0101@mail.ru

Abstract

Introduction Pes planovalgus is a progressive, collapsing deformity of the foot, stage IV (subtype IV B according to the Myerson classification), associated with ankle joint involvement. This pathology remains one of the most complex and disabling in foot and ankle surgery. Surgical correction of the hindfoot associated with ankle osteoarthritis suggests careful planning and may include isolated arthrodesis procedures and strategies to be followed by total ankle arthroplasty.

The **objective** was to evaluate the clinical and functional results of surgical correction of pes planovalgus deformity in patients with concomitant ankle osteoarthritis.

Material and methods This retrospective, single-center study included data from 13 surgically treated patients with stage IVB flatfoot deformity and concomitant ankle osteoarthritis. All patients underwent surgery to correct the hindfoot deformity, using various arthrodesis procedures depending on the clinical situation. Clinical and functional outcomes were assessed using the Visual Analogue Scale (VAS), the AOFAS scale, and the FAOS questionnaire before and after surgery. The minimum follow-up period was 12 months. Statistical analysis was performed using the Wilcoxon signed-rank test with exact two-tailed *p* values calculated.

Results Postoperatively the median VAS score decreased from 8 [7; 8] to 2 [2; 3.5] scores (*p* = 0.000244). The median FAOS score increased from 22 [16.5; 42] to 86 [69; 89.5] (*p* = 0.001709). The median AOFAS score improved from 40 [32.5; 42.5] to 88 [80; 90] (*p* = 0.000977).

Discussion The findings are consistent with those reported in international literature and demonstrate the high efficacy of hindfoot arthrodesis in this condition. Significant improvement in the functional parameters suggests the appropriateness of the surgical approach. In some cases, hindfoot arthrodesis can be considered as the first step prior to the total ankle arthroplasty.

Conclusion Surgical correction of pes planovalgus deformity through hindfoot arthrodesis provides a statistically significant reduction in pain and improved functional status in patients with concomitant ankle osteoarthritis.

Keywords: pes planovalgus, ankle osteoarthritis, subtalar arthrodesis, total ankle replacement, AOFAS, clinical outcomes

For citation: Shirinov AA, Zagorodniy NV, Burkov DV, Imankulov MA, Zakirova AR, Neverova AA. Surgical correction of pes planovalgus deformity in ankle osteoarthritis: clinical and functional outcomes. *Genij Ortopedii*. 2026;32(4):520-528. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-4-520-528.

ВВЕДЕНИЕ

Плосковальгусная деформация стопы у взрослых — прогрессирующее и потенциально инвалидизирующее заболевание опорно-двигательного аппарата, характеризующееся коллапсом медиального продольного свода стопы с вальгусным отклонением заднего отдела и отведением переднего отдела в сочетании с пронацией среднего отдела стопы. В современной зарубежной литературе для обозначения данного состояния применяют термин «прогрессирующая коллаптирующая деформация стопы» (ПКДС, *англ.*: Progressive Collapsing Foot Deformity, PCFD), предложенный консенсусной группой экспертов во главе с M.S. Myerson в 2020 году как наиболее полно отражающий трехмерный и прогрессирующий характер патологического процесса [1]. Тем не менее, в отечественной клинической практике по-прежнему широко используют классификацию Johnson – Strom (1989), дополненную M.S. Myerson в 1997 году, выделяющую четыре стадии деформации, из которых наиболее тяжелой является IV стадия с вовлечением голеностопного сустава [2, 3].

В структуре дегенеративно-дистрофических заболеваний суставов нижних конечностей принципиально разграничивают первично-дегенеративные, посттравматические и воспалительные формы поражения, каждая из которых требует самостоятельного диагностического и лечебного алгоритма [4]. Остеоартроз голеностопного сустава отличается по своей этиологической структуре от поражений коленного и тазобедренного суставов. По данным современных исследований, от 70 % до 80 % случаев остеоартроза голеностопного сустава являются посттравматическими, в остальных случаях деформация носит идиопатический (первично-дегенеративный) характер [5]. Вальгусная деформация заднего отдела стопы создает патологическую биомеханику, усугубляющую нагрузку на медиальные отделы голеностопного сустава с прогрессирующим разрушением хряща, а несостоятельность дельтовидной связки нередко является ключевым звеном в формировании вальгусного наклона таранной кости, что подтверждается клиническими наблюдениями хирургической коррекции вальгусной деформации заднего отдела стопы [6, 7]. Именно эта взаимосвязь обуславливает высокую встречаемость сочетанной патологии (плосковальгусной деформации стопы и остеоартроза голеностопного сустава) в когорте пациентов старше 50 лет, дегенеративные поражения суставов стопы в этой возрастной группе нередко носят полисегментарный характер [8].

Хирургическое лечение пациентов с ПКДС IV B стадии (по Myerson), сопровождающейся остеоартрозом голеностопного сустава, остается технически сложной задачей с ограниченной доказательной базой. Текущие рекомендации предлагают артродез голеностопного сустава либо тотальное эндопротезирование голеностопного сустава (ТЭГС) в сочетании с коррекцией деформации стопы. При этом в ряде случаев применяют поэтапную стратегию: на первом этапе выполняют артродезирование заднего отдела стопы для устранения деформации и нормализации биомеханики, на втором — ТЭГС [9, 10]. Значимость устранения деформации перед ТЭГС подтверждается данными о долгосрочной выживаемости имплантатов: по результатам систематического обзора Д.В. Буркова с соавт., 10-летняя выживаемость эндопротезов голеностопного сустава составляет 77–87,5 %, а неустраненные осевые деформации авторы называют прямым фактором снижения выживаемости имплантатов [11]. Консенсусная группа PCFD подчеркивает, что при выборе тактики приоритет отдается сохранению подвижности суставов там, где это возможно, однако при жесткой деформации заднего отдела и наличии остеоартроза подтаранного сустава артродезирование является методом выбора [12].

Данные свидетельствуют о хороших функциональных исходах подтаранного и двойного подтаранного артродеза при различных показаниях, включая деформации заднего отдела стопы. По результатам систематического обзора D. Dutra et al., средние показатели AOFAS до и после артродезирующих вмешательств составили 44 и 79 баллов соответственно ($p < 0,001$) [13]. Вместе с тем данных о клинико-функциональных результатах именно в когорте пациентов с сопутствующим остеоартрозом голеностопного сустава (с учетом как деформационного, так и дегенеративного компонентов патологии) в отечественной литературе недостаточно.

Цель работы — оценить клинико-функциональные результаты хирургической коррекции плосковальгусной деформации стопы у пациентов с сопутствующим остеоартрозом голеностопного сустава.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование — ретроспективное, одноцентровое. В анализ включены данные 13 пациентов (13 стоп) с плосковальгусной деформацией стопы и сопутствующим поражением голеностопного сустава, проходивших хирургическое лечение на базе отделения ортопедии ГКБ № 31 им. академика Г.М. Савельевой, являющегося клинической базой кафедры травматологии и ортопедии Медицинского института РУДН. Минимальный срок наблюдения после операции составил 12 месяцев.

Критерии включения. В исследование включали пациентов старше 18 лет с клинически и инструментально подтвержденной плосковальгусной деформацией стопы IV B стадии по классификации Myerson (*англ.*: Adult Acquired Flatfoot Deformity, AAFFD Stage IV B), сопровождавшейся признаками остеоартро-

за голеностопного сустава. Обязательным условием включения являлось выполнение хирургической коррекции деформации заднего отдела стопы и наличие полного клинико-функционального обследования до операции и в послеоперационном периоде.

Критерии не включения. В исследование не включали пациентов с ревматоидным артритом, нейроартропатией (стопой Шарко), выраженной сосудистой патологией нижних конечностей, идиопатическим плоскостопием без признаков ПКДС по классификации Myerson, а также случаи с отсутствием полного клинического наблюдения в послеоперационном периоде.

В исследуемую когорту вошли 13 клинических случаев (13 стоп). Медиана возраста составила 62 [55; 69,5] года. По этиологическому признаку превалировала посттравматическая деформация (табл. 1).

Всем пациентам выполняли операции, направленные на коррекцию деформации заднего отдела стопы. В зависимости от клинической ситуации применяли различные варианты артрорезирующих вмешательств, включая подтаранный артрорез и двойной артрорез (таранно-пяточный и таранно-ладьевидный суставы). В двух случаях выполнен артрорез голеностопного сустава (тибиоталарный артрорез). У одного пациента на втором этапе лечения через три года после подтаранного артрореза выполнено тотальное эндопротезирование голеностопного сустава (см. клинический пример). Объем оперативного вмешательства определяли индивидуально на основании клинической картины и данных лучевых методов исследования. Фиксацию суставов осуществляли канюлированными компрессирующими винтами.

Клинико-функциональные результаты оценивали до операции и при контрольном обследовании после хирургического лечения. Интенсивность болевого синдрома определяли по визуально-аналоговой шкале боли (VAS, 0–10 баллов). Функциональное состояние стопы и голеностопного сустава оценивали с использованием шкал AOFAS (*англ.*: American Orthopaedic Foot and Ankle Society Ankle–Hindfoot Score, 0–100 баллов) и FAOS (*англ.*: Foot and Ankle Outcome Score, 0–100 баллов).

Статистическую обработку данных проводили с использованием стандартных методов вариационной статистики в программе IBM SPSS Statistics version 27.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA). Количественные показатели представлены в виде медианы и межквартильного размаха — Me [Q1; Q3], а также среднего значения и стандартного отклонения — $M \pm SD$. Для сравнения показателей до и после хирургического лечения применялся точный критерий знаковых рангов Уилкоксона для связанных выборок. Статистически значимыми считались различия при уровне значимости $p < 0,05$.

Исследование проводили в соответствии с этическими принципами Хельсинкской декларации, от всех пациентов получено информированное согласие на опубликование информации и изображений в научной статье.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По данным оценки болевого синдрома по VAS, исходно медиана составила 8 [7; 8] баллов, что соответствует выраженному болевому синдрому. После операции показатель VAS статистически значимо снизился по сравнению с дооперационным уровнем: медиана 2 [2; 3,5] балла (критерий Уилкоксона, $T = 0$; $p = 0,000244$). Относительное снижение болевого синдрома по медиане составило 75 %.

Показатель FAOS исходно составил 22 [16,5; 42] балла, что свидетельствует о выраженном функциональном дефиците. После лечения показатель FAOS статистически значимо увеличился по сравнению с исходным уровнем: медиана 86 [69; 89,5] баллов ($T = 4$; $p = 0,001709$). Прирост показателя FAOS по медиане составил 64 балла.

Показатель AOFAS до операции составил 40 [32,5; 42,5] балла, что соответствует неудовлетворительному функциональному состоянию. Выявлено статистически значимое улучшение показателя AOFAS после лечения: медиана 88 [80; 90] баллов ($T = 1$; $p = 0,000977$). Таким образом, прирост показателя AOFAS по медиане составил 48 баллов, что переводит большинство пациентов в категорию хорошего и отличного результата. Сравнительная оценка клинико-функциональных показателей до и после хирургического лечения представлена в таблице 2.

Таблица 1

Половозрастная и клиническая характеристика пациентов ($n = 13$)

Показатель		Значение	
Возраст, лет	(Me [Q1; Q3])	62 [55; 69,5]	
	($M \pm SD$)	$63,0 \pm 7,8$	
		абс.	%
Пол	Женщины	9	69,2
	Мужчины	4	30,8
Сторона поражения	Левая	8	61,5
	Правая	5	38,5
Этиология деформации	Посттравматическая	9	69,2
	Дегенеративная	4	30,8

Примечание: Me — медиана; Q1, Q3 — нижний и верхний квартили; M — среднее значение; SD — стандартное отклонение. Количественные данные представлены в виде Me [Q1; Q3] и $M \pm SD$.

Таблица 2

Сравнительная оценка клинико-функциональных показателей до и после хирургического лечения

Показатель	До операции, Ме [Q1; Q3]	После операции, Ме [Q1; Q3]	T (Wilcoxon)	p
VAS, баллы	8 [7; 8]	2 [2; 3,5]	0	0,000244
FAOS, баллы	22 [16,5; 42]	86 [69; 89,5]	4	0,001709
AOFAS, баллы	40 [32,5; 42,5]	88 [80; 90]	1	0,000977

Примечание: Ме — медиана; Q1, Q3 — нижний и верхний квартили; T — точная статистика критерия знаковых рангов Уилкоксона (сумма рангов меньшей группы, W- или W+); VAS — Visual Analogue Scale; FAOS — Foot and Ankle Outcome Score; AOFAS — American Orthopaedic Foot and Ankle Society Ankle–Hindfoot Score..

Клинический пример

Пациентка 54 лет с двусторонним поражением. Диагноз: плосквальгусная деформация стоп IV B стадии, посттравматический остеоартроз подтаранного и голеностопного суставов. Травма получена восемь лет назад. Первый этап лечения: подтаранный артродез левой стопы (2020 г.) выполнен как этапное вмешательство по коррекции деформации и нормализации биомеханики в условиях прогрессирующего остеоартроза голеностопного сустава. Исходные показатели: VAS — 8 баллов, AOFAS — 45 баллов. Предоперационная рентгенометрия: MDTA = 98°, TTA = 93°, Tilt = 5°. После завершения обоих этапов хирургического лечения: MDTA = 90°, TTA = 90°, Tilt = 0°.

После достижения стойкого костного блока и стабилизации деформации через три года (2023 г.) выполнено тотальное эндопротезирование голеностопного сустава (второй этап). Данный случай иллюстрирует правомерность двухэтапного подхода при выраженном сопутствующем остеоартрозе голеностопного сустава у пациентов с плосквальгусной деформацией (рис. 1).



Рис. 1. Рентгенограммы стоп пациентки на этапах хирургического лечения плосквальгусной деформации и остеоартроза голеностопного сустава: 1 — до операции, боковая проекция; 2 — до операции, прямая проекция; 3 — после хирургического лечения, боковая проекция; 4 — после хирургического лечения, прямая проекция; 5 — после первого этапа хирургического лечения, боковая проекция; 6 — после первого этапа хирургического лечения, прямая проекция; 7 — после второго этапа хирургического лечения, боковая проекция; 8 — после второго этапа хирургического лечения, прямая проекция

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные в настоящем исследовании результаты демонстрируют статистически значимое и клинически существенное улучшение всех трех оценочных показателей (VAS, FAOS и AOFAS) после хирургической коррекции плосквальгусной деформации у пациентов с остеоартрозом голеностопного сустава. Прирост AOFAS с медианы 40 до 88 баллов, а FAOS — с 22 до 86 баллов

соответствует переходу большинства пациентов из категории неудовлетворительного в категорию хорошего и отличного функционального статуса, что согласуется с результатами международных когортных исследований.

По данным систематического обзора J.M.G. Dutra et al., охватившего 180 пациентов после подтаранного артродеза, среднее значение AOFAS возросло с 44 до 79 баллов ($p < 0,001$) при среднем сроке наблюдения 18 месяцев [13]. В нашем исследовании медиана AOFAS после операции составила 88 баллов, что несколько превышает описанные в литературе показатели. Это может быть обусловлено различиями в отборе пациентов, сроках контрольного обследования и применяемых хирургических техниках. Следует отметить, что часть авторов обращает внимание на ограничения шкалы AOFAS как невалидированного инструмента и рекомендует ее использование в сочетании с валидированными PROMS (такими как FAOS); в отечественной практике шкалу AOFAS применяют в составе комплексных протоколов послеоперационной реабилитации [14].

Значительное снижение болевого синдрома по VAS (с медианы 8 до 2 баллов) соответствует результатам подтаранного артродеза при ПКДС с дегенерацией подтаранного сустава, опубликованным A. Bernasconi et al.: у 33 пациентов медианного возраста 62 года отмечено значимое улучшение функционально-анатомических параметров [15]. Важно, что возрастной и демографический профиль нашей когорты (медиана возраста 62 года, преобладание женщин) практически идентичен таковому в данном исследовании, что повышает сопоставимость результатов.

Высокая доля посттравматической этиологии в нашей когорте (69,2 %) соответствует эпидемиологическим данным: по сведениям V. Valderrabano et al., от 70 до 80 % случаев остеоартроза голеностопного сустава в общей популяции обусловлены предшествующей травматизацией [5]. В остальных случаях деформация носит идиопатический (первично-дегенеративный) характер, что также наблюдалось в нашей когорте: у четырех из 13 пациентов (30,8 %) выявлена дегенеративная этиология плосковальгусной деформации без указаний на предшествующую травму. Посттравматические деформации, как правило, отличаются более тяжелым дегенеративным поражением суставных поверхностей и требуют более обширного артродезирования. Именно это определило применение двойного подтаранного артродеза у значительной части пациентов исследуемой группы.

В представленном клиническом примере пациентке с посттравматическим остеоартрозом голеностопного сустава первым этапом выполнен подтаранный артродез с целью коррекции деформации и оптимизации биомеханических условий для последующего тотального эндопротезирования голеностопного сустава. Данная тактика получает все большее признание. Подчеркивается, что при наличии выраженной деформации стопы с одновременным остеоартрозом голеностопного сустава предварительная коррекция стопы обязательна, поскольку некорректированная деформация может привести к эксцентричной нагрузке на компоненты протеза с ранним асептическим расшатыванием [3, 12, 16]. Согласно систематическому обзору Д.В. Буркова с соавт., включившему анализ 13 859 первичных эндопротезирований голеностопного сустава, неустраненные осевые деформации являются одной из основных причин необходимости ревизионных вмешательств, частота которых в течение 19 лет наблюдения составляет в среднем 12,9 % [11].

В многоцентровом рандомизированном контролируемом исследовании TARVA (2023), сравнившем ТЭГС и артродез голеностопного сустава при конечной стадии остеоартроза, продемонстрировано сопоставимое улучшение качества жизни, однако ни одна из групп не включала пациентов с некорректированной деформацией стопы [17], что подтверждает необходимость поэтапного подхода.

Ограничения исследования

Во-первых, ретроспективный дизайн и небольшой объем выборки ($n = 13$) не позволяют делать генерирующие выводы, результаты следует интерпретировать с осторожностью с учетом возможного систематического отбора пациентов. Во-вторых, отсутствие контрольной группы не позволяет провести сравнение с альтернативными методами лечения. В-третьих, срок наблюдения 12 месяцев является минимальным для оценки долгосрочных исходов и прогрессирования смежного остеоартроза.

К числу **преимуществ исследования** относится применение валидированных (FAOS) и широко используемых (AOFAS, VAS) инструментов оценки, их надежность и воспроизводимость подтверждены в специальных психометрических работах [18, 19]. Шкалу AOFAS применяют как основной инструмент количественной оценки клинко-функциональных результатов реконструктивных вмешательств на стопе [20]. Проведен анализ результатов клинической подгруппы ПКДС IV В стадии с остеоартрозом голеностопного сустава, лечение данной нозологии в отечественной литературе освещено недостаточно.

Полученные результаты могут быть сопоставлены с данными по более ранним стадиям ПКДС [21] и создают основу для планирования проспективных многоцентровых исследований с более длительным сроком наблюдения.

Уточнение диагностических критериев стадирования в рамках классификации PCFD, включая верификацию деформационного и дегенеративного компонентов, остается приоритетной задачей для повышения однородности сравниваемых когорт [22]. Предоперационное планирование, в том числе лучевая оценка параметров деформации и состояния суставного хряща, имеет принципиальное значение для выбора оптимального объема вмешательства при реконструкции стопы [23]. Роль нестабильности заднего отдела стопы в прогрессировании дегенеративных изменений голеностопного сустава подтверждается данными отечественных исследований. Так, оптимизация методики латеральной удлиняющей остеотомии пяточной кости по результатам КТ-исследования в российской популяции свидетельствует о значимости точного позиционирования костных структур для восстановления нормального распределения нагрузки в тибиталарном сочленении [24].

В ситуациях тяжелого дефицита костной ткани таранной кости применение индивидуальных имплантатов позволяет расширить показания к ТЭГС при сложных многоэтапных реконструкциях [25]. Систематизация исторических и современных подходов к лечению пациентов с плосковальгусной деформацией свидетельствует о том, что консервативные и хирургические методы продолжают эволюционировать в сторону более персонализированных и функционально ориентированных стратегий [26]. Методы лучевой диагностики, включая МРТ и КТ, играют ключевую роль в уточнении степени дегенеративного поражения голеностопного сустава и смежных структур заднего отдела стопы, что непосредственно влияет на выбор хирургической тактики [27]. Сравнение долгосрочных результатов изолированного подтаранного артродеза подтверждает, что при соблюдении показаний и технических условий операции стойкий удовлетворительный результат достигается у большинства пациентов [28]. Отечественный опыт применения индивидуализированного подхода к выбору уровня остеотомии пяточной кости при плосковальгусной деформации, основанного на 3D-моделировании, демонстрирует улучшение показателей по шкале AOFAS и рентгенологических параметров через 12 месяцев наблюдения [29], что коррелирует с результатами нашего исследования.

Сравнение двойного подтаранного артродеза с комбинацией таранно-ладьевидного артродеза и смешивающей остеотомии пяточной кости показало сопоставимые функциональные результаты при схожих профилях осложнений, что позволяет считать оба подхода равноправными в соответствующих клинических ситуациях [30]. При более выраженном поражении с вовлечением таранно-пяточного, таранно-ладьевидного и пяточно-кубовидного суставов вопрос о целесообразности двойного в сравнении с тройным артродезом остается дискуссионным. В проспективном сравнительном исследовании A. Fadle et al. значимых различий в функциональных исходах не выявлено [31]. Для пациентов с посттравматическим остеоартрозом подтаранного сустава после переломов пяточной кости подтаранный артродез демонстрирует удовлетворительные функциональные результаты, хотя предшествующий характер перелома оказывает значимое влияние на исход [32].

