

В Е С Т Н И К
травматологии
и ортопедии
ИМЕНИ Н.Н. ПРИОРОВА
2024 том 31 №3

N.N. Priorov Journal
of Traumatology
and Orthopedics
2024 Volume 31 Issue 3

УЧРЕДИТЕЛЬ:

ФГБУ «НМИЦ ТО им. Н.Н. Приорова»
Минздрава России

Журнал зарегистрирован Федеральной
службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых
коммуникаций (Роскомнадзор),
свидетельство о регистрации СМИ
ПИ № ФС 77 – 76249 от 19 июля 2019 г.

ИЗДАТЕЛЬ

ООО «Эко-Вектор»
Адрес: 191181, г. Санкт-Петербург,
Аптекарский переулочок, д. 3, литера А,
помещение 1Н
E-mail: info@eco-vector.com
WEB: <https://eco-vector.com>

Реклама

Тел.: +7 (968) 545 78 20
E-mail: adv2@eco-vector.com

РЕДАКЦИЯ

Заведующая редакцией
Трухина Диана Аршалуйсовна
E-mail: vto@eco-vector.com
Тел.: +7 (967) 153-70-05

Адрес редакции

127299, г. Москва, ул. Приорова, д. 10

ПОДПИСКА

На сайте журнала:
www.journals.eco-vector.com/0869-8678/

ИНДЕКСАЦИЯ

• РИНЦ (ядро) • SCOPUS • BAK K1 • RSCI
• Dimensions • Crossref • Google Scholar
• Белый список

Оригинал-макет изготовлен
ООО «Эко-Вектор».
Корректор: С.И. Яли
Верстка: Ф.А. Игнащенко
Обложка: Ф.А. Игнащенко

Сдано в набор 26.09.2024.
Подписано в печать 07.10.2024.
Выход в свет 15.10.2024. Формат 60 × 881/8.
Печать офсетная. Печ. л. 22,5. Усл. печ. л. 20,9.
Уч.-изд. л. 12,3. Тираж 500 экз. Заказ 4-9405-1v

Отпечатано в ООО «Типография Фурсова».
196105, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, д. 69.
Цена свободная.

16+

© ООО «Эко-Вектор», 2024

ISSN 0869-8678 (Print)

ISSN 2658-6738 (Online)

Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова

Том 31 | Выпуск 3 | 2024

ЕЖЕКВАРТАЛЬНЫЙ РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНЫЙ
МЕДИЦИНСКИЙ ЖУРНАЛ



Официальный печатный орган Общероссийской
Общественной Организации «Ассоциация
травматологов-ортопедов России» (АТОР)

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Назаренко Антон Герасимович — профессор РАН, д-р мед. наук, директор
ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии
и ортопедии им. Н.Н. Приорова» Минздрава России, Москва, Россия
ORCID iD: 0000-0003-1314-2887

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Ветрилэ Марчел Степанович — канд. мед. наук, ФГБУ «Национальный
медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии
им. Н.Н. Приорова» Минздрава России, Москва, Россия
ORCID iD: 0000-0001-6689-5220

Цыкунов Михаил Борисович — д-р мед. наук, проф., ФГБУ «Национальный
медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии
им. Н.Н. Приорова» Минздрава России, Москва, Россия
ORCID iD: 0000-0002-0994-8602

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Крупаткин Александр Ильич — д-р мед. наук, проф., ФГБУ «Национальный
медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии
им. Н.Н. Приорова» Минздрава России, Москва, Россия
ORCID iD: 0000-0001-5582-5200

ПРЕДЫДУЩИЕ ГЛАВНЫЕ РЕДАКТОРЫ

Главный редактор (1994–1998)

член-корр. РАН

Юлий Георгиевич Шапошников

Главный редактор (1999–2023)

академик РАН

Сергей Павлович Миронов



Редакция не несёт ответственности за содержание рекламных материалов. Точка зрения ав-
торов может не совпадать с мнением редакции. К публикации принимаются только статьи,
подготовленные в соответствии с правилами для авторов. Направляя статью в редакцию, ав-
торы принимают условия договора публичной оферты. С правилами для авторов и договором
публичной оферты можно ознакомиться на сайте: <https://journals.eco-vector.com/0869-8678/>.
Полное или частичное воспроизведение материалов, опубликованных в журнале, допускается
только с письменного разрешения издателя — издательства «Эко-Вектор».

FOUNDER

N.N. Priorov National Medical Research
Center of Traumatology and Orthopedics

PUBLISHER

Eco-Vector

Address: 3 liter A, 1H, Aptekarsky
pereulok, 191181, Saint Petersburg,
Russian Federation

E-mail: info@eco-vector.com

WEB: <https://eco-vector.com>

Adv. department

Phone: +7 (968) 545 78 20

E-mail: adv2@eco-vector.com

EDITORIAL OFFICE

Executive editor

Diana A. Trukhina

E-mail: vto@eco-vector.com

Phone: +7 (967) 153-70-05

Address: 10, Priorova str., 127299, Moscow,
Russian Federation

SUBSCRIPTION

Online via journal's webpage:

www.journals.eco-vector.com/0869-8678/

INDEXATION

- SCOPUS • RSCI • Dimensions • Crossref
- Google Scholar • White list • eLibrary

TYPESET

complete in Eco-Vector

Proofreader: *S.I. Yali*

Layout editor: *Ph. Ignashchenko*

Cover: *Ph. Ignashchenko*

ISSN 0869-8678 (Print)

ISSN 2658-6738 (Online)

N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics

Volume 31 | Issue 3 | 2024

QUARTERLY PEER-REVIEW MEDICAL JOURNAL



The official publication of the Association
of Traumatologists and Orthopedists of Russia
(ATOR)