Алгоритм послеоперационного ведения пациентов после эндопротезирования голеностопного сустава, включая реабилитационные протоколы и контроль осложнений, разработан и верифицирован на российских клинических данных [33]. Вместе с тем следует подчеркнуть, что накопленный опыт реконструктивных вмешательств при деформациях стоп применительно к педиатрической когорте не может быть напрямую экстраполирован на взрослых пациентов ввиду принципиальных отличий в патогенезе и хирургических подходах [34].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хирургическая коррекция плосковальгусной деформации стопы посредством артродезирующих вмешательств на заднем отделе стопы (подтаранный артродез, двойной артродез) обеспечивает статистически значимое улучшение клинико-функциональных показателей у пациентов с сопутствующим остеоартрозом голеностопного сустава. Полученные данные свидетельствуют об эффективности примененной хирургической тактики. В случаях тяжелого остеоартроза голеностопного сустава обоснованным является поэтапный подход: первым этапом выполняют коррекцию деформации заднего отдела стопы, вторым (при необходимости) — тотальное эндопротезирование голеностопного сустава, реабилитация после которого требует четкого протокола послеоперационного ведения.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено без финансовой поддержки.

Информированное согласие. От всех пациентов, клинические данные которых приведены в статье, получено письменное информированное согласие на публикацию изображений и клинических сведений в научном журнале.

Информация об использовании генеративного искусственного интеллекта. При подготовке рукописи не использован генеративный искусственный интеллект.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Myerson MS, Thordarson DB, Johnson JE, et al. Classification and Nomenclature: Progressive Collapsing Foot Deformity. *Foot Ankle Int.* 2020;41(10):1271-1276. doi: 10.1177/1071100720950722.
- Johnson KA, Strom DE. Tibialis posterior tendon dysfunction. *Clin Orthop Relat Res.* 1989;(239):196-206.
- Myerson MS. Adult acquired flatfoot deformity: treatment of dysfunction of the posterior tibial tendon. *Instr Course Lect.* 1997;46:393-405.
- Шахул Хамид А.Б., Макинян Л.Г., Абу З.В., и др. Современное состояние диагностики и лечения ревматоидного артрита. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки.* 2021;(5):224-229. doi: 10.37882/2223-2966.2021.05.34.
- Valderrabano V, Horisberger M, Russell I, et al. Etiology of ankle osteoarthritis. *Clin Orthop Relat Res.* 2009;467(7):1800-1806. doi: 10.1007/s11999-008-0543-6.
- Шкуро К.В., Зейналов В.Т., Арапова И.А. и др. Анатомически и функционально выгодные ориентиры при коррекции посттравматической деформации заднего отдела стопы: ретроспективное когортное контролируемое исследование. *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова.* 2023;30(1):15-28. doi: 10.17816/vto321523.
- Губарь И.Е., Леонова С.Н., Усольцев И.В. Хирургическая коррекция вальгусной деформации заднего отдела стопы (клинический случай). *Acta Biomedica Scientifica.* 2025;10(6):167-177. doi: 10.29413/ABS.2025-10.6.18.
- Айрапетов Г.А., Воронников А.А. Современные методы лечения артроза первого плюснефалангового сустава. *Клиническая практика.* 2021;12(2):103-109. doi: 10.17816/clinpract65062.
- Henry JK, Shakked R, Ellis SJ. Adult-Acquired Flatfoot Deformity. *Foot Ankle Orthop.* 2019;4(1):2473011418820847. doi: 10.1177/2473011418820847.
- Arain A, Harrington MC, Rosenbaum AJ. Progressive Collapsing Foot Deformity. 2024 May 28. In: *StatPearls [Internet]*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2026 Jan-.
- Бурков Д.В., Мурылев В.Ю., Гаркави А.В., и др. Результаты выживаемости имплантатов после тотального эндопротезирования голеностопного сустава (систематический обзор литературы). *Вестник медицинского института «РЕАВИЗ»: Реабилитация, Врач и Здоровье.* 2025;15(2):89-96. doi: 10.20340/vmi-rvz.2025.2.CLIN.4.
- Sangeorzan BJ, Hintermann B, de Cesar Netto C, et al. Progressive Collapsing Foot Deformity: Consensus on Goals for Operative Correction. *Foot Ankle Int.* 2020;41(10):1299-1302. doi: 10.1177/1071100720950759.
- Dutra JMG, Pinto JN, Mansur H. Arthroscopic subtalar arthrodesis – results and complications: a systematic review. *J Foot Ankle.* 2020;14(2):205-210. doi: 10.30795/jfootankle.2020.v14.1173.
- Горбатов Р.О., Павлов Д.В., Мотякина О.П., и др. Персонализированная реабилитация больных после артродеза голеностопного сустава. *Кафедра травматологии и ортопедии.* 2016;4(20):44-49.
- Bernasconi A, Lalevée M, Fernando C, et al. Correction of progressive collapsing foot deformity classes after isolated arthroscopic subtalar arthrodesis. *Foot and Ankle Surgery.* 2025;31(1):65-73. doi: 10.1016/j.fas.2024.07.002.
- Rungprai C, Phisitkul P, Femino JE, et al. Outcomes and Complications After Open Versus Posterior Arthroscopic Subtalar Arthrodesis in 121 Patients. *J Bone Joint Surg Am.* 2016;98(8):636-646. doi: 10.2106/JBJS.15.00702.
- Goldberg AJ, Chowdhury K, Bordea E, et al. Total ankle replacement versus ankle arthrodesis for patients aged 50-85 years with end-stage ankle osteoarthritis: the TARVA RCT. *Health Technol Assess.* 2023;27(5):1-80. doi: 10.3310/PTYJ1146.
- Van Lieshout EMM, De Boer AS, Meuffels DE, et al. American Orthopaedic Foot and Ankle Society (AOFAS) Ankle-Hindfoot Score: a study protocol for the translation and validation of the Dutch language version. *BMJ Open.* 2017;7(2):e012884. doi: 10.1136/bmjopen-2016-012884.
- Roos EM, Brandsson S, Karlsson J. Validation of the foot and ankle outcome score for ankle ligament reconstruction. *Foot Ankle Int.* 2001;22(10):788-794. doi: 10.1177/107110070102201004.
- Шахул Хамид А.Б., Макинян Л.Г., Айрапетов Г.А., и др. Оценка реконструкции переднего отдела стопы у пациентов с ревматоидным артритом. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки.* 2021;(6):241-244. doi: 10.37882/2223-2966.2021.06.40.
- Lewis TL, Goff TAJ, Ray R, et al. Clinical outcomes of subtalar arthroereisis for the treatment of stage 1 flexible progressive collapsing foot deformity. *Eur J Orthop Surg Traumatol.* 2024;34(6):2933-2940. doi: 10.1007/s00590-024-04007-4.
- Li S, Zhu M, Gu W, et al. Diagnostic Accuracy of the Progressive Collapsing Foot Deformity (PCFD) Classification. *Foot Ankle Int.* 2022;43(6):800-809. doi: 10.1177/10711007221078000.
- Meyr AJ, Sansosti LE, Ali S. A pictorial review of reconstructive foot and ankle surgery: evaluation and intervention of the flatfoot deformity. *J Radiol Case Rep.* 2017;11(6):26-36. doi: 10.3941/jrcr.v11i6.2757.
- Гуди С.М., Семенова Д.А., Васильев К.О. и др. Оптимальный метод латеральной удлиняющей остеотомии пяточной кости: томографическое исследование среди населения России. *Гений ортопедии.* 2024;30(6):855-862. doi: 10.18019/1028-4427-2024-30-6-855-862.
- Ketz J, Myerson M, Sanders R. The salvage of complex hindfoot problems with use of a custom talar total ankle prosthesis. *J Bone Joint Surg Am.* 2012;94(13):1194-200. doi: 10.2106/JBJS.K.00421.
- Biz C, Cerchiaro M, Mori F, et al. Flatfoot over the centuries: the background of current conservative and operative treatments. *Int Orthop.* 2023;47(9):2357-2368. doi: 10.1007/s00264-023-05837-3.
- Omar IM, Weaver JS, Altbach MI, et al. Imaging of osteoarthritis from the ankle through the midfoot. *Skeletal Radiol.* 2023;52(11):2239-2257. doi: 10.1007/s00256-023-04287-7.
- Самков А.С., Зейналов В.Т., Левин А.Н., и др. Малоинвазивный артродез подтаранного сустава. *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова.* 2013;20(4):45-49. doi: 10.17816/vto20130445-49.
- Гуди С.М., Семенова Д.А., Крикунова В.В. и др. Персонализированный подход к лечению пациентов с плосковальгусной деформацией стопы: способ определения уровня остеотомии переднего отростка пяточной кости. *Гений ортопедии.* 2025;31(6):744-755. doi:10.18019/1028-4427-2025-31-6-744-755.
- Fischer S, Oepping J, Altmeyen J, et al. Adult-Acquired Flatfoot Deformity: Combined Talonavicular Arthrodesis and Calcaneal Displacement Osteotomy versus Double Arthrodesis. *J Clin Med.* 2022;11(3):840. doi: 10.3390/jcm11030840.
- Fadle AA, El-Adly W, Attia AK, et al. Double versus triple arthrodesis for adult-acquired flatfoot deformity due to stage III posterior tibial tendon insufficiency: a prospective comparative study of two cohorts. *Int Orthop.* 2021;45(9):2219-2229. doi: 10.1007/s00264-021-05041-1.
- van der Vliet QMJ, Hietbrink F, Casari F, et al. Factors Influencing Functional Outcomes of Subtalar Fusion for Posttraumatic Arthritis After Calcaneal Fracture. *Foot Ankle Int.* 2018;39(9):1062-1069. doi: 10.1177/1071100718777492.

33. Котельников Г.П., Иванов В.В., Николаенко А.Н. и др. Алгоритм послеоперационного ведения пациентов при эндопротезировании голеностопного сустава. *Гений ортопедии*. 2025;31(6):729-736. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-6-729-736.
34. Транковский С.Е., Процко В.Г., Ахпашев А.А. Анализ результатов хирургического лечения плосковальгусной деформации стоп у детей и подростков. *Клиническая практика*. 2023;14(1):77-83. doi: 10.17816/clinpract110806.

Статья поступила 16.04.2026; одобрена после рецензирования 27.05.2026; принята к публикации 09.06.2026.

The article was submitted 16.04.2026; approved after reviewing 27.05.2026; accepted for publication 09.06.2026.

Информация об авторах:

Айнуллох Абдурахмонович Ширинов — врач — травматолог-ортопед, аспирант, Shirinov_0101@mail.ru;
Николай Васильевич Загородний — доктор медицинских наук, академик РАН, профессор, руководитель клиники, заведующий кафедрой, zagorodniy51@mail.ru;
Дмитрий Владимирович Бурков — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, arthrodv@mail.ru;
Михаил Александрович Иманкулов — аспирант, Mikhail.Imankulov@mail.ru;
Александра Рустамовна Закирова — кандидат медицинских наук, arthro@mail.ru;
Александра Алексеевна Неверова — ординатор, naa010601@mail.ru.

Information about the authors:

Ainullokh A. Shirinov — Orthopaedic Surgeon, Postgraduate Student, Shirinov_0101@mail.ru;
Nikolay V. Zagorodniy — Doctor of Medical Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Head of the Clinic, Head of the Department, zagorodniy51@mail.ru;
Dmitriy Vladimirovich Burkov — Candidate of Medical Sciences, Orthopaedic Surgeon, arthrodv@mail.ru;
Mikhail A. Imankulov — Postgraduate Student, Mikhail.Imankulov@mail.ru;
Alexandra R. Zakirova — Candidate of Medical Sciences, arthro@mail.ru;
Alexandra A. Neverova — Resident, naa010601@mail.ru.

Вклад авторов

Ширинов А.А. — разработка концепции и дизайна исследования; сбор, анализ и интерпретация данных; написание текста рукописи; утверждение окончательного варианта рукописи; несёт ответственность за все аспекты рукописи.

Загородний Н.В. — разработка концепции исследования, научное руководство, редактирование рукописи, утверждение окончательного варианта.

Бурков Д.В. — участие в разработке хирургической концепции, редактирование рукописи, утверждение окончательного варианта.

Иманкулов М.А. — сбор и обработка клинических данных, участие в написании отдельных разделов рукописи.

Закирова А.Р. — анализ и интерпретация данных, редактирование рукописи.

Неверова А.А. — сбор данных, участие в подготовке рукописи.



Остеоинтеграция новых чрескожных имплантатов типа Press-fit с цинк-содержащим кальций-фосфатным покрытием в культю конечности в эксперименте

А.А. Еманов¹, В.П. Кузнецов^{1,3✉}, М.В. Стогов¹, Е.Н. Горбач¹, Н.В. Тушина¹, Е.Г. Комарова², Т.В. Толкачева², Ю.П. Шаркеев²

¹ Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова, Курган, Россия

² Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

³ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Виктор Павлович Кузнецов, wpkuzn@mail.ru

Аннотация

Введение. Применение транскутанных имплантатов для крепления протезов конечности является интенсивно развивающейся современной технологией восстановления функций утраченных конечностей, особенно актуальной при протезировании костей нижней конечности. Основной проблемой развития данной технологии является необходимость существенного повышения характеристик приживаемости имплантата, которые зависят от его дизайна и наличия биопокрытий.

Цель работы — экспериментальная оценка приживаемости оригинальных чрескожных имплантатов типа Press-Fit без покрытия поверхности остеointегируемой части и с нанесенным цинк-содержащим кальций-фосфатным покрытием при одноэтапной остеointеграции.

Материалы и методы. Исследование выполнено на 10 беспородных самцах собак возрастом от 1,5 до двух лет, масса — $(19,2 \pm 1,3)$ кг. Животным группы 1 ($n = 5$) имплантировано изделие без покрытия, животным группы 2 ($n = 5$) — с цинк-содержащим кальций-фосфатным покрытием. Оценка остеointеграции выполнена на основе комплекса клинических, рентгенологических и лабораторных исследований. Количественный анализ результатов осуществлен с применением статистических методов исследования.

Результаты. Через 26 недель после имплантации у всех животных сохранилась стабильность имплантата, и сформировался единый костно-имплантационный блок с непрерывной и достаточно плотной компактной пластинкой. У животных группы 1 отмечали органотипическую перестройку кости и компактизацию периостальных напластований. У животных группы 2 к этому сроку наблюдали завершение органотипической перестройки вокруг имплантата, что свидетельствует о признаках более выраженного остеогенеза в системе «имплантат – кость». Цинк-содержащее кальций-фосфатное покрытие способствовало формированию более плотных и минерализованных структур на поверхности имплантата и предотвращало отток кальция из компактной пластинки костной культы.

Обсуждение. Проведенный комплекс исследований и клинические наблюдения показали отсутствие существенных локальных и системных нарушений у экспериментальных животных в период остеointеграции имплантатов, что свидетельствует об их хорошей переносимости. Цинк-содержащее кальций-фосфатное покрытие обеспечило отличную биосовместимость и стимулировало остеогенез. Полученные результаты согласуются с данными, приведенными в отечественной и зарубежной научной литературе, и расширяют доказательную базу эффективности применения титановых SLM имплантатов типа Press-Fit с цинк-содержащим кальций-фосфатным покрытием в остеointеграционном протезировании.

Заключение. Полученные в ходе эксперимента данные показывают достаточно хороший результат остеointеграции имплантатов типа Press-Fit без покрытия поверхности остеointегируемой части и с нанесенным цинк-содержащим кальций-фосфатным покрытием без выраженных ограничений применения. Однако с точки зрения минимизации рисков следует отдать предпочтение изделиям с цинк-содержащим кальций-фосфатным покрытием остеointегируемой части.

Ключевые слова: остеointеграция, протезирование, титановый имплантат, Press-Fit, кальций-фосфатное покрытие

Для цитирования: Еманов А.А., Кузнецов В.П., Стогов М.В., Горбач Е.Н., Тушина Н.В., Комарова Е.Г., Толкачева Т.В., Шаркеев Ю.П. Остеоинтеграция новых чрескожных имплантатов типа Press-fit с цинк-содержащим кальций-фосфатным покрытием в культю конечности в эксперименте. *Гений ортопедии*. 2026;32(4):529-539. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-4-529-539.



Osseointegration of new percutaneous Press-fit implants coated with zinc-containing calcium phosphate in the limb stump: experimental study

A.A. Emanov¹, V.P. Kuznetsov^{1,3✉}, M.V. Stogov¹, E.N. Gorbach¹, N.V. Tushina¹, E.G. Komarova², T.V. Tolkacheva², Yu.P. Sharkeev²

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

² Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation

³ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

Corresponding author: Victor P. Kuznetsov, wpkuzn@mail.ru

Abstract

Introduction The use of transcutaneous implants for the attachment of limb prostheses is a rapidly developing modern technology for restoring function of lost limbs, particularly relevant for lower limb prosthesis applications. The primary challenge in developing this technology is the need to significantly improve implant survival, which depends on its design and the presence of biocoatings.

The **purpose** of the work is to experimentally evaluate the survival rate of original Press-Fit-type percutaneous implants produced without coating the surface of the osseointegrated part and with an applied zinc-containing calcium phosphate coating during one-stage osseointegration.

Materials and Methods The study was performed on 10 mongrel male dogs aged 1.5 to 2 years and weighing 19.2 ± 1.3 kg. Animals in Group 1 ($n = 5$) received an uncoated implant, while animals in Group 2 ($n = 5$) received an implant coated with a zinc-containing calcium phosphate. Osseointegration was assessed using a combination of clinical, radiographic, and laboratory studies. Quantitative analysis of the results was performed using statistical methods.

Results Twenty-six weeks after implantation, all animals had implant stability. A single bone-implantation unit with a continuous and sufficiently dense compact plate was formed. Animals in Group 1 demonstrated organotypic bone remodeling and compaction of periosteal layers. By that time, animals in Group 2 featured completion of organotypic remodeling around the implant that indicated signs of more pronounced osteogenesis in the implant-bone system. The zinc-containing calcium phosphate coating promoted the formation of denser and more mineralized structures on the implant surface and prevented calcium efflux from the compact plate of the bone stump.

Discussion The studies conducted and clinical observations demonstrated the absence of significant local or systemic disorders in the experimental animals during the implant osseointegration period, indicating good tolerability. The zinc-containing calcium phosphate coating provided excellent biocompatibility and stimulated osteogenesis. The obtained results are consistent with data presented in the domestic and international scientific literature and expand the evidence base of the effectiveness of Press-Fit titanium SLM implants with zinc-containing calcium phosphate coating for osseointegration prosthetics.

Conclusion The data obtained during the experiment show fairly good results of osseointegration of Press-Fit implants without coating the surface of the osseointegrated part and with an applied zinc-containing calcium phosphate coating. They did not show pronounced restrictions on their use. However, from the point of view of minimizing the risks, preference should be given to product with a zinc-containing calcium phosphate coating of the osseointegrated part.

Keywords: osseointegration, prosthetics, titanium implant, Press-Fit, calcium phosphate coating

For citation: Emanov AA, Kuznetsov VP, Stogov MV, Gorbach EN, Tushina NV, Komarova EG, Tolkacheva TV, Sharkeev YuP. Osseointegration of new percutaneous Press-fit implants coated with zinc-containing calcium phosphate in the limb stump: experimental study. *Genij Ortopedii*. 2026;32(4):529-539. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-4-529-539.

© Emanov A.A., Kuznetsov V.P., Stogov M.V., Gorbach E.N., Tushina N.V., Komarova E.G., Tolkacheva T.V., Sharkeev Yu.P., 2026
© Translator Tatyana A. Malkova, 2026

ВВЕДЕНИЕ

Применение транскутаных имплантатов для крепления протезов конечности является интенсивно развивающейся современной технологией восстановления функций утраченных конечности [1–6], особенно актуальной при протезировании костей нижней конечности [7, 8]. Основной проблемой развития данной технологии является необходимость существенного повышения характеристик приживаемости имплантата, которые зависят от его дизайна и наличия биопокровов [9–13]. В части приемлемого дизайна остеointегрируемых имплантатов при протезировании длинных костей конечностей предпочтение все чаще отдают системам типа Press-Fit [14–19]. Среди дополнительных факторов, способствующих повышению качества остеointеграции титановых имплантатов типа Press-Fit, предлагают варианты их дополнительной фиксации и компрессионного нагружения протезируемой кости [20], а также нанесение на остеointегрируемую часть биоактивных и антибактериальных покрытий, в частности цинк-содержащих кальций-фосфатных покрытий [21–22].

Цель работы — экспериментальная оценка приживаемости оригинальных чрескожных имплантатов типа Press-Fit без покрытия поверхности остеointегрируемой части и с нанесенным цинк-содержащим кальций-фосфатным покрытием при одноэтапной остеointеграции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование выполнено на 10 беспородных самцах собак возрастом от 1,5 до двух лет, масса — $(19,2 \pm 1,3)$ кг. Животным группы 1 ($n = 5$) имплантировано изделие без покрытия, животным группы 2 ($n = 5$) — с цинк-содержащим кальций-фосфатным покрытием.

Экспериментальных животных содержали в виварии НМИЦ ТО имени академика Г.А. Илизарова. Собаки находились в отдельных индивидуальных боксах с оборудованными емкостями для корма и воды, в качестве подстилки использовали сено. Клетки и боксы подвергали ежедневной влажной уборке. Корм животные получали один раз в день, чистую питьевую воду — без ограничений. Перед поступлением в эксперимент животные проходили карантин в течение 30 суток. Для оценки эффективности и безопасности применения экспериментальных образцов изделий длительность наблюдения после имплантации составила 26 недель.

До начала исследования получено одобрение локального этического комитета (протокол от 29.11.2024 № 1(76)). Исследование проведено с соблюдением принципов гуманного обращения с лабораторными животными в соответствии с требованиями Европейской конвенции по защите позвоночных животных, используемых для экспериментов и других научных целей, и Директивой 2010/63/EU Европейского парламента и Совета Европейского союза от 22.09.2010 по охране животных, используемых в научных целях.

Дизайн имплантата

Имплантаты изготовлены методом SLM-печати на 3D принтере DMP Flex 350 (США) из титанового порошка марки ПТН-8 российского производства, фракция 15–45 мкм. Дизайн описан авторами в патентах на полезную модель РФ № 194912 и 207637 [23, 24]. Фото имплантатов приведены на рис. 1.

Для обеспечения приживаемости в трубчатой кости культы конечности конструкция погружной части имплантата выполнена в виде усеченного конуса с зубьями на заходной ступенчатой и калибрующей частях. Зубья заходной части выполнены с постепенным уменьшением диаметра каждого зуба к концу имплантата на величину $D_i - D_{i-1} = 0,1$ мм (рис. 2, а).

Заходная ступенчатая часть имеет зубья с режущими кромками и канавки для срезаемой костной стружки, которая выполняет функцию аутологичного материала (рис. 2, б, в). В режущих зубьях заходной части выполнены отверстия, соединенные со сквозным каналом внутри имплантата для подачи лекарственных средств. Сквозной канал закрыт заглушкой.

Режущие кромки на зубьях заходной и калибрующей частей наклонены под углом 5° (рис. 2, в). Расположение кромок по окружности зубьев показано на рис. 2, г. Плоские участки на зубьях обеспечивают подвод лекарственных средств в системе «кость – имплантат».

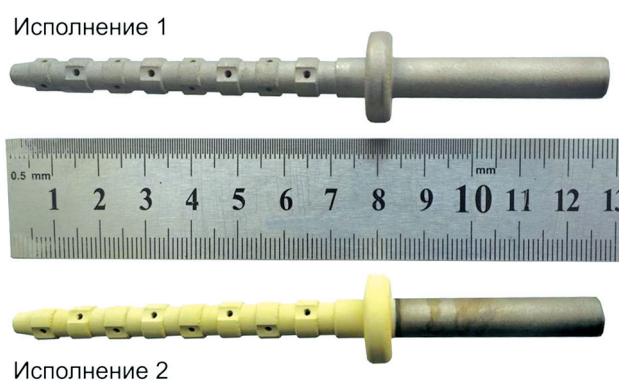


Рис. 1. Внешний вид имплантатов типа Press-Fit

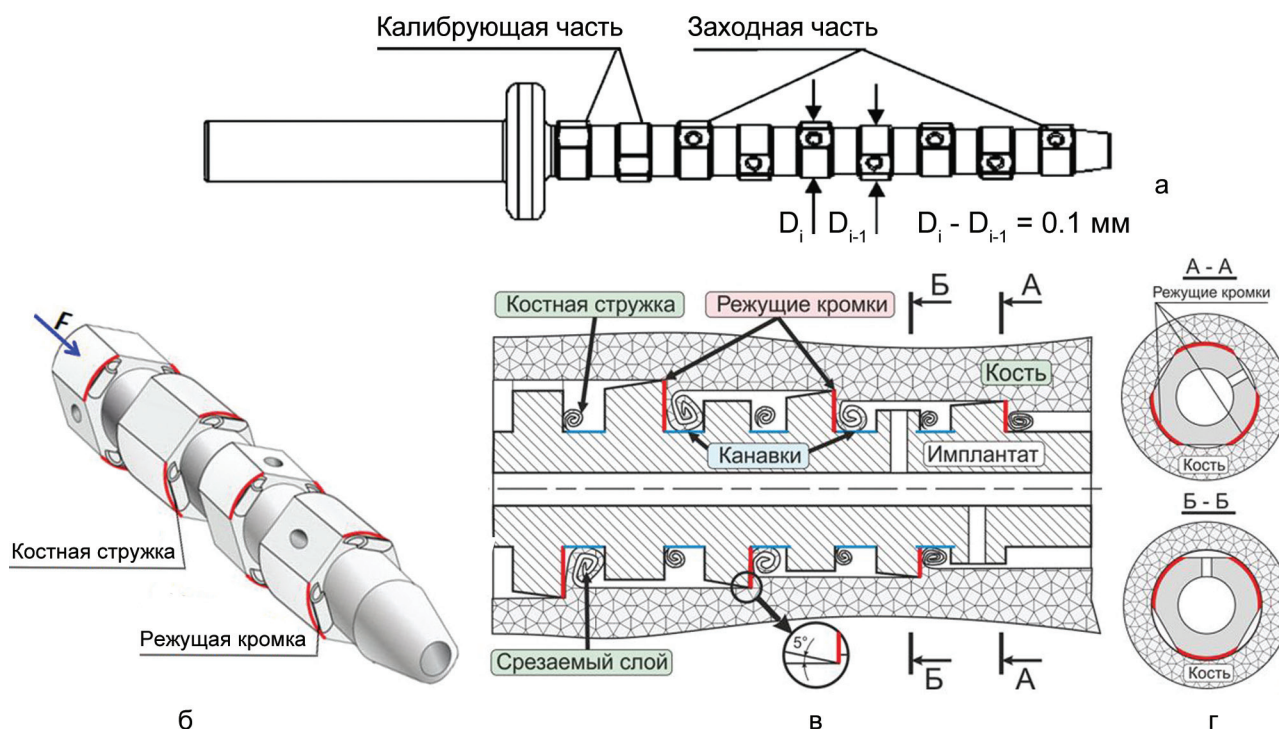


Рис. 2. Имплантат типа Press-Fit для протезирования культей трубчатых костей: а — схематическое изображение; б — объемное изображение заходной части; в — продольное сечение заходной части; г — поперечные сечения заходной части

Нанесение покрытия

Для получения имплантов группы 2 проводили модифицирование поверхности остеointегрируемой части изделий путем нанесения цинк-содержащего кальций-фосфатного покрытия. Нанесение покрытий осуществляли методом микродугового оксидирования (МДО), позволяющим осаждать однородное покрытие на поверхности образцов сложной геометрической формы любого типоразмера. Полупромышленная установка МДО Micro-Arc 3.0 (ИФПМ СО РАН, Томск) включает в себя высоковольтный источник импульсного тока, электролитическую водоохлаждаемую титановую ванну (катод), титановые держатели образцов (анод) и компьютер для управления процессом МДО [21, 25, 26]. Состав суспензии и электрофизические параметры нанесения покрытий приведены в работе М.В. Стогова с соавт. [21]. Входящий в состав суспензии цинк-замещенный гидроксипатит получен механохимическим синтезом [27]. Сформированные на имплантатах покрытия имели толщину 30–35 мкм и шероховатость поверхности $R_a = 2,0 - 2,5$ мкм. В наших предыдущих работах [28, 29] детально охарактеризованы микроструктура, фазовый и химический составы, физико-химические и механические свойства покрытий. Длительность стерилизационной обработки в сухожаровом шкафу составляла 60 мин при температуре 180 °С.

Установка имплантата в культю конечности

Исследование особенностей остеointеграции, а также оценку профиля безопасности и определение ограничений, связанных с эксплуатацией изделия на постампутированной конечности, выполняли опытным путем на двух группах беспородных собак. Операции проводили двухэтапно в стерильных условиях под внутривенным наркозом пропофолом 10 мг/мл с предварительной премедикацией.

На первом этапе формировали культю конечности, для чего выполняли разрез кожи в области средней трети голени с медиальной поверхности, мягкие ткани препарировали и осуществляли остеотомию голени осциллирующей пилой на границе верхней трети и средней трети. После формирования культи послойно ушивали мягкие ткани.

Второй этап эксперимента проводили через 10 недель. В ходе повторной операции в области культи формировали кожный лоскут, адаптированный к краям кости. Далее костномозговой канал рассверливали с учетом диаметра имплантата, в нашем случае — до 7 мм. Имплантат забивали в отверстие точно направленными короткими ударами молотка (рис. 3).



Рис. 3. Фото процедуры установки имплантата типа Press-Fit в трубчатую кость

Для выхода наружной части имплантата в кожном лоскуте формировали отверстие, после чего моделировали культю и послойно ушивали мягкие ткани. Для предотвращения расшатывания и задания компрессионной нагрузки 20 Н на протезируемую кость в течение первых пяти недель после операции имплантат фиксировали специальным устройством (рис. 4, б) [30].

Оценка остеоинтеграции

Для оценки эффективности (приживаемости) и безопасности применения имплантатов выполняли комплекс клинических, рентгенологических, гистологических и лабораторных исследований.

Клиническое наблюдение за животными (физикальное обследование, определение локального статуса, состояние мягких тканей и послеоперационных ран) проводили на протяжении всего периода наблюдения.

Для рентгенографии использовали рентгеновский аппарат Comrast (Милан, Италия). Сила тока составляла 60 мА, напряжение — 57–69 кВ, время экспозиции — 0,4–0,6 с. Конкретные параметры работы аппарата зависели от конституции животного. Рентгенографию конечности в прямой и боковой проекциях выполняли до и после оперативного вмешательства, через каждые семь дней после операции в первые пять недель, а затем один раз в 14 дней эксперимента.

Гистологическое исследование

Весовую долю Са и Р (в вес. %) в разных областях культи большеберцовой кости с интегрированным имплантатом определяли с использованием электронного сканирующего микроскопа Zeiss EVO MA18 (Carl Zeiss Group, Германия) и энергодисперсионного спектрометра BRUKER QUANTAX 200 - XFlash 6/10 (Bruker Nano GmbH, Германия), смонтированного на базе микроскопа. Рабочее ускоряющее напряжение составляло 20 кВ. Сбор и анализ данных выполняли с помощью программного обеспечения ESPRIT (Bruker Nano GmbH, Германия).

Биохимическое исследование

Определение концентрации общего белка, мочевины, креатинина, общего кальция, неорганического фосфата, С-реактивного белка (СРБ), а также активности щелочной (ЩФ) и тартратрезистентного (костного) изофермента кислой (ТрКФ) фосфатазы, трансаминаз (АСТ, АЛТ) в сыворотке крови экспериментальных животных выполняли на автоматическом биохимическом анализаторе Hitachi/BM 902 (F. Hoffmann-La Roche Ltd., Италия) с использованием наборов реагентов фирм Витал Диагностика и БиоСистемс (Россия).

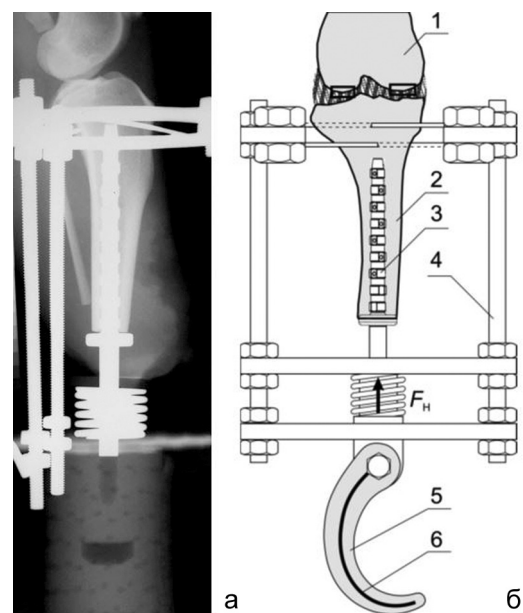


Рис. 4. Рентгенограмма голени собаки после установки имплантата (а) и устройство фиксации и компрессионного нагружения (б): 1 — бедренная кость; 2 — большеберцовая кость; 3 — имплантат; 4 — устройство фиксации и компрессионного нагружения в сборе; 5 — силиконовый протез; 6 — пружина жесткости, F_n — компрессионная нагрузка

Статистические методы исследования

Результаты в таблицах представлены в виде медианы и 1–3 квартилей (Me, Q1–Q3), медианы и минимального и максимального значений (Me, min–max), а также в виде среднего арифметического значения и стандартного отклонения ($X \pm SD$). Процедуру статистической оценки значимости отличий количественных показателей на сроках эксперимента с дооперационными значениями проводили с использованием W-критерия Вилкоксона для связанных выборок. Достоверность межгрупповых различий оценивали с помощью T-критерия Манна – Уитни, для частотных показателей применяли критерий Барнарда, значимыми считали различия при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Клиническое состояние всех животных после проведения имплантации было удовлетворительным с сохранением устойчивости установленных имплантатов. Через неделю после операции, несмотря на перемежающуюся хромоту, все собаки начинали пользоваться прооперированной конечностью. К четвертой неделе эксперимента у собак обеих групп наблюдали лишь незначительную остаточную хромоту, которая полностью нивелировалась на шестой неделе исследования.

У одного животного группы 1 в ранний послеоперационный период наблюдали воспаление в области спиц компрессионного устройства. Воспаление купировано в течение недели с помощью обработки антисептическим раствором и противовоспалительной мазью. Следует отметить, что у всех животных данной группы в ранний послеоперационный период определяли гиперемию в районе контакта кожи и имплантата, которая также исчезала в течение семи дней на фоне применения противоотечной мази на основе гепарина.

В группе 2 у одной собаки разошелся один шов, однако рана зажила первичным натяжением. Воспалительных явлений в раннем послеоперационном периоде у животных данной группы не обнаружено.

Через шесть недель после установки имплантата компрессионное устройство снимали. У животных обеих экспериментальных групп имплантат был стабилен, однако у собак группы 1 отмечали отдельные признаки резорбции кости, незначительные периостальные напластования в дистальной части кости (рис. 5, а). Во второй группе, напротив, появлялись напластования вблизи «стопорного кольца», что свидетельствовало об активном эндостальном костеобразовании в зоне имплантации (рис. 5, б).

Через 26 недель после имплантации у всех животных сохранялась стабильность имплантата. У животных группы 1 отмечали органотипическую перестройку кости и компактизацию периостальных напластований (рис. 6, а). У животных группы 2 к этому сроку уже определяли завершение органотипической перестройки кости вокруг имплантата (рис. 6, б).



Рис. 5. Фрагменты рентгенограмм голени собаки группы 1 (а) и группы 2 (б) через 42 дня после операции

Рис. 6. Фрагменты рентгенограмм голени собаки группы 1 (а) и группы 2 (б) через 180 дней после операции

Наблюдаемая рентгенологическая картина свидетельствует о признаках более выраженного остеогенеза в системе «имплантат – кость» у животных группы 2.

В обеих группах к окончанию эксперимента (26 недель) формировался единый костно-имплантационный блок (рис. 7), в котором имплантат был полностью интегрирован в костную ткань. По всему периметру поверхности имплантатов в обеих группах формировалась губчатая костная ткань, преимущественно мелкоячеистого, а в некоторых участках среднеячеистого строения. На всем протяжении костно-имплантационного блока компактная пластинка была непрерывной и достаточно плотной.

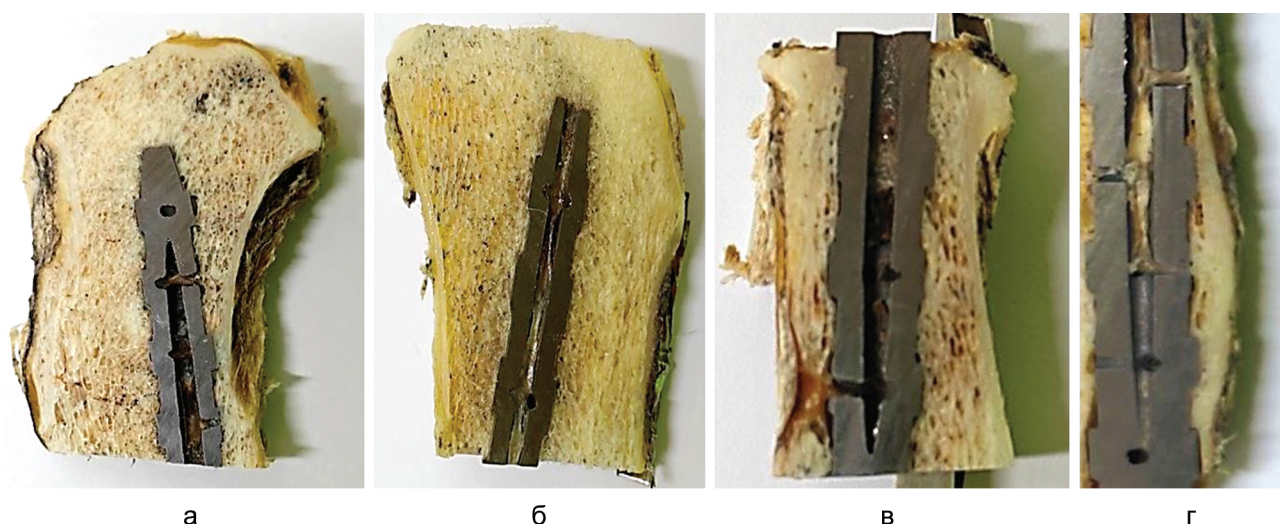


Рис. 7. Фото, демонстрирующие формирование блока «кость – имплантат» через 26 недель после имплантации: а — распил проксимальной части большеберцовой кости собаки группы 1 (без покрытия); б — распил проксимальной части большеберцовой кости собаки группы 2 (с покрытием); в — распил диафиза культы большеберцовой кости собаки группы 1 (без покрытия); г — распил диафиза большеберцовой кости собаки группы 2 (с покрытием). Ув. 1,5×

По данным энергодисперсионного анализа содержание кальция в костной ткани во всех зонах костно-имплантационных блоков животных группы 1 было достоверно ниже, чем в группе 2 (табл. 1), а содержание фосфора в группе 1 было достоверно выше, чем в группе 2. Исключение составили области компактной пластинки в дистальной части и губчатая кость, формируемая вокруг имплантата в средней части культы большеберцовой кости, где содержание фосфора в обеих группах было идентичным и не имело достоверных различий. В обеих группах в зоне компактной пластинки концентрация определяемых элементов была незначительно выше в дистальной части. Меньшее содержание остеотропных элементов отмечено в проксимальной части костной культы. Эндостально образованная костная ткань, локализованная вокруг имплантата, в обеих группах содержала меньшее количество кальция и фосфора по сравнению с компактной пластинкой в каждой из анализируемых зон обеих групп.

Таблица 1

Содержание Са и Р в различных участках костно-имплантационного блока через 26 недель после имплантации

Группа	Элемент	Содержание Са и Р (вес.%), $\bar{X} \pm SD$					
		Дистальная часть		Средняя часть		Проксимальная часть	
		Компактная пластинка	Вокруг имплантата	Компактная пластинка	Вокруг имплантата	Компактная пластинка	Вокруг имплантата
1	Са	$18,4 \pm 0,14$	$8,37 \pm 0,23$	$16,16 \pm 0,97$	$8,99 \pm 0,71$	$14,12 \pm 0,43$	$6,16 \pm 0,13$
	Р	$9,90 \pm 0,31$	$4,98 \pm 0,42$	$9,02 \pm 0,23$	$4,87 \pm 0,04$	$6,98 \pm 0,25$	$3,04 \pm 0,04$
2	Са	$19,9 \pm 0,84^*$	$9,60 \pm 0,17^*$	$18,1 \pm 0,67^*$	$9,98 \pm 0,91$	$16,97 \pm 0,83^*$	$8,61 \pm 0,11^*$
	Р	$9,10 \pm 0,85$	$3,99 \pm 0,12^*$	$8,89 \pm 0,09^*$	$4,78 \pm 0,07$	$6,36 \pm 0,17^*$	$3,63 \pm 0,07^*$

Примечание: * — значимость различий при $p < 0,05$ по сравнению группой 1.

Динамика изменения активности ЩФ обнаруживала рост относительно дооперационных значений у животных группы 1 на третьей и шестой неделях после имплантации, в группе 2 — на шестой и 12-ой неделях (табл. 2). При этом на шестой и 12-ой неделях активность ЩФ у животных группы 2 была выше, чем у животных группы 1. Активность ТрКФ в группе 1 была выше дооперационного уровня на шестой и 26-ой неделях после имплантации, в группе 2 она была снижена на третьей неделе и повышена на 26-ой, при этом значения были значимо выше относительно значений группы 1 на данных сроках. Отмечено разовое снижение уровня общего кальция в сыворотке крови собак группы 1 на третьей неделе после имплантации. Такие изменения указывают на более значительную активацию остеогенеза у животных группы 2 в сравнении с группой 1.

Также не отмечено различий динамики изменения уровня общего белка, мочевины, креатинина и активности трансаминаз (АЛТ, АСТ) у животных изученных групп (данные не представлены). Однако у животных группы 1 на третьей неделе после имплантации был достоверно повышен уровень СРБ относительно дооперационных значений, чего мы не наблюдали у всех животных группы 2.

Таблица 2

Изменение активности фосфатаз и концентрации общего кальция и неорганического фосфата в сыворотке крови собак после имплантации

Неделя	Группа	Активности и концентрации, Ме (Q1–Q3)			
		ЩФ, Е/л	ТрКФ, Е/л	Кальций, ммоль/л	Фосфат, ммоль/л
0	1	36 (29–42)	4,85 (4,78–4,93)	2,60 (2,57–2,63)	1,20 (1,09–1,30)
	2	37 (33–41)	4,40 (4,22–4,95)	2,58 (2,44–2,61)	1,25 (1,12–1,42)
3	1	62* (59–65)	4,50 (3,90–5,10)	2,50* (2,46–2,54)	1,30 (1,23–1,37)
	2	38 (33–60)	3,40* (2,03–3,60)	2,58 (2,44–2,62)	1,45 (1,23–1,47)
6	1	54* (50–58)	5,85* (5,73–5,98)	2,64 (2,62–2,67)	1,29 (1,22–1,36)
	2	64* (60–76)	3,70 (2,23–5,08)	2,59 (2,54–2,64)	1,13 (1,09–1,27)
12	1	38 (30–45)	4,50 (4,12–5,12)	2,61 (2,50–2,64)	1,28 (1,21–1,38)
	2	67* (58–93)	3,85 (3,45–4,43)	2,60 (2,56–2,65)	1,24 (1,24–1,29)
26	1	43 (36–61)	8,30* (7,05–9,55)	2,68 (2,53–2,70)	1,43 (1,32–1,55)
	2	39 (26–53)	5,90* (5,15–6,10)	2,54 (2,52–2,58)	1,24 (1,17–1,31)

Примечание: * — различия с дооперационными (срок 0) значениями при $p < 0,05$; **жирный шрифт** — различия показателя с группой 1 при $p < 0,05$.

Таким образом, по данным гистологического исследования можно заключить, что имплантаты резьбового типа Press-Fit как без покрытия, так и с цинк-содержащим кальций-фосфатным покрытием, имели приемлемые характеристики остеоинтеграции. При этом остеоинтегративные качества имплантата типа Press-Fit с покрытием были выражены в большей степени, что подтверждается количественными характеристиками, полученными в результате гистологического исследования. Формирование более плотных и минерализованных структур на поверхности имплантата с биоактивным покрытием предотвращало отток кальция из компактной пластинки костной культи. Кроме того, цинк-содержащее кальций-фосфатное покрытие способствовало формированию более плотной костной муфты вокруг имплантата в дистальной части культи, что является положительным моментом при стабилизации имплантата в кости в месте перехода имплантата в абатмент.