EDITOR-IN-CHIEF

Anton G. Nazarenko — professor of the Russian Academy of Sciences, MD,
Professor, Head of N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology
and Orthopedics, Moscow, Russia
ORCID iD: 0000-0003-1314-2887

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

Marchel S. Vetrile — MD, N.N. Priorov National Medical Research Center
of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russia
ORCID iD: 0000-0001-6689-5220

Mikhail B. Tsykunov — MD, Professor the Department
"Medical Rehabilitation" at N.N. Priorov National Medical Research Center
of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russia
ORCID iD: 0000-0002-0994-8602

EXECUTIVE SECRETARY

Aleksandr I. Krupatkin — MD, Professor, N.N. Priorov National Medical Research
Center of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russia
ORCID iD: 0000-0001-5582-5200

EDITORS-IN-CHIEF EMERITUS

Editor-in-Chief (1994–1998)

Yuliy G. Shaposhnikov, MD, Dr. Sci.
(Medicine), Professor

Editor-in-Chief (1999–2023)

Sergei P. Mironov, MD, Dr. Sci.
(Medicine), Professor

The editors are not responsible for the content of advertising materials. The point of view of the authors may not coincide with the opinion of the editors. Only articles prepared in accordance with the guidelines are accepted for publication. By sending the article to the editor, the authors accept the terms of the public offer agreement. The guidelines for authors and the public offer agreement can be found on the website: <https://journals.eco-vector.com/0869-8678/>. Full or partial reproduction of materials published in the journal is allowed only with the written permission of the publisher — the Eco-Vector publishing house.



Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова

Том 31 | Выпуск 3 | 2024

ЕЖЕКВАРТАЛЬНЫЙ РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНЫЙ
МЕДИЦИНСКИЙ ЖУРНАЛ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Алиев М.Б.Д. — акад. РАН, д-р мед. наук, проф.
ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, Москва, Россия
ORCID iD: 0000-0003-2706-4138

Базиндурашвили А.Г. — акад. РАН, д-р мед. наук, проф.
ФГБУ «НМИЦ детской травматологии и ортопедии
им. Г.И. Турнера» Минздрава России, Санкт-Петербург, Россия
ORCID iD: 0000-0001-8123-6944

Бодрова Р.А. — д-р мед. наук, доцент
КГМА — филиал ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России,
Казань, Россия
ORCID iD: 0000-0003-3540-0162

Буйлова Т.В. — д-р мед. наук
Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия
ORCID iD: 0000-0003-0282-7207

Виссарионов С.В. — чл.-корр. РАН, д-р мед. наук, проф.
ФГБУ «НМИЦ детской травматологии и ортопедии
им. Г.И. Турнера» Минздрава России, Санкт-Петербург, Россия
ORCID iD: 0000-0003-4235-5048

Голубев И.О. — д-р мед. наук, проф.
ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов»,
Москва, Россия
ORCID iD: 0000-0003-4235-5048

Губин А.В. — д-р мед. наук
Клиника высоких медицинских технологий
им. Н.И. Пирогова Санкт-Петербургского государственного
университета, Санкт-Петербург, Россия
ORCID iD: 0000-0003-3234-8936

Гуща А.О. — д-р мед. наук
ФГБНУ «Научный центр неврологии», Москва, Россия
ORCID iD: 0000-0003-3451-5750

Дубров В.З. — д-р мед. наук, проф.
ФГБОУ ВО «МГУ им. М.В. Ломоносова», Москва, Россия
ORCID iD: 0000-0001-5407-0432

Еськин Н.А. — д-р мед. наук, проф.
ФГБУ «НМИЦ травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова»
Минздрава России, Москва, Россия
ORCID iD: 0000-0003-4738-7348

Загородний Н.В. — чл.-корр. РАН, д-р мед. наук, проф.
ФГБУ «НМИЦ травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова»
Минздрава России, Москва, Россия
ORCID iD: 0000-0002-6736-9772

Иванов П.А. — д-р мед. наук, проф.
ГБУЗ г. Москвы «НИИ скорой помощи
им. Н.В. Склифосовского» ДЗМ, Москва, Россия
ORCID iD: 0000-0002-2954-6985

Каграманов С.В. — д-р мед. наук, проф.
ФГБУ «НМИЦ травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова»
Минздрава России, Москва, Россия
ORCID iD: 0000-0002-8434-1915

Карпенко В.Ю. — д-р мед. наук
ФГБУ «НМИЦ травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова»
Минздрава России, Москва, Россия
ORCID iD: 0000-0002-8280-8163

Коновалов Н.А. — чл.-корр. РАН, д-р мед. наук, проф.
ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н.Н. Бурденко»
Минздрава России, Москва, Россия
ORCID iD: 0000-0003-0824-1848

Крупаткин А.И. — д-р мед. наук, проф.
ФГБУ «НМИЦ травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова»
Минздрава России, Москва, Россия
ORCID iD: 0000-0001-5582-5200

Кулешов А.А. — д-р мед. наук, проф.
ФГБУ «НМИЦ травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова»
Минздрава России, Москва, Россия
ORCID iD: 0000-0002-9526-8274

Лежнев Д.А. — д-р мед. наук, проф.
ФГБОУ ВО «МГМСУ им. А.И. Евдокимова» Минздрава России,
Москва, Россия
ORCID iD: 0000-0002-7163-2553

Мачак Г.А. — д-р мед. наук
ФГБУ «НМИЦ травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова»
Минздрава России, Москва, Россия
ORCID iD: 0000-0002-7163-2553

Михайлова Л.К. — д-р мед. наук, проф.
ФГБУ «НМИЦ травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова»
Минздрава России, Москва, Россия
Scopus Author ID: 7101764310

Морозов А.К. — д-р мед. наук
ФГБУ «НМИЦ травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова»
Минздрава России, Москва, Россия
Scopus Author ID: 57209689451

Мурылев В.Ю. — д-р мед. наук, проф.
ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный
медицинский университет им. И.М. Сеченова» Минздрава
России (Сеченовский университет), Москва, Россия
ORCID iD: 0000-0001-5753-8926

Мушкин А.Ю. — д-р мед. наук, проф.
ФГБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский
институт физиопульмонологии» Минздрава России,
Санкт-Петербург, Россия
ORCID iD: 0000-0002-1342-3278

Орлецкий А.К. — д-р мед. наук, проф.
ФГБУ «НМИЦ травматологии и ортопедии
им. Н.Н. Приорова» Минздрава России, Москва, Россия
Scopus Author ID: 25623584100

Очкуренко А.А. — д-р мед. наук, проф.
ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России, Москва, Россия
ORCID iD: 0000-0002-1078-9725

Попков Д.А. — д-р мед. наук, проф., чл.-корр. Французской
академии медицинских наук
ФГБУ «НМИЦ травматологии и ортопедии
им. академика Г.А. Илизарова» Минздрава России,
Курган, Россия
ORCID iD: 0000-0002-8996-867X

Родионова С.С. — д-р мед. наук, проф.
ФГБУ «НМИЦ травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова»
Минздрава России, Москва, Россия
ORCID iD: 0000-0002-2726-8758

Рябых С.О. — д-р мед. наук.
Научно-исследовательский клинический институт
педиатрии и детской хирургии имени академика
Ю.Е. Вельтищева ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова
Минздрава России, Москва, Россия
ORCID iD: 0000-0002-8293-0521

Салтыкова В.Г. — д-р мед. наук, проф.
ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России, Москва, Россия
ORCID iD: 0000-0003-3879-6457

Сергеев Н.И. — д-р мед. наук, проф.
ФГБУ «РНЦПР» Минздрава России, Москва, Россия
ORCID iD: 0000-0003-4147-1928

Снетков А.И. — д-р мед. наук, проф.
ФГБУ «НМИЦ травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова»
Минздрава России, Москва, Россия
ORCID iD: 0000-0002-2435-6920

Солод З.И. — д-р мед. наук, проф.
ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России, Москва, Россия
Scopus Author ID: 57192003306

Тихилов Р.М. — д-р мед. наук, проф.
ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт
травматологии и ортопедии им. Р.Р. Вредена» Минздрава
России, Санкт-Петербург, Россия
ORCID iD: 0000-0003-0733-2414

Хубутия М.Ш. — акад. РАН, д-р мед. наук, проф.
ГБУЗ «Научно-исследовательский институт скорой помощи
им. Н.В. Склифосовского» ДЗМ, Москва, Россия
ORCID iD: 0000-0002-0746-1884

Черкашин А. — д-р мед. наук
Техасский детский госпиталь, Даллас, США

Хосни Г.А.
Университет Бенха, Бенха, Египет

Иванов М. — д-р мед. наук
Образовательные больницы Шеффилда Фонда NHS,
Великобритания
ORCID iD: 0000-0003-3016-8931

Кириенко А.
Клинический институт, Рощано, Италия
Scopus Author ID: 7007011714

Чаудхари М.
Госпиталь Чодри, Акола, Индия
ORCID iD: 0000-0002-6721-8843

Миткович М.Б. — проф.
Нишский университет, Ниш, Сербия
ORCID iD: 0000-0002-2800-9790

Мадан С.С. — д-р мед. наук
Детский госпиталь, Шеффилд, Великобритания
ORCID iD: 0000-0003-2604-3810

Глэд В. — д-р мед. наук
Университет здравоохранения Сан-Антонио,
Сан-Антонио, США

Кавагути Е.
Университет Тоямы, Япония
ORCID iD: 0000-0001-7710-6012

N.N. Priorov

Journal of Traumatology and Orthopedics

Volume 31 | Issue 3 | 2024

QUARTERLY PEER-REVIEW MEDICAL JOURNAL

EDITORIAL BOARD

Aliev M.B.D. — M.D., Professor, academician of the Russian Academy of Sciences, National Medical Research Center for Radiology, Moscow, Russia.
ORCID iD: 0000-0003-2706-4138

Baindurashvili A.G. — corresponding member of RAS, MD, Professor, Research children's orthopedic Institute G.I. Turner, Saint-Petersburg, Russia
ORCID iD: 0000-0001-8123-6944

Bodrova R.A. — MD, Professor, KSMA — Branch Campus of the FSBEI FPE RMACPE MOH Russia, Kazan, Russia
ORCID iD: 0000-0003-3540-0162

Buylova T.V. — MD, N.I. Lobachevsky National Research Nizhny Novgorod State University (UNN), Nizhny Novgorod, Russia
ORCID iD: 0000-0003-0282-7207

Viissarionov S.V. — corresponding member of RAS, MD, Professor, G.I. Turner National Medical Research Center of Pediatric Traumatology and Orthopedics, St. Petersburg, Russia
ORCID iD: 0000-0003-4235-5048

Golubev I.O. — MD, Professor, RUDN University, Moscow, Russia
ORCID iD: 0000-0003-4235-5048

Gubin A.V. — MD, Dr. Sci. (Medicine), Hospital of Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia
ORCID iD: 0000-0003-3234-8936

Gushcha A.O. — Research Center of Neurology, Moscow, Russia
ORCID iD: 0000-0003-3451-5750

Dubrov V.E. — MD, Professor, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
ORCID iD: 0000-0001-5407-0432

Eskin N.A. — MD, Professor, N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russia
ORCID iD: 0000-0003-4738-7348

Zagorodny N.V. — corresponding member of RAS, Professor, MD, N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russia
ORCID iD: 0000-0002-6736-9772

Ivanov P.A. — MD, docent, Scientific Research Institute for Emergency Medicine named after N.V. Sklifosovsky of the Moscow City Health Department, Moscow, Russia
ORCID iD: 0000-0002-2954-6985