Полученные данные лабораторного исследования показывают отсутствие каких-либо выраженных патологических изменений показателей, характеризующих системный ответ организма на имплантацию (включая реакцию висцеральных органов, — печень, почки). Отмеченные отдельные изменения, такие как рост СРБ, можно отнести к ожидаемым изменениям, связанным с реакцией организма на имплантацию, тем более что эти изменения были переходящими.

В целом, проведенный комплекс гистологических и лабораторных исследований, а также клинические наблюдения позволяют отметить отсутствие существенных локальных и системных нарушений у животных обеих групп в период остеоинтеграции имплантатов, что свидетельствует об их достаточно хорошей переносимости. При этом изделия с цинк-содержащим кальций-фосфатным покрытием имеют более выгодный профиль безопасности в сравнении с изделием без покрытия.

ОБСУЖДЕНИЕ

К настоящему времени формируется мнение об определенных преимуществах применения транскутанных имплантатов типа Press-Fit для решения задач протезирования, позволяющих, в частности, реализовывать одноэтапность процесса интеграции, что снижает частоту осложнений [31] и повышает выживаемость имплантата [32]. Литературные данные [33] и данные нашего исследования показывают отсутствие при применении имплантатов типа Press-Fit каких-либо выраженных нежелательных реакций на имплантацию, включая реакцию висцеральных органов (печень, почки и др.).

Совершенствование имплантатов такого типа для протезирования идёт в нескольких направлениях: совершенствование конструкции изделия и его материалов [34, 35], в том числе и попытка персонализировать имплантат [36]; модификация поверхности интегрируемой части, включая нанесение

дополнительных покрытий, способствующих интеграции [37–39]; управление нагрузкой на имплантат [40, 41]. Эти принципы также были реализованы нами в выполненном исследовании, демонстрирующем преимущества использования цинк-содержащего кальций-фосфатного покрытия в условиях применения компрессионной нагрузки на имплантат за счет повышения эффективности остеоинтеграции и профиля безопасности, что согласуется с литературными данными [42].

Таким образом, результаты исследования подтверждаются данными, приведенными в отечественной и зарубежной научной литературе, и расширяют доказательную базу эффективности применения титановых SLM имплантатов типа Press-Fit с цинк-содержащим кальций-фосфатным покрытием в остеоинтеграционном протезировании.

Ограничения исследования. В данном исследовании остеоинтеграция изделий выполнена у небольшого количества животных. Отсутствие отдаленных результатов приводит к необходимости дополнительных сравнительных исследований стабильности интеграции имплантатов с покрытием данного типа в долгосрочной перспективе. Кроме того, растущий опыт применения технологии остеоинтеграции для задач протезирования показывает необходимость разработки специального инструментария для удаления имплантатов (инфицирование, переустановка, износ) [43].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные демонстрируют, что оба изделия достаточно интегрируемы в костную культю и не имеют выраженных ограничений при применении по показаниям. Учитывая подход, требующий при использовании имплантируемых медицинских изделий исходить из минимизации рисков, связанных с их эксплуатацией, можно отдать предпочтение изделию с цинк-содержащим кальций-фосфатным покрытием как изделию, имеющему определенные преимущества в эффективности остеоинтеграции и ее безопасности.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания НМИЦ ТО имени академика Г.А. Илизарова «Разработка новых имплантатов типа Press-Fit, обеспечивающих образование и активацию частиц костного матрикса для повышения приживаемости и надежности протезирования». Получение покрытий на медицинских изделиях и изучение их характеристик выполнено в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН (проект № FWRW-2026-0004).

Этическая экспертиза. На проведение исследования получено разрешение локального этического комитета (протокол от 29.11.2024 № 1(176)).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Evans AR, Tetsworth K, Quinnan S, Wixted JJ. Transcutaneous osseointegration for amputees. *OTA Int.* 2024;7(2 Suppl):e326. doi: 10.1097/O19.0000000000000326.
2. 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.
3. Hoellwarth JS, Tetsworth K, Akhtar MA, Al Muderis M. Transcutaneous osseointegration for amputees : lessons from the past of relevance to the future. *Bone Joint Res.* 2021;10(10):690-692. doi: 10.1302/2046-3758.1010.BJR-2021-0235.R2.
4. Saleib RM, Pekbay B, Verhofstad MHJ, et al. Analyzing research trends and developments in osseointegration in patients with extremity amputations: Systematic bibliometric analysis and research recommendations. *Prosthet Orthot Int.* 2025;49(5):596-606. doi: 10.1097/PXR.0000000000000410.
5. Atallah R, Leijendekkers RA, Hoogboom TJ, Frölke JP. Complications of bone-anchored prostheses for individuals with an extremity amputation: A systematic review. *PLoS One.* 2018;13(8):e0201821. doi: 10.1371/journal.pone.0201821.
6. Haidary A, Hoellwarth JS, Tetsworth K, et al. Transcutaneous osseointegration for amputees with burn trauma. *Burns.* 2023;49(5):1052-1061. doi: 10.1016/j.burns.2023.02.006.
7. Kafedzic H, Rozbruch SR, Reif TJ, Hoellwarth JS. Constructing an Osseointegrated Prosthetic Leg. *JBJS Essent Surg Tech.* 2024;14(1):e22.00064. doi: 10.2106/JBJS.ST.22.00064.
8. Rehani M, Stafinski T, Round J, et al. Bone-anchored prostheses for transfemoral amputation: a systematic review of outcomes, complications, patient experiences, and cost-effectiveness. *Front Rehabil Sci.* 2024;5:1336042. doi: 10.3389/fresc.2024.1336042.
9. Aschoff HH, Örgel M, Sass M, et al. Transcutaneous Osseointegrated Prosthesis Systems (TOPS) for Rehabilitation After Lower Limb Loss: Surgical Pearls. *JBJS Essent Surg Tech.* 2024;14(1):e23.00010. doi: 10.2106/JBJS.ST.23.00010.
10. Huo D, Wang F, Yang F, et al. Medical titanium surface-modified coatings with antibacterial and anti-adhesive properties for the prevention of implant-associated infections. *J Mater Sci Technol.* 2024;179:208-223. doi: 10.1016/j.jmst.2023.09.016.
11. Velmurugan SN, Jayakumar S, Raman M, Senthamilarsi N. Multidimensional calcium phosphate coatings for bio activation of titanium implant surfaces using methodological approach. *J Ind Eng Chem.* 2024;133:228-245. doi: 10.1016/j.jiec.2023.11.061.
12. Wang S, Zhao X, Hsu Y, et al. Surface modification of titanium implants with Mg-containing coatings to promote osseointegration. *Acta Biomater.* 2023;169:19-44. doi: 10.1016/j.actbio.2023.07.048.
13. Hu S, Shou Z, Xu C, et al. The de novo strategy for bifunctional peptides coating to enhance osteointegration capacity of the implant. *Colloids Surf B Biointerfaces.* 2025;252:114642. doi: 10.1016/j.colsurf.2025.114642.
14. Frölke JP, Atallah R, Leijendekkers R. Press-Fit Bone-Anchored Prosthesis for Patients with Short Transfemoral Amputation. *JBJS Essent Surg Tech.* 2025;15(1):e23.00007. doi: 10.2106/JBJS.ST.23.00007.
15. Hoellwarth JS, Tetsworth K, Al Muderis M. Single-Stage Press-Fit Osseointegration of the Radius and Ulna for Rehabilitation After Trans-Forearm Amputation. *JBJS Essent Surg Tech.* 2024;14(3):e23.00015. doi: 10.2106/JBJS.ST.23.00015.
16. Cooperman C, Wiznia D, Kunsel K, et al. Personalizing Revision Tibial Baseplate Position and Stem Trajectory With Custom Implants Using 3D Modeling to Optimize Press-fit Stem Placement. *Arthroplast Today.* 2022;18:45-51. doi: 10.1016/j.artd.2022.08.011.

17. Christensen JC, Smith J, Darter BJ, et al. Physical Recovery After Transfemoral Amputation Using Press-Fit Percutaneous Osseointegrated Prosthesis. *Arch Phys Med Rehabil*. 2026;S0003-9993(26)00574-5. doi: 10.1016/j.apmr.2026.02.494.
18. Ong G, Hoellwarth JS, Testworth K, Al Muderis M. Techniques to Remove Press-Fit Osseointegration Implants. *JBJS Essent Surg Tech*. 2024;14(1):e23.00017. doi: 10.2106/JBJS.ST.23.00017.
19. Hoellwarth JS, Reif TJ, Rozbruch SR. Revision Amputation with Press-Fit Osseointegration for Transfemoral Amputees. *JBJS Essent Surg Tech*. 2022;12(2):e21.00068. doi: 10.2106/JBJS.ST.21.00068.
20. Еманов А.А., Горбач Е.Н., Стогов М.В. и др. Выживаемость чрескожных имплантатов в условиях различной механической нагрузки на кость. *Гений ортопедии*. 2018;24(4):500-506. doi: 10.18019/1028-4427-2018-24-4-500-506.
21. 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.
22. Van den Borre CE, Zigterman BGR, Mommaerts MY, Braem A. How surface coatings on titanium implants affect keratinized tissue: A systematic review. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*. 2022;110(7):1713-1723. doi: 10.1002/jbm.b.35025.
23. Кузнецов В.П., Горгоц В.Г., Аникеев А.В. и др. Имплантат культы трубчатой кости. Патент РФ на полезную модель № 194912. 30.12.2019. Бюл. № 1. Доступно по: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=194912&TypeFile=html. Ссылка активна на 06.05.2026.
24. Кузнецов В.П., Горгоц В.Г., Еманов А.А. и др. Имплантат культы трубчатой кости. Патент РФ на полезную модель № 207637. 08.11.2021. Бюл. № 31. Доступно по: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=207637&TypeFile=html. Ссылка активна на 06.05.2026.
25. Komarova EG, Kazantseva EA, Chaikina MV, et al. Morphological and structural features of micro-arc Zn-Si-containing calcium phosphate coatings. *Materials Today: Proceedings*. 2020;25(3):439-442. doi: 10.1016/j.matpr.2019.12.157.
26. Komarova EG, Sedelnikova MB, Kazantseva EA, et al. Relationship between the porous structure hierarchy and the physical and mechanical properties of calcium phosphate drug carriers. *Russ Phys J*. 2020;63(7):1249-1256. doi: 10.1007/s11182-020-02151-y.
27. Bulina NV, Khvostov MV, Borodulina IA, et al. Substituted hydroxyapatite and β -tricalcium phosphate as osteogenesis enhancers. *Ceram Int*. 2024;50(18):33258-33269. doi: 10.1016/j.ceramint.2024.06.136.
28. Komarova EG, Sharkeev YP, Sedelnikova MB, et al. Zn- or Cu-Containing CaP-Based Coatings Formed by Micro-arc Oxidation on Titanium and Ti-40Nb Alloy: Part I-Microstructure, Composition and Properties. *Materials (Basel)*. 2020;13(18):4116. doi: 10.3390/ma13184116.
29. Komarova EG, Sharkeev YP, Sedelnikova MB, et al. Zn- or Cu-containing CaP-Based Coatings Formed by Micro-Arc Oxidation on Titanium and Ti-40Nb Alloy: Part II-Wettability and Biological Performance. *Materials (Basel)*. 2020;13(19):4366. doi: 10.3390/ma13194366.
30. Кузнецов В.П., Губин А.В., Горгоц В.Г. и др. Устройство для остеоинтеграции имплантата в кость культы нижней конечности. Патент РФ на полезную модель № 185647. 13.12.2018. Бюл. № 35. Доступно по: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=185647&TypeFile=html. Ссылка активна на 06.05.2026.
31. Banducci E, Al Muderis M, Lu W, Bested SR. The safety of one-stage versus two-stage approach to osseointegrated prosthesis for limb amputation. *Bone Jt Open*. 2023;4(7):539-550. doi: 10.1302/2633-1462.47.BJO-2022-0117.R1.
32. Burns DM, LoPolito AG, Glassband Z, et al. Single-Stage Press-Fit Femoral Osseointegrated Limb Replacement: A Prospective Cohort Study. *J Am Acad Orthop Surg*. 2026;34(8):e1144-e1153. doi: 10.5435/JAAOS-D-24-00718.
33. Atallah R, Rutjes E, Frölke JPM, Leijendekkers RA. Safety and performance of contemporary press-fit titanium osseointegration implants in lower extremity amputation : a five-year follow-up study. *Bone Joint J*. 2025;107-B(4):486-494. doi: 10.1302/0301-620X.107B4.BJJ-2024-0754.R1.
34. 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.
35. Barootchi E, Jirofti N, Daliri M, Moradi A. Lower limb osseointegrated prosthetics: are we standing on the edge of a new era? *J Orthop Surg Res*. 2026;21(1):255. doi: 10.1186/s13018-026-06675-w.
36. Galteri G, Betti V, Alesi D, et al. Improved primary stability and load transfer of a customized osseointegrated transfemoral prosthesis compared to a commercial one. *J Orthop Surg Res*. 2025;20(1):102. doi: 10.1186/s13018-025-05476-x.
37. Sánchez E, de Vries E, Matthews D, et al. The effect of coating characteristics on implant-bone interface mechanics. *J Biomech*. 2024;163:111949. doi: 10.1016/j.jbiomech.2024.111949.
38. Ghalayani Esfahani A, Sartori M, Bregoli C, et al. Bactericidal Activity of Silver-Doped Chitosan Coatings via Electrophoretic Deposition on Ti6Al4V Additively Manufactured Substrates. *Polymers (Basel)*. 2023;15(20):4130. doi: 10.3390/polym15204130.
39. Wen Z, Lei L, Zhang H, et al. Magnesium-containing implants enhance bone healing: A mechanobiological perspective. *Mechanobiol Med*. 2025;3(4):100161. doi: 10.1016/j.mbm.2025.100161.
40. Frossard L, Laux S, Geada M, et al. Evidence-based recommendation of a powered knee for transfemoral bone-anchored prostheses: A cross-sectional study. *Can Prosthet Orthot J*. 2025;8(2):45790. doi: 10.33137/cpoj.v8i2.45790.
41. Leung ES, Mofatteh M. Investigating the Feasibility and Safety of Osseointegration With Neural Interfaces for Advanced Prosthetic Control. *Cureus*. 2025;17(4):e82567. doi: 10.7759/cureus.82567.
42. Shrivastava S, Samra H, Yadav V, Boda SK. Soft and Hard Tissue Integration around Percutaneous Bone-Anchored Titanium Prostheses: Toward Achieving Holistic Biointegration. *ACS Biomater Sci Eng*. 2024;10(4):1966-1987. doi: 10.1021/acsbomaterials.3c01555.
43. Frölke JP, Atallah R. Revision of Press-Fit Bone-Anchored Prosthesis After Implant Failure. *JBJS Essent Surg Tech*. 2024;14(4):e23.00005. doi: 10.2106/JBJS.ST.23.00005.

Статья поступила 07.04.2026; одобрена после рецензирования 28.04.2026; принята к публикации 09.06.2026.

The article was submitted 07.04.2026; approved after reviewing 28.04.2026; accepted for publication 09.06.2026.

Информация об авторах:

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, профессор кафедры термообработки и физики металлов УрФУ, wpkuzn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8949-6345>;

Максим Валерьевич Стогов — доктор биологических наук, доцент, руководитель отдела, stogo_off@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8516-8571>;

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

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

Екатерина Геннадьевна Комарова — кандидат технических наук, научный сотрудник, katerina@ispms.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0903-6750>;

Татьяна Толкачева — ведущий технолог, tolkacheva@ispms.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7125-484X>;

Юрий Петрович Шаркеев — доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, sharkeev@ispms.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5037-245X>.

Information about the authors:

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 the Laboratory, Professor of the Department, wpkuzn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8949-6345>;

Maksim V. Stogov — Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Head of the Department, stogo_off@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8516-8571>;

Elena N. Gorbach — Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, gorbach.e@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9516-7481>;

Natalya V. Tushina — Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, ntushina76@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1322-608X>;

Ekaterina G. Komarova — Candidate of Technical Sciences, Researcher, katerina@ispms.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0903-6750>;

Tatiana V. Tolkacheva — Leading Technologist, tolkacheva@ispms.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7125-484X>;

Yurii P. Sharkeev — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Chief Researcher, sharkeev@ispms.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5037-245X>.



Оценка применения костнозамещающего материала на основе полимеров полиуретанового ряда при лечении пациентов с хроническим остеомиелитом (экспериментально-морфологическое исследование)

А.С. Судницын, Т.А. Ступина✉, О.В. Дюрягина, Н.В. Тушина, Т.Н. Варсегова, Н.В. Кубрак

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

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

Аннотация

Введение. Лечение пациентов с постостеомиелитическими дефектами представляет собой одну из сложных задач современной травматологии и ортопедии.

Цель работы — на экспериментальной модели обосновать возможность применения частично биорезорбируемого материала «Рекост» в комбинации с антибиотиком для замещения остеомиелитических полостей.

Материалы и методы. Исследование выполнено на девяти кроликах-самцах породы советская шиншилла (16–18 месяцев, 4,3–4,5 кг), которым в проксимальном метафизе большеберцовой кости моделировали остеомиелит путем формирования трепанационного отверстия и установки блока «Остеолит®», содержащего культуру *Staphylococcus aureus*. Животные распределены на три группы. Животных группы 1 выводили из опыта через 21 сутки моделирования остеомиелита. В группах 2 и 3 вторым этапом выполняли секвестрнекрэктомию и замещение костного дефекта материалом «Рекост» (ООО «АйконЛабГмбХ», Нижний Новгород, РЗН 2014/1646 от 03.07.2014, бессрочно), с добавлением антибиотика в группу 3. Животных выводили из опыта через 21 сутки после имплантации. Применяли клинический, рентгенологический, биохимический и гистологический методы исследования.

Результаты. В группе 1 зарегистрированы признаки остеомиелита: некротизированные фрагменты костных трабекул, воспалительный инфильтрат, остеокластическая резорбция и остеогенез, фиброз костного мозга, выраженная экспрессия CD15. В группах 2 и 3 через три недели после имплантации отмечали наличие сети новообразованных костных трабекул на границе контакта «кость — материал», в полостях имплантата выявляли костные трабекулы. В эпифизе в группе 2 оценка по шкале HOES ≥ 6 баллов соответствовала активному течению хронического остеомиелита. В группе 3 медиана оценки по шкале HOES 2 балла свидетельствовала о стихании хронического остеомиелита, экспрессия маркера CD15 была менее выражена, чем в группе 2. Уровень С-реактивного белка в группе 2 продолжал расти, в группе 3 — существенно снижался.

Обсуждение. Биорезорбируемые имплантаты, насыщенные антибиотиком, обеспечивают постепенное замещение материала костной тканью, исключают необходимость повторных операций, снижают риск хронизации инфекции, биосовместимы.

Заключение. На экспериментальной модели *in vivo* через три недели после имплантации отмечена минимальная деградация материала «Рекост», выражающаяся высокой частотой гигантских многоядерных клеток типа инородных тел. Выявленные в ранние сроки эксперимента данные об остеопластических свойствах материала «Рекост» и его способности в комбинации с антибиотиком купировать инфекционно-воспалительный процесс свидетельствуют о перспективе проведения дальнейших экспериментальных исследований применения данного изделия при лечении пациентов с хроническим остеомиелитом.

Ключевые слова: хронический остеомиелит, костные дефекты, костнозамещающий материал «Рекост», антибиотики, гистология

Для цитирования: Судницын А.С., Ступина Т.А., Дюрягина О.В., Тушина Н.В., Варсегова Т.Н., Кубрак Н.В. Оценка применения костнозамещающего материала на основе полимеров полиуретанового ряда при лечении хронического остеомиелита (экспериментально-морфологическое исследование). *Гений ортопедии*. 2026;32(4):540-551. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-4-540-551.



Evaluation of bone substitute material based on polyurethane polymers for treatment of chronic osteomyelitis (experimental morphological study)

A.S. Sudnitsyn, T.A. Stupina✉, O.V. Dyuryagina, N.V. Tushina, T.N. Varsegova, N.V. Kubrak

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

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

Abstract

Introduction Treatment of patients with post-osteomyelitic defects is one of the most challenging areas in traumatology and orthopedics.

Purpose To substantiate, on an experimental model, the potential of a partially bioresorbable material *Rekost* used to compensate for osteomyelitic cavities in combination with an antibiotic.

Materials and methods The study was performed on nine male Soviet Chinchilla rabbits (16–18 months old, 4.3–4.5 kg of weight), in which osteomyelitis was modeled in the proximal metaphysis of the tibia by producing a trepanation hole and installing an Osteolite™ containing a *Staphylococcus aureus* culture. The animals were divided into three groups. Animals in group 1 were withdrawn from the experiment after 21 days of osteomyelitis modeling. In groups 2 and 3, the second stage included sequestrectomy and substitution of the bone defect thus formed with *Rekost* material (OOO AikonLabGmbH, Nizhny Novgorod, RZN 2014/1646 dated 03.07.2014, for indefinite) impregnated with an antibiotic in group 3. After 21 days of implantation, the animals were withdrawn from the experiment. Clinical, radiological, biochemical and histological methods were used.

Results In Group 1, signs of osteomyelitis were recorded: necrotic fragments of bone trabeculae, inflammatory infiltrate, osteoclastic resorption and osteogenesis, bone marrow fibrosis, and pronounced CD15 expression. In groups 2 and 3, three weeks after implantation, a network of newly formed bone trabeculae at the bone-material interface was noted, and bone trabeculae were observed in the implant cavities. In the epiphysis of group 2, a HOES score of ≥ 6 points corresponded to active chronic osteomyelitis. In group 3, a median HOES score of 2 points indicated a remission of chronic osteomyelitis, and CD15 marker expression was less pronounced than in group 2. C-reactive protein levels continued to increase in Group 2 and significantly decreased in Group 3.