Kagramanov S.V. — MD, Professor, N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russia
ORCID iD: 0000-0002-8434-1915

Karpenko V.Y. — MD, Professor, N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russia
ORCID iD: 0000-0002-8280-8163

Konovalov N.A. — MD, Professor, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Moscow, Russia
ORCID iD: 0000-0003-0824-1848

Krupatkin A.I. — MD, Professor, N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russia
ORCID iD: 0000-0001-5582-5200

Kuleshov A.A. — MD, Professor, N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russia
ORCID iD: 0000-0002-9526-8274

Lezhnev D.A. — MD, Professor, Moscow State University of Medicine and Dentistry named after A.I. Evdokimov, Moscow, Russia
ORCID iD: 0000-0002-7163-2553

Machak G.N. — MD, Professor, N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russia
ORCID iD: 0000-0002-7163-2553

Mikhailova L.K. — MD, Professor, N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russia
Scopus Author ID: 7101764310

Morozov A.K. — MD, N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russia
Scopus Author ID: 57209689451

Murylev V.Yu. — MD, Professor, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russia
ORCID iD: 0000-0001-5753-8926

Mushkin A.Yu. — MD, Professor, St. Petersburg National Medical Research Institute for Phthisiopulmonology, St. Petersburg, Russia
ORCID iD: 0000-0002-1342-3278

Orletskiy A.K. — MD, Professor, N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russia
Scopus Author ID: 25623584100

Ochkurenko A.A. — MD, Professor, Russian Medical Academy of Continuing Professional Education, Moscow, Russia
ORCID iD: 0000-0002-1078-9725

Popkov D.A. — MD, Professor, corresponding member of French Academy of Medicine, G.A. Ilizarov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Kurgan, Russia
ORCID iD: 0000-0002-8996-867X

Rodionova S.S. — MD, Professor, N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russia
ORCID iD: 0000-0002-2726-8758

Ryabykh S.O. — MD, Dr. Sci. (Medicine), Veltischev Research and Clinical Institute for Pediatrics and Pediatric Surgery of the Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia
ORCID iD: 0000-0002-8293-0521

Saltykova V.G. — MD, Professor, Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, Moscow, Russia
ORCID iD: 0000-0003-3879-6457

Sergeev N.I. — MD, Professor, Russian Scientific Center of Roentgenoradiology (RSCRR), Moscow, Russia
ORCID iD: 0000-0003-4147-1928

Snetkov A.I. — MD, Professor, N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russia
ORCID iD: 0000-0002-2435-6920

Solod E.I. — MD, Professor, Russian Medical Academy of Continuing Professional Education, Moscow, Russia
Scopus Author ID: 57192003306

Solod E.I. — MD, Professor, Russian Medical Academy of Continuing Professional Education, Moscow, Russia
ORCID iD: 0000-0003-0733-2414

Khubutiya M.S. — MD, Professor, academician of the Russian Academy of Sciences, Scientific Research Institute for Emergency Medicine named after N.V. Sklifosovsky of the Moscow City Health Department, Moscow, Russia
ORCID iD: 0000-0002-0746-1884

Cherkashin A. — MD, Texas Scottish Rite Hospital for Children, Dallas, USA

Hosny G.A. — Benha University, Benha, Egypt

Ivanov M. — MD, PhD, MSc, FRCS, Sheffield Teaching Hospitals NHS Foundation Trust, Sheffield, United Kingdom
ORCID iD: 0000-0003-3016-8931

Kirienko A. — Clinical Institute, Rozzano, Italy
Scopus Author ID: 7007011714

Chaudhary M. — Chaudhary Trust Hospital, Akola, India
ORCID iD: 0000-0002-6721-8843

Mitkovic M.B. — University of Nis, Nis, Serbia
ORCID iD: 0000-0002-2800-9790

Madan S.S. — MBBS, FRCS, MCh, MBA, FlntLM, Sheffield Children's Hospital, Sheffield, United Kingdom
ORCID iD: 0000-0003-2604-3810

Glad V. — PhD, UT Health San Antonio, San Antonio, USA

Kawaguchi Y. — Toyama University, Toyama, Japan
ORCID iD: 0000-0001-7710-6012

СОДЕРЖАНИЕ

ОРИГИНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

А.И. Сосин, О.В. Кожевников, И.В. Грибова, С.Э. Кралина

Оперативное лечение мобильной плоско-вальгусной деформации стоп у детей старшего школьного возраста с использованием остеотомии пяточной кости на основе предоперационного компьютерного моделирования: ретроспективное когортное исследование 283

А.Г. Назаренко, А.И. Крупаткин, А.А. Кулешов, И.М. Милица, М.С. Ветрилэ, И.Н. Лисянский, С.Н. Макаров

Функциональная оценка тонких немиелинизированных нервных волокон у пациентов с кифосколиозом, ассоциированным с компрессией спинного мозга 295

А. Виджай, Х. Пандиан, П. Элангован, А.К. Виджаякумари, Г. Анантхараман, Ш.М. Таджудин, Р. Рагхул

Принятие решения об однокомпонентном эндопротезировании коленного сустава с использованием рентгенологических параметров в южноазиатской популяции 305

А.В. Петриченко, Е.А. Иванова, И.А. Шавырин, Е.А. Букреева, Б.В. Курдюков, К.Ф. Савлаев, А.А. Очкуренко, Н.М. Иванова

Применение ортезов в комплексной реабилитации детей, перенёвших онкологическое эндопротезирование 315

Ю.О. Новиков, А.А. Богачёв, М.Б. Цыкунов

Дифференциальная диагностика мышечно-скелетных болей при спондилоартрозе и остеоартрозе с использованием магнитно-резонансной томографии 325

Г.Н. Берченко, Н.В. Федосова, М.Г. Кочан, Д.В. Машошин

Разработка модели нейронной сети для выявления патологических митозов в гистологических препаратах 337

А.А. Рождественский, Г.Г. Дзюба, Д.А. Полонянкин

Оценка элементного состава и рентгенологической плотности костной ткани при замещении метафизарного дефекта биокерамическими фосфат-силикатными гранулами (экспериментальное исследование) 351

Д.В. Смоленцев, Ю.С. Лукина, Л.Л. Бионишев-Абрамов, Н.Б. Сережникова, М.Г. Васильев

Сравнительный анализ эффективности протоколов очистки костного матрикса 367

КЛИНИЧЕСКИЕ СЛУЧАИ

П.С. Бардюгов, Е.В. Артёмова, М.В. Паршиков, Н.В. Ярыгин

Особенности формирования костного регенерата и метаболизм маркеров костеобразования у пациентки с сахарным диабетом 1 типа и диабетической нейроостеоартропатией (стопа Шарко) 381

М.С. Ветрилэ, А.А. Кулешов, С.Н. Макаров, И.Н. Лисянский, В.Р. Захарин, А.И. Кокорев, Н.А. Аганесов

Оперативное лечение двустороннего спондилолиза L5 позвонка у профессиональной гимнастки с использованием индивидуальной конструкции 395

В.В. Чеботарёв, А.А. Очкуренко, Г.В. Коробушкин

Коллапс костного аутоотрансплантата. Клиническое наблюдение осложнения и одного из вариантов решения данной проблемы 407

ОБЗОРЫ

А.Г. Назаренко, А.А. Кулешов, И.М. Милица, М.С. Ветрилэ, И.Н. Лисянский, С.Н. Макаров

Кифосколиотические деформации позвоночника, ассоциированные с высоким риском развития неврологического дефицита. Обзор литературы 415

Д.А. Бессонов, М.Е. Бурцев, А.В. Фролов, М.Е. Саутин, Б.М. Газимиева, И.А. Васильев, А.В. Королев

Переломы дистального метаэпифиза лучевой кости: обзор литературы 427

ЮБИЛЕИ

С.В. Брагина, А.В. Андреева, А.В. Ивенин, И.В. Яшин, Г.О. Самбуров, С.С. Родионова

Северная школа травматологии и ортопедии: к 125-летию проф. В.Ф. Цель 441

Поздравляем С.А. Джумабекова с 60-летием! 449

НЕКРОЛОГ

Памяти Анатолия Николаевича Шальнева 453

CONTENTS

ORIGINAL STUDY ARTICLES

Anton I. Sosin, Oleg V. Kozhevnikov, Inna V. Gribova, Svetlana E. Kralina

Surgical treatment of mobile planovalgus deformation of feet using calcaneal osteotomy based on preoperative computer modeling in adolescent: a retrospective cohort study 283

Anton G. Nazarenko, Alexander I. Krupatkin, Alexander A. Kuleshov, Igor M. Militsa, Marchel S. Vetrile, Igor N. Lisyansky, Sergey N. Makarov

Neuro-microcirculatory interrelationships in patients with kyphoscoliosis associated with neurological deficits 295

Aswin Vijay, Haemanath Pandian, Pradeep Elangovan, Arunkumar K. Vijayakumari, Ganesh Anantharaman, Sheik M. Tajudeen, Rajan Raghul

Decision-making in unicompartmental knee arthroplasty using radiological parameters in South Asian populations 305

Anna V. Petrichenko, Evgeniya A. Ivanova, Ilya A. Shavyrin, Elena A. Bukreeva, Boris V. Kurdyukov, Kazbek F. Savlaev, Aleksandr A. Ochkurenko, Nadezhda M. Ivanova

Use of orthoses in complex rehabilitation of children that have underwent oncological arthroplasty. 315

Yuriy O. Novikov, Artem A. Bogachev, Mikhail B. Tsykunov

Differential diagnostics of musculoskeletal pain in spondyloarthrosis and osteoarthritis using magnetic resonance imaging. 325

Gennadiy N. Berchenko, Nina V. Fedosova, Mikhail G. Kochan, Dmitriy V. Mashoshin

Neural network model development for detecting atypical mitoses in histological slides 337

Andrey A. Rozhdestvenskiy, German G. Dzuba, Denis A. Polonyankin

Evaluation of the elemental composition and radiological density of bone tissue when replacing a metaphyseal defect with bioceramic phosphate-silicate granules (experimental study). 351

Dmitriy V. Smolentsev, Yulia S. Lukina, Leonid L. Bionyshev-Abramov, Natalya B. Serezhnikova, Maksim G. Vasiliev

Comparative analysis of the effectiveness of bone matrix purification protocols 367

CLINICAL CASES

Petr S. Bardyugov, Ekaterina V. Artemova, Mikhail V. Parshikov, Nikolay V. Yarygin

Features of the formation of bone regenerate and metabolism of bone formation markers in a patient with type 1 diabetes mellitus and diabetic neuroosteoarthropathy (Charcot foot). 381

Marchel S. Vetrile, Aleksandr A. Kuleshov, Sergey N. Makarov, Igor N. Lisyansky, Vitaliy R. Zakharin, Alexey I. Kokorev, Nikolay A. Aganesov

Surgical treatment of L5 spondylolysis in an athlete using custom-made implant. 395

Vitaliy V. Chebotarev, Aleksandr A. Ochkurenko, Gleb V. Korobushkin

Bone autograft collapse. Clinical case of the complication and clinical case of the solutions to this problem. 407

REVIEWS

Anton G. Nazarenko, Alexander A. Kuleshov, Igor M. Militsa, Marchel S. Vetrile, Igor N. Lisyansky, Sergey N. Makarov

Kyphoscoliotic spinal deformities associated with high risk of developing neurological deficits. Literature review 415