Discussion Bioresorbable implants, impregnated with antibiotics, provide gradual replacement of the material with bone tissue, eliminate the need for repeated surgeries, reduce the risk of chronic infection, and are biocompatible.

Conclusion In an *in vivo* experimental model, minimal degradation of the *Rekost* material was observed three weeks after implantation, manifested by highly frequent foreign-body-type giant multinucleated cells. Early data on the osteoplastic properties of the *Rekost* material and its ability to suppress infection and inflammation in combination with an antibiotic suggest the potential for further experimental studies of this product to be used in the treatment of patients with chronic osteomyelitis.

Keywords: coronary osteomyelitis, bone defects, Recost bone-substituting material, antibiotics, histology

For citation: Sudnitsyn AS, Stupina TA, Dyuryagina OV, Tushina NV, Varsegova TN, Kubrak NV. Evaluation of bone substitute material based on polyurethane polymers for treatment of chronic osteomyelitis (experimental morphological study). *Genij Ortopedii*. 2026;32(4):540-551. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-4-540-551.

ВВЕДЕНИЕ

Высокие показатели распространенности хронического остеомиелита (от 3 до 25 % от всех заболеваний опорно-двигательной системы), частоты рецидивов (до 30–40 %), частоты вторичных ампутаций и функциональной неполноценности конечности (10,3–57 % наблюдений) обуславливают актуальность поиска путей улучшения результатов хирургического лечения больных с хроническим остеомиелитом [1, 2, 3]. Независимо от патофизиологии, подавляющее большинство случаев остеомиелита вызывает грамположительная бактерия *Staphylococcus aureus* [4, 5], способная сохраняться в гаверсовых каналах, в межпластинчатых пространствах остеонов и трабекул, внутриклеточно в макрофагах. Это играет главную роль в хронической костной инфекции, характеризующейся постоянным воспалением, разрушением костной ткани и нарушением ее регенерации [6, 7]. Остеомиелит запускает патологическое ремоделирование кости, что приводит к изоляции очагов инфекции от эффекторов врожденного иммунитета [5]. Современные подходы к лечению пациентов с хроническим остеомиелитом включают применение антибиотикотерапии, хирургическое удаление инфицированных участков, замещение костных дефектов. Восстановление костной ткани является ключевым этапом, поскольку отсутствие достаточной костной массы может привести к рецидивам инфекции и нарушениям функции опорно-двигательной системы [8].

Хирургическое вмешательство при остеомиелите дает возможность целенаправленной доставки антибиотиков в высоких дозах к очагу воспаления, снижая токсическое и побочное действия лекарств, благодаря использованию различных видов имплантатов и материалов для замещения костных полостей, что является важной составляющей терапии [9, 10, 11]. Особые усилия направлены на разработку новых антимикробных биоматериалов, которые не только устраняют инфекцию, но и способствуют последующему процессу восстановления костной ткани [2, 9]. Использование локальных носителей лекарственных веществ на основе полиметилметакрилата [12, 13], углерода, керамики [14, 15] и биополимеров [16, 17, 18] позволяет купировать инфекцию, замещать дефекты, поддерживать натяжение мягких тканей и стимулировать регенерацию костной ткани, что подтверждено рядом исследований [19, 20, 21, 22]. Однако небiodeградируемые материалы не обеспечивают пролонгированного высвобождения антибиотика [23, 24], их основными недостатками является несовместимость со многими противомикробными препаратами [25] и необходимость выполнения повторной операции по удалению такого спейсера [5, 26].

Применение частично биорезорбируемого материала, импрегнированного антибиотиком, является перспективным вариантом для ликвидации инфекции и восстановления кости за один этап хирургического вмешательства, что позволяет снизить затраты и сократить продолжительность пребывания в стационаре [27, 28, 29].

Совершенствование методов оперативного лечения пациентов с хроническим остеомиелитом требует проведения экспериментальных исследований, направленных на моделирование хронического процесса, разработку эффективных технологий, поиск материалов, совмещающих антибактериальный эффект и остеоиндуктивные свойства [30, 31, 32].

Цель работы — на экспериментальной модели обосновать возможность применения частично биорезорбируемого материала «Рекост» в комбинации с антибиотиком для замещения остеомиелитических полостей.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Исследование выполнено на девяти лабораторных кроликах-самцах породы советская шиншилла в возрасте 16–18 месяцев, массой тела 4,3–4,5 кг, которые случайным образом были распределены на три группы по три животных в каждой.

Критерии включения: клинически здоровые кролики, не имеющие заболеваний опорно-двигательной системы.

Критерии исключения: животные, имеющие соматические заболевания и патологии опорно-двигательной системы.

На первом этапе всем животным моделировали хронический остеомиелит проксимального метафиза правой большеберцовой кости посредством инфицирования костномозговой полости культурой *Staphylococcus aureus* (MSSA, музейный штамм, 1×10^6 КОЕ). В качестве носителя инфекционного агента использовали блок костного матрикса «Остеолит®» размером 4×4 мм (РЗН 2023/19470 Биоимплантаты костные лиофилизированные, стерильные для травматологии и ортопедии, Россия). Перед началом операции блок костного матрикса «Остеолит®» на 5–7 мин помещали в водную взвесь суточной культуры *Staphylococcus aureus* для пропитывания. Объем поглощенной культуры составлял 0,05 мл (0,0386 г).

На медиальной поверхности проксимального метафиза большеберцовой кости выполняли оперативный доступ к поверхности кости. Костной фрезой в корковой пластинке формировали трепанационное отверстие, соответствующее размеру носителя инфекционного агента. Блок костного матрикса, пропитанный культурой инфекционного агента, помещали в полость метафиза таким образом, чтобы его наружная поверхность находилась в створе трепанационного отверстия, но не возвышалась над его поверхностью. Далее трепанационное отверстие герметично закупоривали костным воском Knochenwachs (AESCULAP AG, Germany). Операционную рану ушивали одноэтажными узловыми швами PDS 4/0 (Ethicon, Johnson & Johnson, США). Время ожидания для развития остеомиелитического процесса составляло 21 сутки. На этом этапе животных группы 1 выводили из опыта для морфологического подтверждения развития остеомиелитического процесса.

Животным группы 2 и группы 3 вторым этапом выполняли секвестрнекрэктомию и замещение дефекта костной ткани полимерным костнозамещающим материалом «Рекост» (ООО «АйконЛабГмбх», Нижний Новгород, РЗН 2014/1646 от 03.07.2014, бессрочно). Иссекали ткани свищевого хода и удаляли экзостозы на поверхности корковой пластинки вокруг трепанационного отверстия. При помощи шарообразных костных фрез ($\varnothing$ — 1 и 4 мм) выполняли вскрытие остеомиелитического очага с последующим удалением секвестров, грануляций и гнойного экссудата с зачисткой эндостальной поверхности метафиза до кровоснабжаемых участков кости. Далее по инструкции смешивали компоненты костнозамещающего полимерного материала «Рекост». Животным в группе 3 добавляли порошок антибиотика Ванкомицин в пропорции 1 г антибиотика по действующему веществу на 10 мл костного цемента. Полученную смесь набирали в шприц объемом 1 мл с отрезанным подыгольным конусом и равномерно заполняли полость костного дефекта, избегая образования воздушных пробок. После частичной полимеризации, излишки материала срезали ножницами до уровня корковой пластинки. Операционную рану ушивали наложением одноэтажных узловых швов на кожу PDS 4/0 (Ethicon, Johnson & Johnson, США). В группах 2 и 3 срок наблюдений составил 21 сутки после замещения дефекта, после чего животных выводили из опыта.

Оперативные вмешательства выполняли под общим обезболиванием. Для премедикации использовали раствор димедрола 1 % (0,02 мг/кг), атропина сульфата 0,1 % (0,02 мг/кг) и медитина 1 % (0,35 мг/кг), для наркоза — эмульсию пропофола 1 % (4 мг/кг/мин). За 30 минут до начала операции вводили раствор этамзилата 12,5 % (10–12 мг/кг) для профилактики кровотечения и раствор кетопрофена 10 % (2 мг/кг) в качестве обезболивающего и противовоспалительного средства. Антибиотикотерапию не применяли. Эвтаназию выполняли посредством внутривенного введения высоких доз анестетиков на фоне общего наркоза.

Этические принципы

Исследование выполнено в соответствии с правилами Европейской конвенции (ETS № 123) о защите позвоночных животных, используемыми для экспериментов или в иных научных целях, и межгосударственными стандартами (ГОСТ 33044-2014), одобрено локальным этическим комитетом (протокол от 29.11.2024 № 1(76)).

Клиническо-лабораторные методы

Оценивали общее состояние животных, состояние кожного покрова, окраску слизистых оболочек, потребление корма и воды, состояние зоны имплантации (локальные изменения мягких тканей, заживление послеоперационной раны). Измерение общей температуры тела проводили ректально в течение 1 мин термометром DT-623 Vega Technologies Inc (Китай). Взвешивание животных проводили на настольных электронных весах «Штрих — MIB 15–2,5» (Россия). Рентгенографию зон имплантации выполняли в прямой и боковой проекциях на этапах оперативного вмешательства и на 21-ые сутки после замещения дефекта на рентгенологическом аппарате Toshiba (Rotanode) Model E7239. N: 10G749 (Япония). Сила тока составляла 2,5–3,2 mA, напряжение — 43–44 kV, фокусное расстояние — 90 см, выдержка выставлялась автоматически.

Биохимический метод

В сыворотке крови экспериментальных животных определяли концентрацию С-реактивного белка (СРБ). Исследования выполнены на автоматическом биохимическом анализаторе Hitachi/BM 902 (F. Hoffmann-La Roche Ltd., Италия) с использованием наборов реагентов «Витал Диагностика» (Россия).

Гистологический метод

Объект исследования — проксимальный метаэпифиз большеберцовой кости.

Материал фиксировали в 10 % нейтральном формалине, затем декальцинировали и осуществляли дальнейшие этапы стандартной гистологической проводки в аппарате для вакуумной проводки тканей HISTOSAFE® INFILTRA® (ООО «ЭргоПродакшн», Россия). Парафиновые срезы (5–7 мкм) изготов-

ливали на микротоме HM 450 Thermo Scientific (США), затем окрашивали гематоксилином и эозином и трехцветным методом по Массону. Для получения цифровых изображений микропрепаратов использовали микроскоп AxioScope.A1(ООО «ЭпроПродакшн», Россия) в комплекте с камерой AxioCam ICs 5 и ПО Zenblue (Carl Zeiss Micro Imaging GmbH, Германия).

Для оценки инфекционно-воспалительного процесса использовали полуколичественную шкалу HOES A. Tiemann et al., включающую анализ выраженности некроза мягких тканей, остеонекроза, неогенеза кости и фиброза, воспалительного инфильтрата в баллах (0 — отсутствуют изменения, 1 — слабо выражены, 2 — умеренно, 3 — интенсивно) [33]. От каждого животного анализировали от пяти до 10 полей зрения при увеличении $\times 100$.

Иммуногистохимическим методом выявляли гранулоциты, используя мышинные поликлональные антитела к CD15 (ab233869) (Abcam, Великобритания) и пероксидазную систему детекции с диаминобензидином с микрополимером (ab236469 — Rabbit specific HRP/DAB Detection IHC Detection Kit-Micropolymer, Abcam, Великобритания). Все этапы выполнены по протоколу, рекомендованному фирмой-производителем антител. Срезы докрашивали гематоксилином.

Статистический метод

Исследование проведено на малых выборках (по три животных в группе). В таблице 1 представлены первичные данные. Данные таблицы 2 представлены в виде медианы и квартилей (Me ($p_{25};p_{75}$)). Статистическую обработку проводили в электронных таблицах Microsoft Excel с использованием программы Attestat (версия 9.3.1, автор И.П. Гайдышев, Сертификат Роспатента № 2002611109). Для сравнительного анализа применяли непараметрический критерий Манна – Уитни, который позволяет выявлять различия между малыми выборками при уровне значимости $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

У животных группы 1 в области инокуляции инфекционного агента отмечали незначительный отек, умеренную гиперемию, скудное или умеренное выделение гнояного экссудата. Общее состояние характеризовалось ухудшением аппетита и снижением массы тела в среднем на 13,5 %. Общая температура тела на протяжении всего этапа моделирования остеомиелита оставалась в пределах физиологической нормы. У животных группы 2 после замещения дефекта в области оперативного вмешательства наблюдали отек мягких тканей, разлитую гиперемию, умеренное или обильное гнойное отделяемое, в периперационной области — очаговый дерматит и флегмоны. Масса тела снизилась в среднем на 25,8 % относительно дооперационных значений. Общая температура тела была выше нормальных физиологических значений. В группе 3 после замещения дефекта в двух случаях общее состояние оценивали как хорошее, заживление операционной раны происходило без особенностей. Масса тела снизилась в среднем на 17,8 % относительно дооперационных значений. Общая температура тела была в пределах физиологической нормы. В одном случае общее состояние и местная симптоматика соответствовали клинической картине остеомиелита.

На рентгенограммах по завершению операции по внесению инфекционного агента в проксимальный метафиз большеберцовой кости хорошо визуализировались края трепанационного отверстия и блок костного матрикса «Остеолит®» (рис. 1, а). Через 21 сутки после инфицирования в зоне вмешательства наблюдали множественные участки лизиса костной ткани округлой формы. Края трепанационного отверстия были нечеткие, костная ткань частично склерозирована и окружена зоной лизиса, граница между блоком костного матрикса и костью сглажена. На корковой пластинке отмечали плотные периостальные экзостозы (рис. 1, б). При секвестрнекрэктомии патологически измененные ткани удалены, полость костного дефекта заполнена костнозамещающим материалом «Рекост», который на рентгенограммах был нерентгенконтрастным, в том числе после добавления ванкомицина (рис. 1, в).

В группе 2 к 21-ым суткам после секвестрнекрэктомии и замещения дефекта на рентгенограммах отмечали признаки тотальной воспалительной деструкции костной ткани метафиза. Центральный отдел метафиза имел низкую оптическую плотность, границы трепанационного отверстия и костного дефекта были размыты. В проекции полости дефекта отмечали хаотично расположенные структуры средней и низкой интенсивности, имеющие разную величину и нечеткий контур. Корковая пластинка имела размытый контур и неоднородную структуру. На ее латеральной поверхности отмечали слабые, тонкие облаковидные периостальные наслоения (рис. 1, г).

В группе 3 проксимальный метафиз большеберцовой кости имел ровные контуры и однородную структуру костной ткани. Рентгенологическая плотность костной ткани в зоне дефекта была идентична материнской кости. Границы полости костного дефекта не определялись. Очагов деструкции и лизиса костной ткани не отмечали. Периостальные наслоения были плотные, организованные и располагались вокруг трепанационного отверстия. Корковая пластинка метафиза имела четкий контур,

равномерную структуру и среднюю рентгенологическую плотность (рис. 1, д). У одного животного с выделением гнойного экссудата из операционной раны в постимплантационном периоде на рентгенограммах отмечали признаки хронического остеомиелита в виде очаговой деструкции костной ткани в эпифизарном и дистальном отделах метафиза и слабые периостальные наслоения вокруг трепанационного отверстия (рис. 1, е).

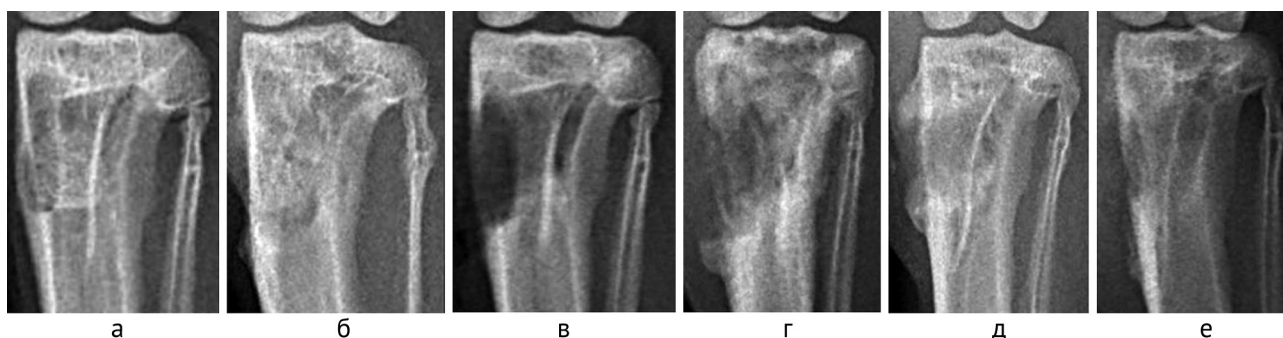


Рис. 1. Рентгенограммы проксимального метафиза большеберцовой кости кроликов в прямой проекции на этапах исследования: а — внесение инфекционного агента, день операции; б — 21-ые сутки после инфицирования; в — секвестрнекрэктомия и замещение костного дефекта, день операции; г — группа 2, 21 сутки после замещения дефекта; д — группа 3, 21 сутки после замещения дефекта, удовлетворительный результат; е — группа 3, 21 сутки после замещения дефекта, неудовлетворительный результат

Уровень СРБ в сыворотке крови у всех животных во всех группах существенно повышался на 21-ые сутки после инфицирования кости (табл. 1).

Таблица 1

Концентрация С-реактивного белка в сыворотке крови животных экспериментальных групп

Группы/ животные		Концентрация СРБ (мкг/л)		
		0 суток	21 сутки	42 сутки
Группа 1	1	0	11,8	—
	2	0	15,2	
	3	1,8	30,7	
Группа 2	1	0	12,7	25,3
	2	0	18,0	50,4
	3	0	25,3	31,6
Группа 3	1	0	10,0	0
	2	0	18,3	7,6
	3	0	23,4	20,5; $p^{2-3} = 0,0495$

Примечание: p — уровень значимости отличий при сравнении групп 2 и 3 по критерию Манна – Уитни при $p < 0,05$.

При светооптическом исследовании гистопрепаратов группы 1 в проксимальном метафизе большеберцовой кости отмечены обширные поля грануляционной и соединительной ткани (рис. 2, а), костные трабекулы с признаками некроза (рис. 2, б), костные микросеквестры (рис. 2, в), воспалительный инфильтрат очагового и диффузного типов распределения (рис. 2, в, г) с содержанием нейтрофилов, плазматических клеток, макрофагов, единичные гигантские многоядерные клетки типа инородных тел (рис. 2, г). Регистрировали признаки остеокластической резорбции (рис. 2, д) и репаративного остеогенеза (рис. 2, б, е). Медиана оценки по шкале HOES [33] 6 баллов соответствовала активной воспалительной фазе хронического остеомиелита (табл. 2).

В группе 2 в эпифизе отмечены гистологические признаки хронического остеомиелита, замещение костного мозга соединительной тканью (рис. 3, а), интенсивно выраженные признаки ремоделирования костных трабекул, остеокластическая резорбция (многочисленные остеокласты, резорбирующие основное вещество, трабекулы с изъязвленными поверхностями, с интерстициальными остеоэкстратами), репаративный остеогенез (многочисленные остеобласты, выстилающие костные трабекулы) (рис. 3, в, г), лимфогистиоцитарный инфильтрат с содержанием нейтрофилов очагового и диффузного типов распределения (рис. 3, д). Медиана полуколичественной оценки по шкале HOES [33] 7 баллов соответствовала активной воспалительной фазе хронического остеомиелита (табл. 2).

В группе 3 у двух животных в эпифизе гистологические признаки хронического остеомиелита не выявлены, межтрабекулярные промежутки заполнены жировым костным мозгом (рис. 3, б). Медиана оценки по шкале HOES [33] 2 балла свидетельствовала о стихании хронического остеомиелита (табл. 2). У одного животного регистрировали очаговый фиброз костного мозга, отмечали редкое расположение костных трабекул, нарушение их архитектоники, в межтрабекулярных промежутках диффузного типа распределения — лимфогистиоцитарный инфильтрат с единичными нейтрофилами.

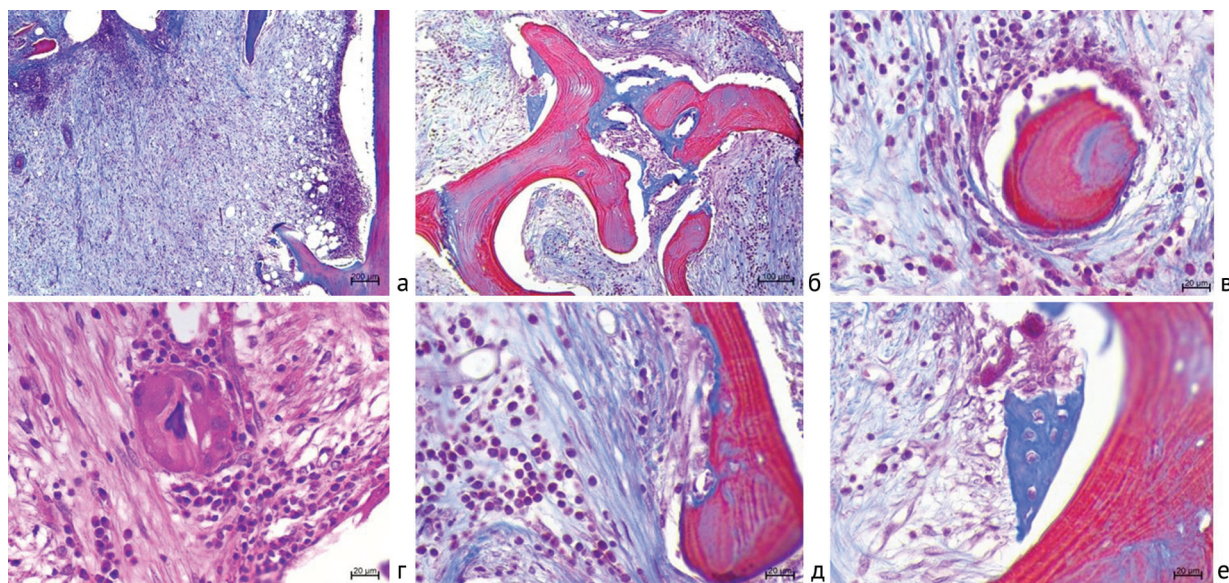


Рис. 2. Фрагменты изображений проксимального метафиза большеберцовой кости группы 1: а — обширные поля грануляционной и соединительной ткани в метафизе; б — трабекулы с пустыми остеокитарными лакунами и новообразованные костные трабекулы; в — костный микросеквестр; г — гигантская многоядерная клетка, воспалительный инфильтрат; д — истончение костной трабекулы, «гофрированный край» как результат остеокластической резорбции; е — в центре новообразованный участок костной ткани (матрикс окрашен в синий цвет). Парафиновые срезы, окраска трехцветным методом по Массону (а, б, в, д, е), гематоксилином и эозином (г). Увеличение $\times 40$ (а), $\times 100$ (б), $\times 400$ (в, г, д, е)

Таблица 2

Полуколичественная оценка хронического остеомиелита по шкале HOES

Группы	Оценка по шкале HOES в баллах, Ме ($p_{25}; p_{75}$)	Стадия хронического остеомиелита
Группа 1	6 (5;6)	ХАО
Группа 2	7 (6;7); $p^{1-2} = 0,0165$	ХАО
Группа 3	2 (1;3); $p^{1-3} = 0,0001$; $p^{2-3} = 0,0001$	ХОО

Примечание: ХОО — хронический остеомиелит ослабленный (ремиссия), ХАО — хронический остеомиелит активный; p — уровень значимости отличий при сравнении групп 1, 2 и 3 по критерию Манна – Уитни при $p < 0,05$.