Dmitrii A. Bessonov, Mikhail E. Burtsev, Alexandr V. Frolov, Maksim E. Sautin, Bella M. Gazimieva, Ivan A. Vasilev, Andrey V. Korolev

Distal radius fracture: review. 427

ANNIVERSARY

Svetlana V. Bragina, Anna V. Andreeva, Andrey V. Ivenin, Ivan V. Yashin, Gleb O. Samburov, Svetlana S. Rodionova

Northern school of traumatology and orthopedics: to the 125th anniversary of prof. V.F. Tsel 441

Congratulations to Sabyrbek A. Jumabekov on his 60th anniversary!. 449

OBITUARY

In memory of Anatoly N. Shalnev 453

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto629169>

Оперативное лечение мобильной плоско-вальгусной деформации стоп у детей старшего школьного возраста с использованием остеотомии пяточной кости на основе предоперационного компьютерного моделирования: ретроспективное когортное исследование

А.И. Сосин, О.В. Кожевников, И.В. Грибова, С.Э. Кралина

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

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Одной из признанных хирургических методик лечения плоско-вальгусной деформации стопы у детей старше 12 лет, позволяющей одновременно выполнить многоплоскостную коррекцию, является остеотомия пяточной кости по Эвансу. Актуальным вопросом до настоящего времени остаётся предоперационное планирование параметров сформированного диастаза с целью уменьшения количества случаев гипо- и гиперкоррекции деформации.

Цель. Оценить результаты остеотомии пяточной кости по Эвансу с использованием разработанного способа предоперационного планирования и фиксации индивидуальной Н-образной реконструктивной пластиной.

Материалы и методы. В данное исследование были включены 64 ребёнка в возрасте 12–17 лет с симптоматической плоско-вальгусной деформацией стоп, которые были поделены на две группы: в основной группе производили предоперационное планирование по разработанному методу, в контрольной применялся исключительно интраоперационный контроль коррекции. Для исследования эффективности разработанного метода использовали динамическую оценку рентгенометрических показателей и результатов опросника AOFAS до и после операции. Также учитывали изменение показателей групп по Foot Posture Index 6 и подометрическим индексам Chippaux-Smirak и Stasheli.

Результаты. В основной группе при сравнении с контрольной отмечено сокращение периода отёчности после операции, а также сроков начала полноценной опоры на конечность, значительное снижение количества случаев неполной коррекции. При изучении групп по шкале Foot Posture Index 6 и подометрическим индексам отмечена схожая динамика показателей.

Заключение. Применение разработанного способа предоперационного планирования при операции Эванса показало свою эффективность в лечении мобильной плоско-вальгусной деформации стоп у детей старшего школьного возраста.

Ключевые слова: мобильное плоскостопие; плоско-вальгусная деформация стоп; остеотомия по Эвансу; подростковый возраст; предоперационное планирование.

Как цитировать:

Сосин А.И., Кожевников О.В., Грибова И.В., Кралина С.Э. Оперативное лечение мобильной плоско-вальгусной деформации стоп у детей старшего школьного возраста с использованием остеотомии пяточной кости на основе предоперационного компьютерного моделирования: ретроспективное когортное исследование // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2024. Т. 31, № 3. С. 283–294. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto629169>

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto629169>

Surgical treatment of mobile planovalgus deformation of feet using calcaneal osteotomy based on preoperative computer modeling in adolescent: a retrospective cohort study

Anton I. Sosin, Oleg V. Kozhevnikov, Inna V. Gribova, Svetlana E. Kralina

N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Evans calcaneal osteotomy is one of the recognized surgical techniques for the treatment of flat-valgus foot deformity in children over 12 years of age, which allows simultaneous multiplanar correction. Preoperative planning of the formed diastasis parameters to reduce the number of cases of hypo- and hypercorrection remains an urgent issue.

AIM: To evaluate the results of Evans calcaneal osteotomy using the developed method of preoperative planning and fixation with the individual H-shaped reconstructive plate.

MATERIALS AND METHODS: This study included 64 children aged 12–17 years with symptomatic planovalgus deformity, who were divided into two groups: in the main group, preoperative planning was used according to the developed method; in the control group for intraoperative control of correction was used only fluoroscopy and visual assessment. To study the effectiveness of the developed method, we used dynamic assessment of radiometric parameters and AOFAS questionnaire results before and after surgery. We also took into account the changes in the Foot Posture Index 6 and the Chippaux-Smirak and Stasheli podometric indices.

RESULTS: In comparison with the control group, the main group showed a reduction in the swelling period after surgery, as well as the timing of the onset of full limb support, and a significant decrease in the incomplete correction. Similar dynamics was observed when studying the groups according to the Foot Posture Index 6 scale and podometric indices.

CONCLUSION: The use of the developed method of preoperative planning during the Evans operation has shown its effectiveness for the treatment of flexible flatfoot deformity of the feet in adolescence.

Keywords: flexible flatfoot; planovalgus deformity; Evans calcaneal osteotomy; adolescence; preoperative planning.

To cite this article:

Sosin AI, Kozhevnikov OV, Gribova IV, Kralina SE. Surgical treatment of mobile planovalgus deformation of feet using calcaneal osteotomy based on preoperative computer modeling in adolescent: a retrospective cohort study. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2024;31(3):283–294. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto629169>

ОБОСНОВАНИЕ

Статическая мобильная плоско-вальгусная деформация стоп — одна из наиболее часто встречающихся ортопедических патологий у детей всех возрастов. Ведущими клиническими проявлениями, по которым оценивается степень тяжести деформации и определяется тактика лечения, являются снижение высоты продольного свода и угол вальгусного отклонения заднего отдела стопы при вертикальной нагрузке [1].

По данным ряда научных исследований [2, 3], у детей дошкольного возраста частота встречаемости мобильного плоскостопия, ассоциированного с вальгусной установкой заднего отдела, колеблется от 24 до 54%. В подавляющем большинстве случаев выявляется асимптоматическая форма: деформация не вызывает жалоб и не влияет на физическую активность ребёнка. В дальнейшем по мере роста ребёнка отмечается общая тенденция к уменьшению распространённости плоскостопия с одновременным увеличением части пациентов с симптоматической формой патологии. Так, в группе лиц старшего школьного возраста (12–18 лет) мобильная плоская стопа наблюдается в среднем у 15% детей, среди которых на долю II и III степени тяжести приходится до 70% [4, 5]. Превалирование клинически значимых форм у данной группы обуславливает позицию многих авторов о необходимости активной тактики лечения.

Общепринятыми показаниями к оперативному лечению симптоматической мобильной плоско-вальгусной деформации стоп являются неэффективность консервативного лечения и сохранение болевого синдрома [6]. Одной из признанных хирургических методик лечения плоско-вальгусной деформации стопы, позволяющей одномоментно выполнить многоплоскостную коррекцию, является остеотомия пяточной кости по Эвансу. Данное вмешательство даёт возможность устранить смещение таранной кости и наружную девиацию переднего отдела, а также медиализировать положение бугра пяточной кости [7].

Данная операция, описанная в 1975 году [8], заключается в удлиняющей остеотомии на уровне переднего конца пяточной кости по плоскости, параллельной пяточно-кубовидному суставу, и на 1,5 см позади него (по линии, проходящей между передней и средней фасетками подтаранного сустава) [9]. В дальнейшем оригинальная методика неоднократно изменялась. Так, в 1995 году V.S. Mosca и соавт. модифицировали методику, предложив формировать диастаз трапециевидной формы [10]. Другие изменения касались направления плоскости остеотомии, формы сформированного диастаза, использования различных ауто- или аллотрансплантатов, а также применения синтетических материалов (пористый титан) [11–13].

Актуальным вопросом до настоящего времени остаётся предоперационное планирование параметров сформированного диастаза. Размеры диастаза определяют

по визуальной коррекции отведения переднего отдела стопы или по интраоперационной флюороскопии в подошвенной проекции. Данный метод ввиду невозможности выполнения полноценной нагрузочной пробы является неточным, что в итоге приводит к нерегулярным результатам у разных хирургов [14].

В 2019 году сотрудниками отделения детской ортопедии НМИЦ ТО им. Н.Н. Приорова был получен патент на индивидуальную Н-образную реконструктивную пластину из титана [15], которая благодаря своим характеристикам смогла эффективно решить проблему стабильной фиксации фрагментов пяточной кости и костного трансплантата. Данная пластина изготавливается по индивидуальным параметрам, полученным на этапе предоперационной подготовки, по разработанному методу компьютерного моделирования.

Цель исследования — оценить результаты остеотомии пяточной кости по Эвансу с использованием разработанного способа предоперационного планирования и фиксации индивидуальной Н-образной реконструктивной пластины.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Проведено когортное контролируемое ретроспективное исследование.

Критерии соответствия

Критерии включения. В данное исследование были включены пациенты в возрасте от 12 до 17 лет, проходившие оперативное лечение плоско-вальгусной деформации стоп по методике Эванса в условиях 10-го отделения НМИЦ ТО им. Н.Н. Приорова с 2017 по 2023 год.

Критерии исключения:

- отсутствие в анамнезе стойких жалоб на боль и утомляемость в стопах при обычной нагрузке;
- указание на ригидность хотя бы одного из компонентов деформации (супинационная установка переднего отдела, подвывих в таранно-ладьевидном суставе, вальгусное положение пяточной кости);
- наличие таранно-пяточных и пяточно-ладьевидных коалиций;
- неврологические нарушения: приобретённые клинически значимые моторно-сенсорные нейропатии, связанные с движением нижних конечностей, наследованные нейро- и миопатии;
- несоблюдение протокола исследования (отсутствие прохождения анкетирования по русифицированным версиям опросника AOFAS, оценки установки стопы по критериям Foot Posture Index 6 (FPI-6) и выполнения плантоскопии до и после оперативного лечения в установленные сроки).

В основную группу были включены пациенты, которым выполнялись предоперационное планирование на виртуальных трёхмерных моделях и фиксация фрагментов пяточной кости индивидуальной Н-образной пластиной. Остальные пациенты, с интраоперационной оценкой коррекции без предоперационного планирования, были включены в контрольную группу.

Методы оценки целевых показателей

Все пациенты, включённые в исследование, на этапе сбора анамнеза прошли анкетирование по русифицированным опросникам AOFAS.

Клиническое обследование

Клиническое обследование пациентов, оценка установки стопы при вертикальной нагрузке, без неё и при ходьбе описывались по общепринятому принципу ортопедического осмотра [6]: оценивались показатели взаиморасположения отделов стопы, мобильность установки стопы, в том числе ригидность супинационной установки переднего отдела, положение заднего отдела при подъёме на полупальцы, нарушения торсии нижних конечностей и общий паттерн ходьбы. Данные клинического осмотра классифицировали по критериям FPI-6 — стандартизированной балльной системы оценки положения стопы по взаиморасположению переднего, среднего и заднего отделов [1, 16]. Таким образом, в регистрационной карте исследуемых учитывались не только качественные показатели деформации (наличие компонентов деформации, высота продольного свода при нагрузке и без неё и др.), но и количественные характеристики: сумма баллов по каждому из 6 тестов позволяет достоверно классифицировать установку стопы как пронированную, супинированную или нейтральную и использовать эти данные для динамического наблюдения.

Инструментальное обследование

Инструментальное обследование пациентов включало рентгенографию стоп в прямой и боковой проекции в нагрузке с определением репрезентативных рентгенометрических показателей (степень плоскостопия по Богданову, нарушение угла Меагу, угла инклинации пяточной кости на боковой проекции и угла таранно-пяточной дивергенции в прямой проекции (угол Kite)), компьютерную томографию нижних конечностей и плантоскопию по стандартному протоколу [16, 17].