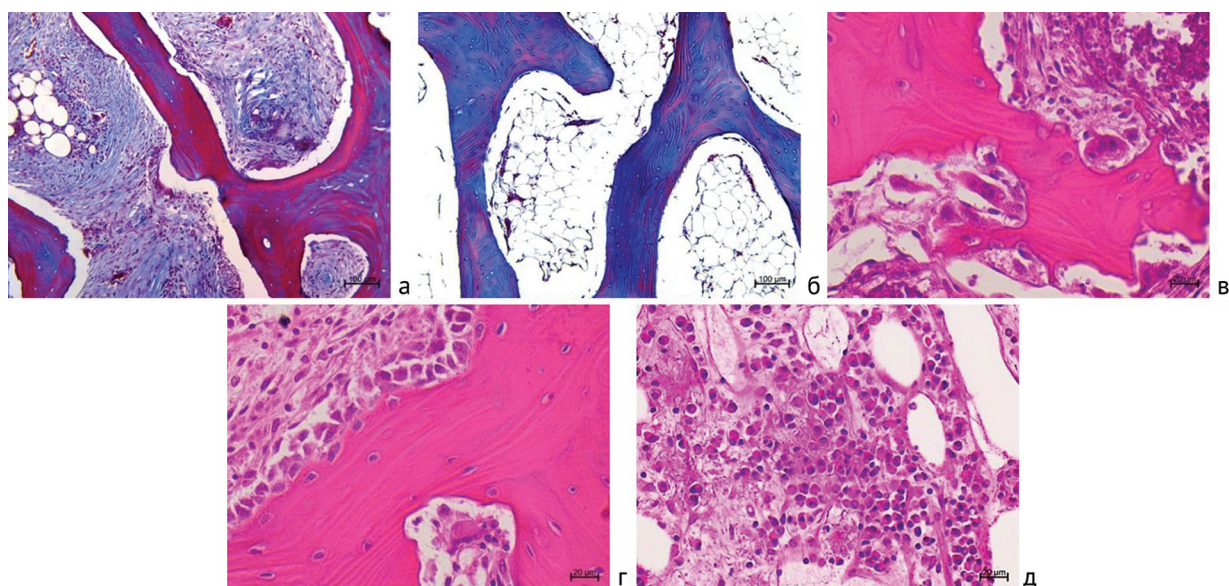


Рис. 3. Фрагменты изображений проксимального эпифиза большеберцовой кости: а — группа 2, замещение костного мозга соединительной тканью; б — группа 3, в межтрабекулярных промежутках жировой костный мозг; в — группа 2, многочисленные остеокласты; г — группа 2, остеобласты на поверхности трабекулы, внизу остеокласт; д — группа 2, лимфогистиоцитарный инфильтрат диффузного типа распределения. Парафиновые срезы, окраска трехцветным методом по Массону (а, б), гематоксилином и эозином (в, г, д). Увеличение $\times 100$ (а, б), $\times 400$ (в, г, д)

Иммуногистохимическое исследование показало, что интенсивность экспрессии CD15 была максимальной в группе 2 и минимальной в группе 3 (рис. 4).

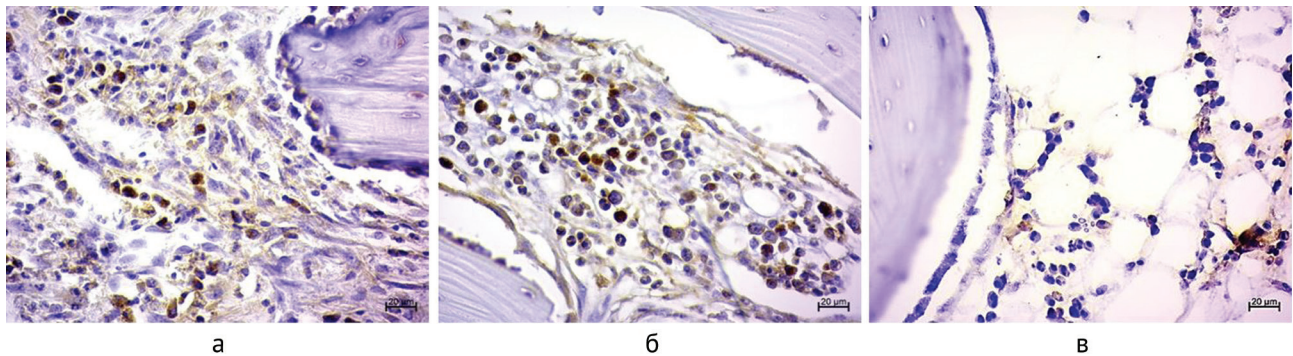


Рис. 4. Фрагменты изображений проксимального эпифиза большеберцовой кости, экспрессия CD15: а — группа 1; б — группа 2; в — группа 3. Парафиновые срезы. Увеличение $\times 400$

При замещении дефекта между эпифизом и имплантатом в группе 2 обнаружены обширные поля рыхлой соединительной ткани (рис. 5, а), в группе 3 — преимущественно жировой костный мозг (рис. 6, а). На границе с имплантатом во всех наблюдениях отмечали формирование сети новообразованных костных трабекул. В частично биорезорбируемом имплантате в группе 2 часть полостей полимера заполнена клетками крови и первичным матриксом, рыхлой соединительной тканью, отмечены новообразованные костные трабекулы (рис. 5, б) с многочисленными активными остеобластами (рис. 5, в), гигантские многоядерные клетки типа инородных тел (рис. 5, г), плотный, диффузного типа распределения лимфогистиоцитарный инфильтрат с единичными нейтрофилами (рис. 5, в, г).

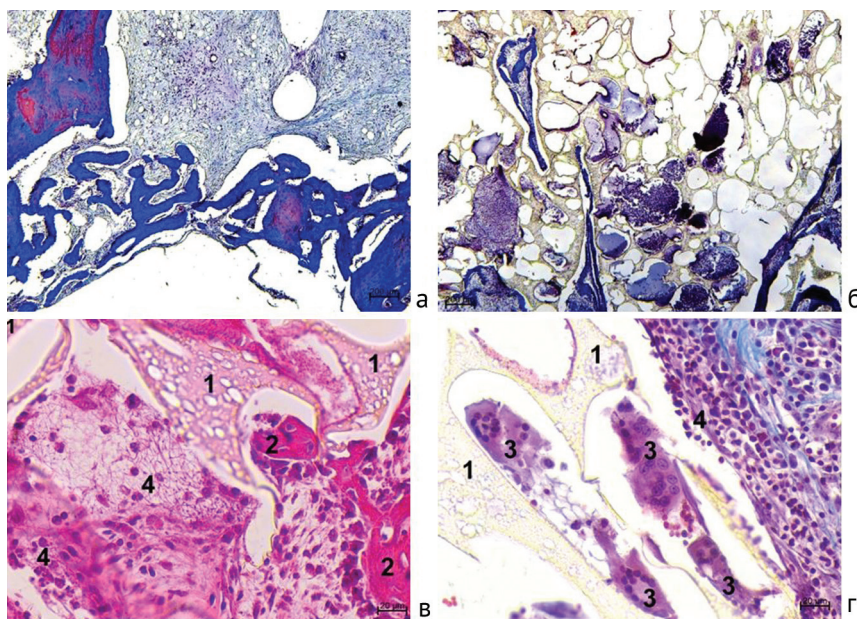


Рис. 5. Фрагменты изображений проксимального метафиза группы 2: а — на границе с имплантатом сеть новообразованных костных трабекул; б — полости имплантата пустые и заполненные новообразованными тканями; в — остеобласты на поверхности трабекул, диффузный лимфогистиоцитарный инфильтрат; г — гигантские многоядерные клетки типа инородных тел, воспалительный инфильтрат. Обозначения: 1 — полимер, 2 — костная ткань, 3 — гигантские многоядерные клетки типа инородных тел, 4 — воспалительный инфильтрат. Парафиновые срезы, окраска трехцветным методом по Массону (а, б, г), гематоксилином и эозином (в). Увеличение $\times 40$ (а), $\times 100$ (б), $\times 400$ (в, г)

В группе 3 большая часть полостей полимера заполнена эритроцитами, грануляционной и соединительной тканями, новообразованными костными трабекулами (рис. 6, б). При окраске трехцветным методом по Массону отмечены фуксинофильные участки костного матрикса (рис. 6, в). Регистрировали высокую частоту встречаемости гигантских многоядерных клеток типа инородных тел (рис. 6, г), лимфогистиоцитарный инфильтрат очагового и диффузного типов распределения (рис. 6, в).

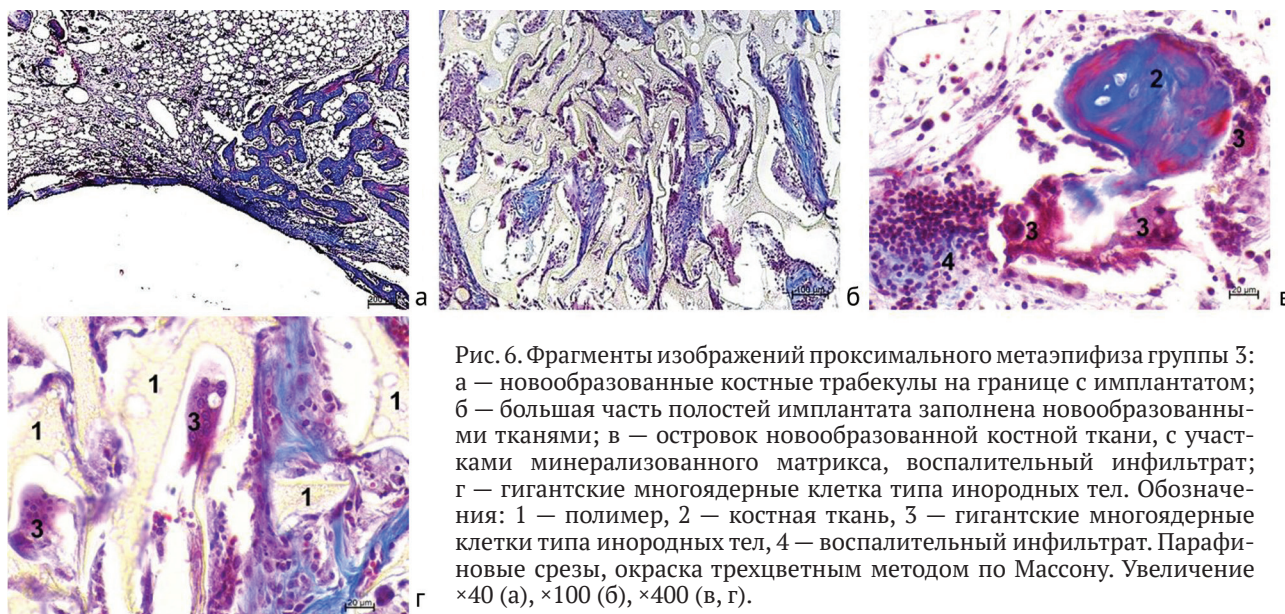


Рис. 6. Фрагменты изображений проксимального метаэпифиза группы 3: а — новообразованные костные трабекулы на границе с имплантатом; б — большая часть полостей имплантата заполнена новообразованными тканями; в — островок новообразованной костной ткани, с участками минерализованного матрикса, воспалительный инфильтрат; г — гигантские многоядерные клетки типа инородных тел. Обозначения: 1 — полимер, 2 — костная ткань, 3 — гигантские многоядерные клетки типа инородных тел, 4 — воспалительный инфильтрат. Парафиновые срезы, окраска трехцветным методом по Массону. Увеличение $\times 40$ (а), $\times 100$ (б), $\times 400$ (в, г).

ОБСУЖДЕНИЕ

Лечение пациентов с хроническими формами остеомиелита базируется на хирургической обработке инфицированной некротизированной кости (радикальная секвестрэктомия) и антибактериальной терапии, часто с использованием систем локальной доставки антибиотиков. Системная антибактериальная терапия при отсутствии адекватного кровоснабжения в местах инфицирования костей не обеспечивает поступления и поддержания эффективных концентраций антибактериальных препаратов, что приводит к неудовлетворительным результатам лечения. Локальная доставка антибиотиков направлена на достижение терапевтически эффективных концентраций препарата в месте инфекции при минимизации побочных эффектов [11, 34, 35].

Применение одноэтапной технологии лечения пациентов с остеомиелитическими полостями является более эффективным способом в сравнении с традиционными за счет снижения числа оперативных вмешательств, сокращения сроков реабилитации, раннего функционального восстановления пациентов и снижения частоты рецидивов гнойного процесса [36, 37, 38].

Разработка и экспериментальная апробация импрегнированных антибиотиками биорезорбируемых материалов при лечении пациентов с остеомиелитом является перспективным направлением. Биорезорбируемые имплантаты, насыщенные антибиотиком, обеспечивают постепенное замещение материала костной тканью, исключают необходимость повторных операций, снижают риск хронизации инфекции, способствуют регенерации кости, биосовместимы, позволяют вводить антибиотики локально [11, 35].

В 2014 г. разработан отечественный частично биорезорбируемый костнозамещающий материал «Рекост» (ЗН 2014/1646, дата гос. регистрации 03.07.2014, бессрочно), который представляет собой смесь компонентов: полимер полиуретанового ряда форполимер, порошок ортофосфата кальция и отвердитель полиол [39]. Исследования в условиях *in vitro* показали, что «Рекост» по сравнению с полиметилметакрилатом имеет преимущества по длительности высвобождения антибиотиков в терапевтических дозах [40].

Данное исследование в условиях *in vivo* показало, что материал «Рекост» является частично биodeградируемым материалом и обладает остеопластическими свойствами. Наши результаты соответствуют данным других экспериментальных и клинических исследований применения материала «Рекост» при реконструкции стенок околоносовых пазух, а также в лечении пациентов с дефектами костей после онкологических заболеваний [41, 42].

Представленный способ экспериментального моделирования остеомиелита позволяет получить хронический воспалительный процесс в костной ткани через 21 сутки после инфицирования. В экспериментах по моделированию гнойно-некротического процесса в кости (группа 1) зарегистрированы основные гистологические признаки остеомиелита: некротизированные фрагменты костных трабекул, окруженные соединительной тканью и воспалительным инфильтратом, активные процессы остеокластической резорбции и репаративного остеогенеза, фиброз костного мозга, интенсивно выраженная экспрессия CD15. Нейтрофильные гранулоциты, а также агрегаты плазматических клеток наряду с лимфогистиоцитарной инфильтрацией на фоне фиброза, наличие костных микросеквестров являются диагностическими признаками хронического остеомиелита [43].

В группах 2 и 3 через три недели после имплантации наличие сети новообразованных костных трабекул на границе контакта «кость — материал» демонстрировало остеокондуктивные свойства данного полимера. В обеих группах в полостях имплантата наряду с эритроцитами и провизорным матриксом, грануляционной и соединительной тканью отмечали формирование костных трабекул, что являлось подтверждением остеопластических свойств полимера.

В эпифизе в группе 2 наблюдали гистологические признаки хронического остеомиелита (фиброз костного мозга, трабекулы с интерстициальными остеонекрозами), оценка по шкале HOES ≥ 6 баллов соответствовала активному течению хронического остеомиелита. В группе 3 медиана оценки по шкале HOES 2 балла свидетельствовала о стихании хронического остеомиелита, экспрессия маркера CD15 была менее выражена по сравнению с группой 2. Уровень СРБ в группе 2 через три недели после имплантации у всех животных продолжал расти, что говорило о дальнейшем развитии инфекционного процесса. Персистенция воспаления больше трех недель обычно свидетельствует о развитии инфекционного процесса [44].

В группе 3 уровень СРБ у двух животных существенно снижался, у одного — менее интенсивно, что, однако, позволяет говорить о признаках купирования инфекционного процесса в данной группе.

Результаты данного исследования показали, что применение материала «Рекост» для заполнения постостеомиелитических полостей без добавления антибиотика в группе 2 привело к дальнейшему развитию инфекционного процесса и разрушению костной ткани. Добавление антибиотика ванкомицин в состав костнозамещающего материала «Рекост» в группе 3 у двух животных из трех (в одном наблюдении активный хронический остеомиелит) купировало развитие инфекционного процесса в костной ткани, способствовало благоприятному течению органотипической перестройки костной ткани, направленной на восстановление костных структур.

По данным литературы и нашему опыту, частично биорезорбируемый материал «Рекост» позволяет моделировать сложный анатомический рельеф и со временем подвергается постепенному замещению костной тканью, одновременно исполняя роль локального носителя антибиотиков, что отвечает современным требованиям к биорезорбируемым имплантатам при коррекции постостеомиелитических дефектов [37, 41, 42].

Необходимо отметить, что на результат лечения оказывает влияние не только состав костнозамещающего материала, но и качество обработки кости при выполнении секвестрнекрэктомии. Неполное удаление некротизированной и/или инфицированной костной ткани после секвестрнекрэктомии является основной причиной рецидива хронического остеомиелита [45].

Во всех наблюдениях регистрировали высокую частоту встречаемости гигантских многоядерных клеток типа инородных тел, что можно рассматривать как морфологическое проявление процесса биодеградации полимера (гигантоклеточная реакция является одним из маркеров тканевых реакций на имплантат) и как патоморфологический компонент персистирующего воспаления в условиях хронического остеомиелита [44].

Ограничения

Дизайн данного исследования имеет ограничения. Исследование выполнено на малых выборках животных и на ранних сроках эксперимента. Длительность испытания имплантируемых деградируемых/резорбируемых образцов зависит от времени/скорости их деградации. В перспективе мы планируем провести дальнейшие исследования на большем объеме выборки в отдаленные сроки эксперимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На экспериментальной модели *in vivo* через три недели после имплантации отмечена минимальная деградация материала «Рекост», выражающаяся высокой частотой гигантских многоядерных клеток типа инородных тел. Выявленные в ранние сроки эксперимента данные об остеопластических свойствах материала «Рекост» и его способности в комбинации с антибиотиком купировать инфекционно-воспалительный процесс свидетельствуют о перспективе проведения дальнейших экспериментальных исследований применения данного изделия при хроническом остеомиелите.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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.) И226011500168-2/226012122881-3.

Этическая экспертиза. Исследование одобрено локальным этическим комитетом (протокол от 29.11.2024 № 1(76)).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Макаров И.В., Ладонин С.В., Бондарева Д.А. Хирургическое лечение пациента с остеомиелитом бедренной кости с использованием предоперационного 3D-моделирования и аппаратно-программного комплекса «Автоплан». *Наука и инновации в медицине*. 2026;11(1):77-81. doi: 10.35693/SIM680158.
- 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.
- Marino MD, Izhar S, Israel H, et al. Characteristics of Traumatic Lower Extremity Amputation: Medical and Social Comorbidities. *Cureus*. 2025;17(12):e100136. doi: 10.7759/cureus.100136.
- McNeil JC, Vallejo JG, Kok EY, et al. Clinical and Microbiologic Variables Predictive of Orthopedic Complications Following *Staphylococcus aureus* Acute Hematogenous Osteoarticular Infections in Children. *Clin Infect Dis*. 2019;69(11):1955-1961. doi: 10.1093/cid/ciz109.
- Urish KL, Cassat JE. *Staphylococcus aureus* Osteomyelitis: Bone, Bugs, and Surgery. *Infect Immun*. 2020;88(7):e00932-19. doi: 10.1128/IAI.00932-19.
- Rowe SE, Wagner NJ, Li L, et al. Reactive oxygen species induce antibiotic tolerance during systemic *Staphylococcus aureus* infection. *Nat Microbiol*. 2020;5(2):282-290. doi: 10.1038/s41564-019-0627-y.
- Lathram WA, Radka CD. Intracellular survival of *Staphylococcus aureus* in macrophages during osteomyelitis. *Virulence*. 2025;16(1):2553789. doi: 10.1080/21505594.2025.2553789.
- Гараев М.Р., Пантелеев В.С., Нартайлаков М.А. и др. Хирургическое лечение хронического остеомиелита. *Креативная хирургия и онкология*. 2019;9(3):209-215. doi: 10.24060/2076-3093-2019-9-3-209-215.
- Kojima KE, de Andrade E Silva FB, Leonhardt MC, et al. Bioactive glass S53P4 to fill-up large cavitary bone defect after acute and chronic osteomyelitis treated with antibiotic-loaded cement beads: A prospective case series with a minimum 2-year follow-up. *Injury*. 2021;52 Suppl 3:S23-S28. doi: 10.1016/j.injury.2021.05.030.
- Wang P, Lin H. Research progress of nanomaterials in osteomyelitis treatment. *Zhongguo Xiu Fu Chong Jian Wai Ke Za Zhi*. 2021;35(5):648-655. (In Chin.) doi: 10.7507/1002-1892.202012044.
- Liu Y, Li X, Liang A. Current research progress of local drug delivery systems based on biodegradable polymers in treating chronic osteomyelitis. *Front Bioeng Biotechnol*. 2022;10:1042128. doi: 10.3389/fbioe.2022.1042128.
- Lewis G. Antibiotic-free antimicrobial poly (methyl methacrylate) bone cements: A state-of-the-art review. *World J Orthop*. 2022;13(4):339-353. doi: 10.5312/wjo.v13.i4.339.
- He H, Liu Y, Dong Y, et al. Material properties and progress in modification of hydrogel-based self-expandable poly(methyl methacrylate) bone cement. *RSC Adv*. 2025;15(33):26959-26980. doi: 10.1039/d5ra00592b.
- Ene R, Nica M, Ene D, et al. Review of calcium-sulphate-based ceramics and synthetic bone substitutes used for antibiotic delivery in PJI and osteomyelitis treatment. *EFORT Open Rev*. 2021;6(5):297-304. doi: 10.1302/2058-5241.6.200083.
- Unnikrishnan V, Venugopal A, Sivadasan SB, et al. Cellular and sub-chronic toxicity of hydroxyapatite porous beads loaded with antibiotic in rabbits, indented for chronic osteomyelitis. *Int J Pharm*. 2022;616:121535. doi: 10.1016/j.ijpharm.2022.121535.
- 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.
- Alegrete N, Sousa SR, Peleteiro B, et al. Local Antibiotic Delivery Ceramic Bone Substitutes for the Treatment of Infected Bone Cavities and Bone Regeneration: A Systematic Review on What We Have Learned from Animal Models. *Materials (Basel)*. 2023;16(6):2387. doi: 10.3390/ma16062387.
- 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.
- Дзюба Г.Г., Резник Л.Б., Ерофеев С.А., Одарченко Д.И. Эффективность использования локальных цементных армирующих антибактериальных имплантов в комплексе оперативного лечения больных хроническим остеомиелитом длинных костей. *Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова*. 2016;(5):31-36. doi: 10.17116/hirurgia2016531-36.
- Резник Л.Б., Ерофеев С.А., Стасенко И.В. и др. Морфологическая оценка остеоинтеграции различных имплантов при замещении дефектов длинных костей (экспериментальное исследование). *Гений ортопедии*. 2019;25(3):318-323. doi: 10.18019/1028-4427-2019-25-3-318-323.
- Цискарашвили А.В., Меликова Р.Э., Волков А.В. и др. *In vivo* эффективность полимерных гидрогелей, импрегнированных антибактериальным препаратом, при хроническом остеомиелите. *Гений ортопедии*. 2023;29(5):535-545. doi: 10.18019/1028-4427-2023-29-5-535-545.
- Антипов А.П., Божкова С.А., Гордина Е.М. и др. Сравнительный анализ эффективности костнопластических материалов, импрегнированных ванкомицином, при лечении хронического остеомиелита длинных костей. *Травматология и ортопедия России*. 2025;31(2):33-44. doi: 10.17816/2311-2905-17647.
- 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.
- Zeng M, Xu Z, Song ZQ, et al. Diagnosis and treatment of chronic osteomyelitis based on nanomaterials. *World J Orthop*. 2023;14(2):42-54. doi: 10.5312/wjo.v14.i2.42.
- Inzana JA, Schwarz EM, Kates SL, Awad HA. Biomaterials approaches to treating implant-associated osteomyelitis. *Biomaterials*. 2016;81:58-71. doi: 10.1016/j.biomaterials.2015.12.012.
- Masters EA, Trombetta RP, de Mesy Bentley KL, et al. Evolving concepts in bone infection: redefining "biofilm", "acute vs. chronic osteomyelitis", "the immune proteome" and "local antibiotic therapy". *Bone Res*. 2019;7:20. doi: 10.1038/s41413-019-0061-z.
- Трушин П.В., Штофин С.Г. Новые подходы в пластике секвестральных полостей при хроническом остеомиелите. *Вятский медицинский вестник*. 2019;4(64):22-26. doi: 10.24411/2220-7880-2019-10029.
- Oshima S, Sato T, Honda M, et al. Fabrication of Gentamicin-Loaded Hydroxyapatite/Collagen Bone-Like Nanocomposite for Anti-Infection Bone Void Fillers. *Int J Mol Sci*. 2020;21(2):551. doi: 10.3390/ijms21020551.
- 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.
- Королев С.Б., Митрофанов В.Н., Живцов О.П. и др. Моделирование хронического остеомиелита в эксперименте. *Гений ортопедии*. 2022;28(2):223-227. doi: 10.18019/1028-4427-2022-28-2-223-227.
- Guarch-Pérez C, Rioul M, Zaat SA. Current osteomyelitis mouse models, a systematic review. *Eur Cell Mater*. 2021;42:334-374. doi: 10.22203/eCm.v042a22.
- Zhou SR, Li WG, Yang LD, et al. PTGS2 Silencing Inhibits Ferroptosis in *Staphylococcus aureus*-induced Osteomyelitis By Blocking the IL-17A Signaling Pathway. *Inflammation*. 2025;48(6):3841-3857. doi: 10.1007/s10753-025-02296-3.
- Tiemann A, Hofmann GO, Krukemeyer MG, et al. Histopathological Osteomyelitis Evaluation Score (HOES) - an innovative approach to histopathological diagnostics and scoring of osteomyelitis. *GMS Interdiscip Plast Reconstr Surg DGPW*. 2014;3:Doc08. doi: 10.3205/ipsr000049.

34. Остроушко И.П., Глухов А.А., Лаптиёва А.Ю. и др. Способы санации гнойного очага и замещения костного дефекта при хроническом остеомиелите. *Политравма*. 2025;(4):72-81. doi:10.24412/1819-1495-2025-4-72-81.
35. Cheng S, Meng XH, Li Z, et al. Nanomaterial-mediated antibiotic delivery: a novel strategy for osteomyelitis therapy. *Front Bioeng Biotechnol*. 2025;13:1671151. doi: 10.3389/fbioe.2025.1671151.
36. Конев В.А., Божкова С.А., Трушников В.В. и др. Динамика тканевых изменений при одно- и двухэтапном лечении хронического остеомиелита с использованием биорезорбируемого материала, импрегнированного ванкомицином (сравнительное экспериментальноморфологическое исследование). *Гены и Клетки*. 2021;16(1):29-36. doi: 10.23868/202104004.
37. Судницын А.С., Шастов А.Л., Ключин Н.М. и др. Первый опыт применения частично биорезорбируемого костнозамещающего материала у больного хроническим остеомиелитом большеберцовой кости 34-летней давности заболевания. *Гений ортопедии*. 2025;31(1):60-65. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-1-60-65.
38. McNally MA, Ferguson JY, Scarborough M, et al. Mid- to long-term results of single-stage surgery for patients with chronic osteomyelitis using a bioabsorbable gentamicin-loaded ceramic carrier. *Bone Joint J*. 2022;104-B(9):1095-1100. doi: 10.1302/0301-620X.104B9.BJJ-2022-0396.R1.
39. Колмогоров Ю.Н., Успенский И.В., Маслов А.Н. и др. Костнозамещающие имплантаты из материала "Рекост-М" на основе 3D-моделирования для закрытия посттравматических дефектов черепа: доклинические и клинические исследования. *Современные технологии в медицине*. 2018;10(3):95-103. doi: 10.17691/stm2018.10.3.11.
40. Стогов М.В., Шастов А.Л., Киреева Е.А. и др. 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.
41. Соловьев В.Ю., Жеравин А.А., Киселев Р.С. Предварительные результаты использования костно-замещающего материала «Рекост» в хирургическом лечении опухолей костей. *Сибирский онкологический журнал*. 2025;24(6):99-107. doi: 10.21294/1814-4861-2025-24-6-99-107.
42. Красножен В.Н., Покровская Е.М. Экспериментальное обоснование использования костного цемента для реконструкции послеоперационных дефектов стенок околоносовых пазух. *Вестник оториноларингологии*. 2014;(6):54-56. doi: 10.17116/otorino2014654-56.
43. Sybenga AB, Jupiter DC, Speights VO, Rao A. Diagnosing Osteomyelitis: A Histology Guide for Pathologists. *J Foot Ankle Surg*. 2020;59(1):75-85. doi: 10.1053/j.jfas.2019.06.007.
44. Должиков А.А., Колпаков А.Я., Ярош А.Л. и др. Гигантские клетки инородных тел и тканевые реакции на поверхности имплантатов. *Курский научно-практический вестник «Человек и его здоровье»*. 2017;3:86-94. doi: 10.21626/vestnik/2017-3/15.
45. Subramanyam KN, Mundargi AV, Prabhu MV, et al. Surgical management of chronic osteomyelitis: Organisms, recurrence and treatment outcome. *Chin J Traumatol*. 2023;26(4):228-235. doi: 10.1016/j.cjtee.2023.01.003.

Статья поступила 24.04.2026; одобрена после рецензирования 28.04.2026; принята к публикации 09.06.2026.

The article was submitted 24.04.2026; approved after reviewing 28.04.2026; accepted for publication 09.06.2026.

Информация об авторах:

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

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

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

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

Татьяна Николаевна Варсегова — кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, varstn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5430-2045>;

Надежда Владимировна Кубрак — старший научный сотрудник, kubrak2@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7494-8342>.

Information about the authors:

Anatolii S. Sudnitsyn — Candidate of Medical Sciences, Orthopaedic Surgeon, Head of the Scientific Laboratory, anatol_anatol@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2602-2457>;

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

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

Natalya V. Tushina — Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, ntushina76@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1322-608X>;

Tatyana N. Varsegova — Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, varstn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5430-2045>;

Nadezhda V. Kubrak — Senior Researcher, kubrak2@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7494-8342>.

Вклад авторов:

Судницын А.С. — разработка концепции и дизайна исследования, анализ и интерпретация данных, написание текста статьи, утверждение окончательного варианта статьи для публикации.

Ступина Т.А. — сбор, анализ и интерпретация данных, написание текста статьи.

Дюрягина О.В. — сбор, анализ и интерпретация данных, написание текста статьи.

Тушина Н.В. — сбор, анализ данных, написание текста статьи.

Варсегова Т.Н. — сбор, анализ данных, написание текста статьи.

Кубрак Н.В. — сбор, анализ данных, написание текста статьи.

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



Оптимизация первого этапа двухэтапного эндопротезирования при инфекционных кокситов с использованием нового устройства для изготовления спейсера

Е.О. Перецманас, В.С. Зубиков, И.А. Герасимов✉, Е.Г. Соколов

Национальный медицинский исследовательский центр фтизиопульмонологии и инфекционных заболеваний, Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Илья Александрович Герасимов, ilya-1559@rambler.ru

Аннотация

Введение. Первый этап двухэтапного эндопротезирования при инфекционных кокситов включает интраоперационное изготовление артикулирующего цементного спейсера. Критическим моментом является ручное удержание металлической арматуры в пресс-форме в течение 8–12 минут полимеризации костного цемента, что увеличивает общее время операции. Оптимизация этого этапа является актуальной задачей.

Цель работы — оценить эффективность применения нового устройства для фиксации арматуры при изготовлении цементного спейсера тазобедренного сустава для оптимизации первого этапа двухэтапного эндопротезирования.

Материалы и методы. Новое устройство (патент РФ № 232924 U1), изготовленное из медицинской нержавеющей стали AISI304, допускающей многократную стерилизацию, позволяет фиксировать арматуру, используемую для изготовления артикулирующего спейсера тазобедренного сустава в зажиме, позиционировать её над центром ячейки пресс-формы, подобранной по размеру вертлужной впадины (диаметры 46–62 мм с шагом 2 мм). После заполнения ячейки цементом арматуру погружают на заданную глубину и фиксируют устройством. Через 8–12 минут в зависимости от окончания полимеризации конструкцию извлекают для цементирования бедренного компонента. Проведен ретроспективный анализ 85 пациентов с инфекционным кокситом, оперированных в 2023–2026 гг.: контрольная группа ($n = 51$) — спейсер изготовлен ручным удержанием арматуры; основная группа ($n = 34$) — спейсер изготовлен с применением нового фиксирующего устройства. Оценивали общее время операции (мин), частоту доработок спейсера, ранние осложнения. Группы сопоставимы по основным параметрам.

Результаты. В основной группе отмечено достоверное снижение времени операции на 13,7 минуты ($(84,5 \pm 8,9)$ мин против $(98,2 \pm 12,5)$ мин, $p = 0,008$). Частота интраоперационных доработок спейсера снизилась в пять раз (6 % против 29 %, $p = 0,012$). Вывихов в раннем послеоперационном периоде в обеих группах не зафиксировано. Достоверных различий в точности рентгенологических параметров (офсет, ШДУ) не выявлено.

Обсуждение. В литературных источниках сведения об аналогичных устройствах для изготовления ацетабулярного компонента артикулирующего спейсера тазобедренного сустава отсутствуют. У пациентов с исходным инфекционным процессом (туберкулезный или гнойный коксит) и частой коморбидностью (ВИЧ, гепатиты) даже относительно небольшое сокращение времени операции может улучшить прогноз. Отсутствие необходимости в доработке спейсера сохраняет целостность поверхности головки и более равномерное распределение антибиотика в цементе

Заключение. Разработанное устройство может быть рекомендовано для клинического внедрения, так как оно позволяет достоверно сократить время операции в среднем на 14 минут и снизить частоту доработок спейсера.

Ключевые слова: двухэтапное эндопротезирование, спейсер тазобедренного сустава, инфекционный коксит, оптимизация, время операции, устройство для фиксации

Для цитирования: Перецманас Е.О., Зубиков В.С., Герасимов И.А., Соколов Е.Г. Оптимизация первого этапа двухэтапного эндопротезирования при инфекционных кокситов с использованием нового устройства для изготовления спейсера. *Гений ортопедии*. 2026;32(4):552-559. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-4-552-559.



Optimization of the first stage of hip revision in 2-stage surgery to replace infected artificial hips using a new molding spacer tool

E.O. Peretsmanas, V.S. Zubikov, I.A. Gerasimov✉, E.G. Sokolovich

National Medical Research Center for Phthisiopulmonology and Infectious Diseases, Moscow, Russian Federation

Corresponding author: Ilya A. Gerasimov, ilya-1559@rambler.ru

Abstract

Introduction The first stage of two-step surgery to replace infected hip suggests the intraoperative fabrication of an articulating cement spacer. A critical step is manual holding the metal reinforcement in the mold for 8–12 minutes while the bone cement cures, which increasing the overall surgical time. Optimizing this stage is essential.

The **objective** was to evaluate the effectiveness of the first stage of hip revision in 2-stage surgery optimized with a new device for fixing reinforcement in the manufacture of a cemented spacer for the hip joint.

Material and methods A new device (RU Patent No. 232924 U1), made of medical-grade AISI304 stainless steel, which is reusable and sterilizable, allows for the fixation of reinforcement used to manufacture hip articulating spacers in a clamp and their positioning over the center of a mold cell sized to fit the acetabulum (diameters 46–62 mm in 2 mm increments). With the cell filled with cement, the reinforcement was inserted to the specified depth and secured with the device. After 8–12 minutes, to allow polymerization completed, the construct was removed for cementation of the femoral component. A retrospective analysis of 85 patients with infectious coxitis surgically treated between 2023 and 2026 was conducted: the spacer was made by manual retention of reinforcement in the control group ($n = 51$) and the spacer was made using a new fixation device in the study group ($n = 34$). Total operative time (min), the frequency of spacer revisions, and early complications were assessed. The groups were comparable for key parameters.

Results Operating time was reduced by 13.7 minutes in the study group ((84.5 ± 8.9) min versus (98.2 ± 12.5) min, $p = 0.008$). The frequency of intraoperative spacer adjustments decreased fivefold (6 % versus 29 %, $p = 0.012$). No dislocations were recorded early post-op in either group. No significant differences in the accuracy of radiographic parameters (offset, neck-to-shaft angle) were found.

Discussion There are no publications reporting similar devices for the fabrication of the acetabular component of the hip articulating spacers. Patients with an underlying infectious process (tuberculous or purulent coxitis) and frequent comorbidities (HIV, hepatitis) may benefit with even a relatively small reduction in surgical time improving the prognosis. The lack of need for spacer modification preserves the integrity of the femoral head surface and ensures a more uniform distribution of the antibiotic in the cement.

Conclusion The device offered can be recommended for clinical implementation reducing surgical time by an average of 14 minutes and the frequency of spacer modifications.

Keywords: two-stage hip replacement, hip spacer, infectious coxitis, optimization, operative time, fixation device

For citation: Peretsmanas EO, Zubikov VS, Gerasimov IA, Sokolovich EG. Optimization of the first stage of hip revision in 2-stage surgery to replace infected artificial hips using a new molding spacer tool. *Genij Ortopedii*. 2026;32(4):552–559. doi: 10.18019/1028-4427-2026-32-4-552-559.

ВВЕДЕНИЕ

Двухэтапное эндопротезирование остается основным методом лечения пациентов с септическими кокситом [1–9]. Первый этап включает резекцию головки бедренной кости, санацию очага и установку артикулирующего антимикробного цементного спейсера, который обеспечивает временную опороспособность конечности и локальное депонирование антибиотиков [10, 11]. При септическом коксите предпочтительно использование индивидуального антибактериального спейсера, изготовленного интраоперационно ручным способом. Ключевыми преимуществами таких спейсеров из костного цемента перед фабричными аналогами являются: возможность адаптации формы к индивидуальной анатомии дефекта, оптимизация дозировки и комбинации антибиотиков с учётом резистентности возбудителя, а также значительное снижение механического конфликта с окружающими тканями благодаря моделированию суставной головки непосредственно в условиях раны [3, 4, 12, 13, 14]. Однако, как показывает наш клинический опыт, технически сложным и требующим оптимизации этапом остаётся интраоперационное формирование головки спейсера. Хирург вынужден вручную удерживать металлическую арматуру ножки в ячейке пресс-формы до завершения полимеризации костного цемента (8–12 минут). Данный этап сопряжён со статическим мышечным напряжением, увеличивает общее время операции, отвлекает хирурга от других значимых манипуляций (санация, гемостаз) и при утомлении (особенно у специалистов с небольшим опытом) может приводить к смещению арматуры, что требует последующей коррекции формы спейсера [15, 16].

В машиностроении для аналогичных задач используют координатные стойки и штативы [17]. В медицине известны попытки адаптации таких конструкций [18, 19], однако они не рассчитаны на фиксацию арматуры сложного сечения (округлой, овальной, с килем). Нами разработано новое устройство для фиксации арматуры бедренного компонента спейсера на время полимеризации [20].

Цель работы — оценить эффективность применения нового устройства для фиксации арматуры при изготовлении цементного спейсера тазобедренного сустава для оптимизации первого этапа двухэтапного эндопротезирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Описание устройства (патент РФ № 232924 U1) [20]

Устройство (рис. 1, 2) изготовлено из медицинской нержавеющей стали AISI304, допускающей многократную стерилизацию. Конструкция включает: прямоугольную станину (80 × 75 мм) — основание (1), вертикальную резьбовую шпильку (Ø 8 мм, L = 120 мм) (2) с гайкой (3) для перемещения каретки; направляющую стойку (Ø 10 мм, L = 120 мм) для стабильности (4), подвижную каретку (70 × 30 мм)

с диапазоном вертикального перемещения 50–100 мм (5), узел вращения (рычаг 50 × 17 мм) с фиксацией угла наклона 0–90° (6), гайку фиксации по углу (7), зажимное устройство с прижимом и боковым перемещением 0–10 мм для фиксации арматуры различного сечения (8), гайку рифленую низкую (9), винт фиксации высоты (10).

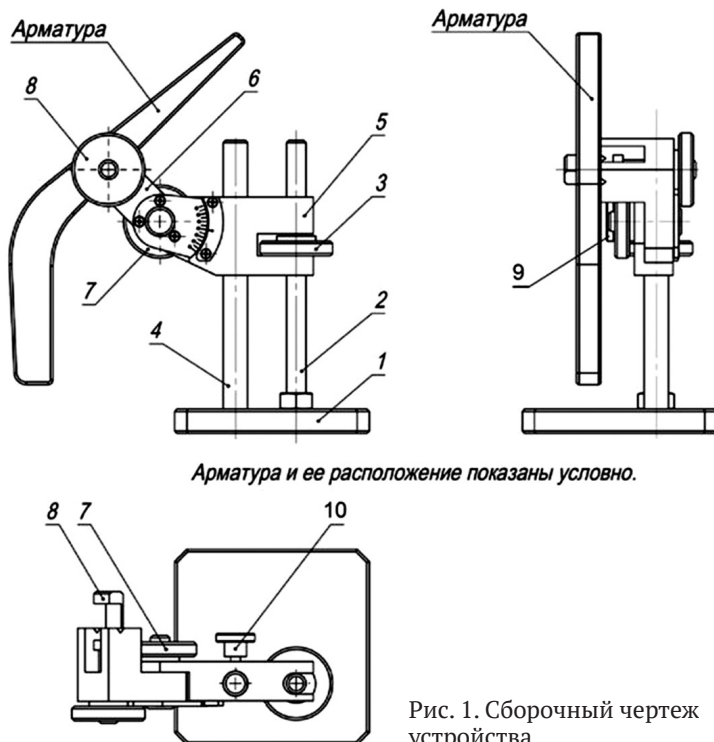


Рис. 1. Сборочный чертеж устройства



Рис. 2. Устройство для удержания арматуры спейсера

Методика применения

Устройство размещают на отдельном столике. Арматуру фиксируют в зажиме, позиционируют над ячейкой пресс-формы, подобранной по размеру вертлужной впадины (диаметры 46–62 мм). В порошок костного цемента добавляют антибактериальный препарат с учетом индивидуальной чувствительности возбудителя. При неспецифической инфекции преимущественно используют ванкомицин, гентамицин, линкомицин, амикацин, при туберкулезном коксите — амикацин, рифампицин, изониазид. Компоненты тщательно перемешивают. После заполнения ячейки цементом арматуру погружают на заданную глубину и фиксируют с помощью устройства. Через 8–12 минут, после завершения полимеризации, конструкцию извлекают для последующего цементирования бедренного компонента.

Дизайн исследования

Исследование — одноцентровое ретроспективное когортное.

Критерии включения:

- пациенты с инфекционным кокситом (туберкулезной и неспецифической этиологии);
- выполнен первый этап двухэтапного эндопротезирования с установкой артикулирующего цементного спейсера;
- наличие полной медицинской документации (протокол операции, наркозная карта, послеоперационные рентгенограммы).

Критерии не включения: отсутствие данных о времени операции; недоступные для анализа рентгенограммы.

Исследование проводили на базе отделения для больных внелёгочным туберкулёзом Национального медицинского исследовательского центра фтизиопульмонологии и инфекционных заболеваний в период с 01.01.2023 по 29.02.2026.

Характеристика групп

В исследование включено 85 пациентов, соответствующих критериям отбора. Распределение по группам зависело от доступности устройства на момент операции:

- основная группа ($n = 34$) — изготовление спейсера с применением разработанного устройства, фиксирующего арматуру на время полимеризации.
- контрольная группа ($n = 51$) — изготовление спейсера традиционным ручным методом (хирург удерживал арматуру в пресс-форме до полной полимеризации цемента);

Группы сопоставимы по полу, возрасту, этиологии процесса и исходным рентгенологическим параметрам (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительная характеристика групп

Параметр		Основная ($n = 34$)		Контрольная ($n = 51$)		p
Возраст, лет		$46,1 \pm 13,2$		$47,5 \pm 12,0$		0,61
Размер вертлужной впадины, мм		$50,8 \pm 3,9$		$50,3 \pm 4,0$		0,57
		абс.	%	абс.	%	
Пол	Мужской	22	64,7	33	64,7	0,94
	Женский	12	35,3	18	35,3	
Туберкулезный коксит		22	64,7	32	62,7	0,85

Общее время операции (мин) определяли как интервал от разреза до наложения повязки, указанный в протоколах операций и наркозных картах. Частоту интраоперационных коррекций спейсера определяли по наличию записей в протоколе. На послеоперационных рентгенограммах измеряли: офсет (расстояние от центра головки до оси бедренной кости, мм); шеечно-диафизарный угол ($^{\circ}$); отклонение от предоперационного плана. К ранним послеоперационным осложнениям относили вывихи, нестабильность спейсера в течение трех месяцев.

Статистический анализ

Статистическая обработка выполнена с использованием программного обеспечения Statistica 10.0 (StatSoft, США). Количественные данные представлены как $M \pm \sigma$. Сравнение групп проводили с использованием t-критерия Стьюдента для независимых выборок (при нормальном распределении) и U-критерия Манна – Уитни (при распределении, отличном от нормального). Категориальные переменные сравнивали с помощью критерия χ^2 с поправкой Йейтса. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В основной группе отмечено достоверное снижение общего времени операции на 13,7 минуты. Частота интраоперационных коррекций спейсера в основной группе была в пять раз ниже (табл. 2). Достоверных различий в точности позиционирования арматуры между группами не выявлено. Отклонение офсета и ШДУ от планируемых значений было сопоставимо (табл. 3). Послеоперационные осложнения (вывихи и нестабильность спейсера) в раннем послеоперационном периоде (до трех месяцев) не зафиксированы ни в одной из групп.

Таблица 2

Интраоперационные параметры

Параметр	Основная (n = 34)	Контрольная (n = 51)	Разница	p
Время операции, мин	84,5 ± 8,9	98,2 ± 12,5	-13,7	0,008
Требовалась коррекция спейсера	2 (6 %)	15 (29 %)	-23 %	0,012

Таблица 3

Рентгенологические параметры

Параметр	Основная (n = 34)	Контрольная (n = 51)	p
Отклонение офсета от плана, мм	3,2 ± 1,1	3,3 ± 1,2	0,69
Отклонение ШДУ от плана, °	4,0 ± 1,6	4,1 ± 1,8	0,79

Клинический пример

Пациент 35 лет поступил в клинику НМИЦ ФПИ с жалобами на боль в правом тазобедренном суставе, вынужденное передвижение с помощью костылей.

Анамнез: Боль в правом тазобедренном суставе беспокоит на протяжении 18 месяцев после падения с высоты. Неоднократно отмечал формирование свищевого хода по наружной поверхности сустава. В центральной районной больнице по месту жительства выполнили абсцессотомию. Сопутствующее заболевание — ВИЧ-инфекция (стадия 4Б, фаза прогрессирования на фоне антиретровирусной терапии (АРТ)), повторные бактериальные инфекции. Пациент в течение двух лет постоянно принимает препараты АРТ по схеме: ралтегравир 400 мг два раза в сутки, этравирин 200 мг два раза в сутки, ламивудин 150 мг два раза в сутки. При поступлении: CD4+ = 360 кл/мкл, РНК ВИЧ < 20 копий/мл.

Объективный статус при поступлении: Функциональные показатели правого тазобедренного сустава по шкале ННS — 33 балла, по шкале WOMAC — 74 балла, выраженность болевого синдрома по визуальной аналоговой шкале (ВАШ) — 7 баллов. При компьютерной томографии правого тазобедренного сустава выявлена деструкция проксимального отдела бедренной кости с лизисом головки (рис. 3).

Лабораторные и инструментальные исследования:

При иммунологическом обследовании: CD4+ = 350 кл/мкл, вирусная нагрузка < 20 копий/мл. В общем анализе крови: СОЭ — 61 мм/ч. Под лучевым контролем выполнена трепанобиопсия из зоны костной деструкции головки бедренной кости. При микробиологическом исследовании биоптата получены культуры *Acinetobacter baumannii* (чувствительность к амикацину) и *Staphylococcus aureus* (чувствителен ко всем тестированным антибиотикам). Патогистологическое заключение: признаки хронического неспецифического коксита.



Рис. 3. Компьютерная томография правого тазобедренного сустава пациента

На основании клинических, лучевых, микробиологических и гистологических данных установлен заключительный клинический диагноз: правосторонний инфекционный коксит (М00) неспецифической этиологии, ассоциированный с ВИЧ-инфекцией.

Выполнен первый этап эндопротезирования, — резекция проксимального конца правой бедренной кости. На отдельном столике изготовлен антибактериальный спейсер. Головка спейсера сформирована с использованием устройства (рис. 2). В порошкообразный полимер костного цемента добавлена порошковая форма амикацина из расчета 2 г препарата на 40 г цемента, компоненты механически перемешаны. Бедренный компонент спейсера погружен в заполненную цементно-антимикробной композицией форму до затвердевания (на 10-ой минуте после смешивания), после чего образец из-

влечен из пластиковой формы. Область шейки спейсера дополнительно укрыта цементной мантией. Изготовленный спейсер установлен в костномозговой канал бедренной кости, головка спейсера вправлена в вертлужную впадину (рис. 4). Пациент вертикализирован на вторые сутки после оперативного вмешательства. Послеоперационная рана зажила первичным натяжением, признаков гнойно-воспалительных осложнений не отмечено. Болевой синдром купирован нестероидными противовоспалительными препаратами. На 10-ые сутки после операции пациент выписан в удовлетворительном состоянии под наблюдение инфекциониста и травматолога-ортопеда по месту жительства.

Рекомендовано: продолжение АРТ, антибактериальная терапия, явка в НМИЦ ФПИ для решения вопроса о втором этапе эндопротезирования (установка постоянного эндопротеза) после подтверждения санации сустава (нормализация СОЭ, отрицательные посеы, отсутствие клинических признаков инфекции в течение трех месяцев).

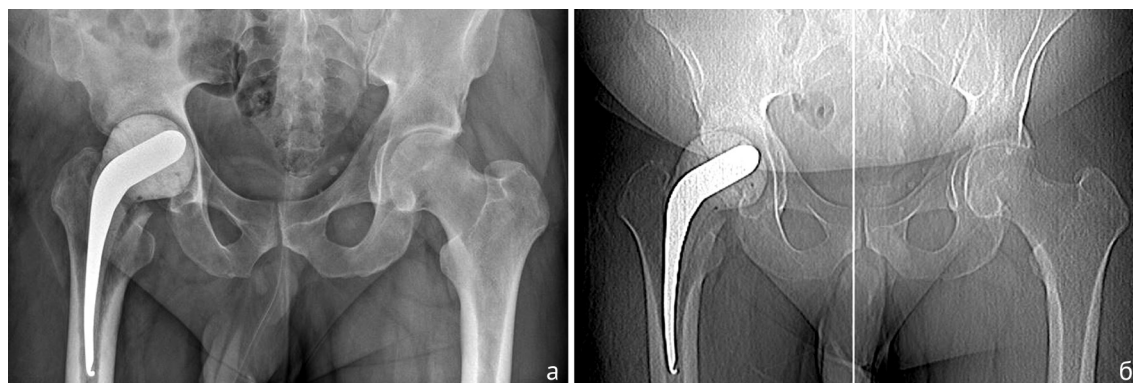


Рис. 4. Рентгенограмма правого тазобедренного сустава пациента: а — первые сутки после операции по установке артикулирующего цементного спейсера; б — через три месяца после операции

ОБСУЖДЕНИЕ

В литературных источниках сведений об аналогичных устройствах для изготовления ацетабулярного компонента артикулирующего спейсера тазобедренного сустава нам найти не удалось. Основным результатом нашего исследования стало достоверное сокращение продолжительности первого этапа двухэтапного эндопротезирования при использовании разработанного фиксирующего устройства.

Разница в 13,7 минуты ($p < 0,01$) клинически значима по ряду причин. Во-первых, увеличение продолжительности оперативного вмешательства повышает риск инфекционных осложнений [21–23]. У пациентов с исходным инфекционным процессом (туберкулезный или гнойный коксит) и частой коморбидностью (ВИЧ, гепатиты) даже относительно небольшое сокращение времени операции может улучшить прогноз [24, 25]. Во-вторых, пятикратное снижение частоты интраоперационных коррекций спейсера (с 29 % до 6 %, $p < 0,05$) косвенно свидетельствует о более высоком качестве первичного позиционирования. Хотя мы не выявили явных различий в рентгенологических параметрах (офсет, ШДУ), отсутствие необходимости в доработке спейсера сохраняет целостность поверхности головки и более равномерное распределение антибиотика в цементе, что подтверждают и другие авторы [26, 27].

В нашем исследовании не получено доказательств преимущества устройства в точности позиционирования спейсера в резецированном суставе. Мы связываем это с высоким исходным уровнем хирургической техники в клинике: все операции выполняли опытные хирурги (стаж — более 10 лет), что позволяло достигать анатомических параметров и при ручном методе. Однако для менее опытных хирургов или в условиях высокого темпа операций стабилизирующий эффект устройства может оказаться более выраженным [23, 27, 28].

Отсутствие вывихов в обеих группах (0 из 85) также указывает на высокий уровень хирургической техники и не является недостатком исследования. Это означает, что устройство не ухудшает клинических исходов, но при этом сокращает время операции и повышает эргономичность.

Функциональные преимущества устройства, на наш взгляд, также важны. Ручное удержание арматуры в течение 8–12 минут требует определенного статического мышечного усилия, приводит к утомлению и может сопровождаться тремором. Устройство полностью освобождает хирурга, позволяя ему в это время выполнять другие этапы операции (санацию, гемостаз, дренирование).

Ограничения исследования: ретроспективный дизайн (возможны неучтенные систематические ошибки) и отсутствие формализованной оценки эргономики (например, по визуально-аналоговой шкале утомления хирургов).

Целесообразно проведение проспективного рандомизированного исследования с участием нескольких центров и включением хирургов разного уровня подготовки. Это позволит оценить вклад устройства в точность позиционирования и частоту вывихов в менее селективной популяции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение нового устройства для фиксации арматуры при интраоперационном изготовлении цементного спейсера тазобедренного сустава позволяет оптимизировать первый этап двухэтапного эндопротезирования, достоверно сократить общее время операции в среднем на 13,7 минуты ($p < 0,01$), уменьшить частоту интраоперационных доработок спейсера в пять раз ($p < 0,05$).

Устройство не уступает традиционному ручному методу по клиническим исходам (частота вывихов, точность позиционирования) и превосходит его по эргономичности и стандартизации этапа полимеризации.

Полученные данные обосновывают целесообразность клинического внедрения устройства для оптимизации первого этапа двухэтапного эндопротезирования при инфекционных кокситов.

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

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Этическая экспертиза. Исследование проведено в соответствии с этическими стандартами и нормами законодательства РФ. Проведение исследований одобрено локальным этическим комитетом ФГБУ «НМИЦ ФПИ» Минздрава России (протокол от 31.01.2023 № 3).

Информированное согласие. Авторы получили письменное согласие пациента на публикацию медицинских данных и фотографий.

Информация об использовании искусственного интеллекта. Авторы заявляют о применении языковой модели DeepSeek для улучшения читаемости текста рукописи после написания чернового варианта. Авторы полностью ответственны за содержание статьи.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Wang B, Li M, Wang J, et al. Use of 1.5-Stage Functional Articulating Hip Spacers for Two-Stage Treatment of Hip Infection. *J Arthroplasty*. 2024;39(10):2591-2599.e1. doi: 10.1016/j.arth.2024.05.014.
- Николаев Н.С., Карпухин А.С., Максимов А.Л. и др. Опыт лечения больных с неспецифическим кокситом методом двухэтапного эндопротезирования. *Кафедра травматологии и ортопедии*. 2020;(4):5-13. doi: 10.17238/issn2226-2016.2020.4.5-13.
- Зубиков В.С., Перецманас Е.О., Герасимов И.А., Рукин Я.А. Влияние ВИЧ инфекции на результаты двухэтапного эндопротезирования тазобедренного сустава при септическом коксите. *Кафедра травматологии и ортопедии*. 2025;(4):102-111. doi: 10.17238/issn2226-2016.2025.4.102-111.
- Перецманас Е.О., Зубиков В.С., Герасимов И.А., Рукин Я.А. Лечение ВИЧ-инфицированных пациентов с инфекционным неспецифическим кокситом с использованием антимикробного спейсера тазобедренного сустава. *Гений ортопедии*. 2025;31(6):822-830. doi: 10.18019/1028-4427-2025-31-6-822-830.
- Triapichnikov AS, Ermakov AM, Malkova TA. Outcomes of Revision Arthroplasty for Hip Joint Infection in Matched Groups of HIV-Positive and HIV-Negative Patients. *Curr HIV Res*. 2022;20(5):365-372. doi: 10.2174/1570162X20666220805093833.
- Russo A, Cavagnaro L, Chiarlone F, et al. Clinical outcomes and survivorship of two-stage total hip or knee arthroplasty in septic arthritis: a retrospective analysis with a minimum five-year follow-up. *Int Orthop*. 2021;45(7):1683-1691. doi: 10.1007/s00264-021-05013-5.
- Balato G, de Matteo V, Ascione T, et al. Management of septic arthritis of the hip joint in adults. A systematic review of the literature. *BMC Musculoskelet Disord*. 2021;22(Suppl 2):1006. doi: 10.1186/s12891-021-04843-z.
- Chen CY, Lin CP, Tsai CH, et al. Medullary-Sparing Antibiotic Cement Articulating Spacer Reduces the Rate of Mechanical Complications in Advanced Septic Hip Arthritis: A Retrospective Cohort Study. *J Pers Med*. 2024;14(2):162. doi: 10.3390/jpm14020162.
- Zhang Z, Huang Z, Fang X, et al. Diagnosis and surgical treatment of chronic destructive septic hip arthritis. *Arthroplasty*. 2025;7(1):19. doi: 10.1186/s42836-025-00305-2.
- D'Angelo F, Monestier L, Zagra L. Active septic arthritis of the hip in adults: what's new in the treatment? A systematic review. *EFORT Open Rev*. 2021;6(3):164-172. doi: 10.1302/2058-5241.6.200082.
- Астахов Д.И., Артюх В.А. Патогенез и современные методы лечения пациентов с инфекционным артритом тазобедренного сустава: обзор литературы. *Травматология и ортопедия России*. 2024;30(2):192-205. doi: 10.17816/2311-2905-17497.
- Линник С.А., Афиногенов Г.Е., Афиногенова А.Г. и др. Выбор спейсера на первом этапе лечения поздней глубокой перипротезной инфекции тазобедренного сустава. *Гений ортопедии*. 2021;27(5):548-554. doi: 10.18019/1028-4427-2021-27-5-548-554.
- Кудашев Д.С., Светлова Г.Н., Сефединова М.Ю. и др. Аvascularный некроз головки бедренной кости в сочетании с септическим артритом тазобедренного сустава. *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова*. 2024;31(1):91-100. doi: 10.17816/vto611077.
- Минасов Б.Ш., Якупов Р.Р., Акбашев В.Н. и др. Оптимизация ревизионной артропластики: роль индивидуальных артикулирующих спейсеров. *Гений ортопедии*. 2024;30(5):753-765. doi: 10.18019/1028-4427-2024-30-5-753-765.
- Chao TW, Deng Y, Sivalingam V, et al. Modular Total Femur Replacement for Staged Total Femur Replacement. *Arthroplast Today*. 2021;11:163-167. doi: 10.1016/j.artd.2021.08.006.
- Wüst E, Vogt S. *Spacer mould and method for producing hip spacers*. Patent US, no. 10,399,248 B2, 2019. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/fa/8a/2d/0330f8c5bcc42e/US10399248.pdf>. Accessed May 21, 2026.
- Средства и методы измерения отклонений от прямолинейности и плоскостности. В кн: Васильев А.С. *Основы метрологии и технические измерения*. М.: Машиностроение, 1988:141-149.
- Грушевская, Е.А. *Комплексный подход к профилактике и лечению инфекции области хирургического вмешательства: автореф. дис. ... канд. мед. наук*. Уфа; 2020:24. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54471019>. Ссылка активна на 21.05.2026.

19. Зубаиров Е.Х., Сак Л.Д., Сак Б.Л. *Штатив медицинский*. Патент РФ на полезную модель № 37928. 20.05.2004, Бюл. № 14. Доступно по: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=37928&TypeFile=html. Ссылка активна на 21.05.2026.
20. Перецманас Е.О., Зубиков В.С., Герасимов И.А. *Устройство для удержания арматуры бедренного компонента при интраоперационном изготовлении головки из костного цемента спейсера тазобедренного сустава*. Патент на полезную модель № 232924. 27.03.2025. Бюл. № 9. Доступно по: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=232924&TypeFile=html. Ссылка активна на 21.05.2026.
21. Морозов А.М., Сергеев А.Н., Жуков С.В. и др. Профилактика инфекции области хирургического вмешательства. *Современные проблемы науки и образования*. 2020;(6). doi: 10.17513/spno.30268.
22. Булычева И.А., Кондратьева К.А., Якупова Г.Р. и др. Эпидемиологический надзор за инфекциями области хирургического вмешательства при эндопротезировании крупных суставов. *Казанский медицинский журнал*. 2022;103(2):221-229. doi:10.17816/KMJ2022-221.
23. Cheng H, Chen BP, Soleas IM, et al. Prolonged Operative Duration Increases Risk of Surgical Site Infections: A Systematic Review. *Surg Infect (Larchmt)*. 2017;18(6):722-735. doi: 10.1089/sur.2017.089.
24. Korol E, Johnston K, Waser N, et al. A systematic review of risk factors associated with surgical site infections among surgical patients. *PLoS One*. 2013;8(12):e83743. doi: 10.1371/journal.pone.0083743.
25. Anagnostakos K, Meyer C. Antibiotic Elution from Hip and Knee Acrylic Bone Cement Spacers: A Systematic Review. *Biomed Res Int*. 2017;2017:4657874. doi: 10.1155/2017/4657874.
26. Anagnostakos K, Kelm J. Enhancement of antibiotic elution from acrylic bone cement. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*. 2009;90(1):467-475. doi: 10.1002/jbm.b.31281.
27. Hoppe DJ, de Sa D, Simunovic N, et al. The learning curve for hip arthroscopy: a systematic review. *Arthroscopy*. 2014;30(3):389-397. doi: 10.1016/j.arthro.2013.11.012.
28. Jahnke A, Köther-Herrmann J, Fonseca Ulloa CA, et al. Retrospective clinical and X-ray-based outcome analysis of a short-stem hip arthroplasty taking into account the operative learning curve over 7 years in the 3-year control course. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2023;143(11):6589-6597. doi: 10.1007/s00402-023-04977-w.

Статья поступила 13.05.2026; одобрена после рецензирования 22.05.2026; принята к публикации 09.06.2026.

The article was submitted 13.05.2026; approved after reviewing 22.05.2026; accepted for publication 09.06.2026.

Информация об авторах:

Евгений Оркович Перецманас — доктор медицинских наук, руководитель отдела, peretsmanas58@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7140-3200>;

Владимир Сергеевич Зубиков — доктор медицинских наук, профессор, ведущий научный сотрудник, zubikovvladimir@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2211-8400>;

Илья Александрович Герасимов — кандидат медицинских наук, врач — травматолог-ортопед, ilya-1559@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4388-155X>;

Евгений Георгиевич Соколович — доктор медицинских наук, профессор, руководитель отдела, SokolovichEG@nmrc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4794-0588>.

Information about the authors:

Evgenii O. Peretsmanas — Doctor of Medical Sciences, Head of the Scientific Department, peretsmanas58@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7140-3200>;

Vladimir S. Zubikov — Doctor of Medical Sciences, Professor, Leading Researcher, zubikovvladimir@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2211-8400>;

Ilya A. Gerasimov — Candidate of Medical Sciences, Orthopedic Surgeon, ilya-1559@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4388-155X>;

Evgenii G. Sokolovich — Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department, SokolovichEG@nmrc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4794-0588>.

Вклад авторов:

Перецманас Е.О. — концепция и дизайн исследования, анализ и интерпретация результатов исследования, написание и редактирование текста статьи.

Зубиков В.С. — анализ и интерпретация результатов исследования, редактирование текста статьи.

Герасимов И.А. — сбор и обработка данных, редактирование текста статьи.

Соколович Е.Г. — концепция и дизайн исследования, редактирование текста статьи.

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 14.08.2026. Дата выхода 25.08.2026

Формат 60 × 84 1/8. Усл. печ. л. 14.65

Тираж 75 экз. Заказ № 21132. 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