Компьютерную томографию нижних конечностей проводили с целью более детальной оценки структурных изменений и деформаций костей стопы, соотношений структур подтаранного и Шопарова суставов, оценки степени дислокации таранной кости и исключения тарзальных коалиций, а также создания трёхмерной модели деформированной стопы для предоперационного планирования. Результаты плантоскопии оценивали по индексам Chiriaux-Smirak (CSI) и Stasheli (SI) [16].

Предоперационное планирование

Разработанный способ предоперационного планирования [18] на трёхмерных моделях заключается в следующем: в компьютерной программе для 3D-моделирования на полученной трёхмерной модели стопы пациента определяется плоскость хирургической коррекции деформации перпендикулярно плоскости пяточно-кубовидного сустава (рис. 1а), в данной плоскости определяется продольная ось заднего отдела стопы и касательная линия к наружному краю кубовидной кости, на пересечении которых определяется угол отведения кубовидной кости (рис. 1б), составляющий в норме от 0 до 5° [19], затем на созданной трёхмерной модели перпендикулярно плоскости хирургической коррекции, на расстоянии 1,5 см от плоскости пяточно-кубовидного сустава, выполняется

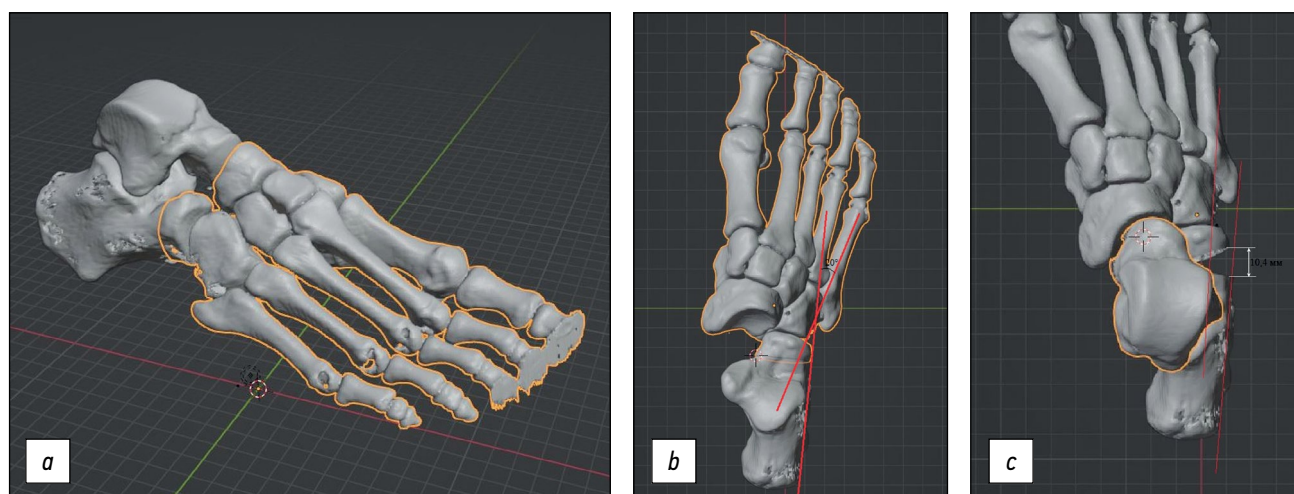


Рис. 1. Этапы моделирования операции на стопе: *a* — подготовка трёхмерной модели, выбор уровня остеотомии, *b* — определение угла отведения кубовидной кости, *c* — формирование диастаза.

Fig. 1. Stages of preoperative modeling: *a* — preparation of a three-dimensional model, choice of osteotomy level, *b* — determination of the cuboid abduction angle, *c* — diastasis modeling.

виртуальная остеотомия пяточной кости и относительно медиального кортикального слоя пяточной кости как оси моделируется формирование открытого клина до восстановления референтных значений угла (рис. 1с). По полученным параметрам открытого клина с использованием расстояния между наружными кортикалями фрагментов и его внутреннего объема рассчитывается размер индивидуальной фиксирующей Н-образной реконструктивной пластины и объем костного трансплантата, необходимого для заполнения образовавшегося дефекта.

Техника хирургического вмешательства

Все пациенты были прооперированы двумя хирургами, имеющими опыт в операциях по профилю стопы более 10 лет каждый. В соответствии с методикой операции Эванса применяли послойный доступ к телу пяточной кости по наружной поверхности стопы. Параллельно пяточно-кубовидному суставу и отступив от него кзади на 1,5 см, выполняли осцилляторной пилой поперечную остеотомию пяточной кости между медиальной и передней суставными фасетками пяточной кости. В основной группе медиальный кортикальный слой пяточной кости сохранялся интактным и формировался клиновидный диастаз. В контрольной группе использовали классическую технику с полной поперечной остеотомией и формированием трапециевидного диастаза. В область остеотомии устанавливали расширитель, при помощи которого раздвигали фрагменты кости.

В основной группе, сформированной по известным параметрам, диастаз фиксировали индивидуальной Н-образной пластиной и плотно заполняли костно-пластическим материалом. В контрольной группе размер диастаза контролировался интраоперационно по визуальной оценке конфигурации стопы, положении пяточной кости во фронтальной проекции и результатам ЭОП-контроля. Полученный диастаз в контрольной группе фиксировался стандартной наkostной пластиной.

Затем рану послойно ушивали и накладывали гипсовую повязку от пястно-фаланговых суставов до верхней трети голени на 8 недель. В случае выполнения ахиллотомии гипсовую повязку дополняли съёмной модульной задней лонгетой от средней трети голени до верхней трети бедра на срок 4 недели (далее — снятие лонгеты и начало разработки движений в коленном суставе).

Ходьба с полноценной нагрузкой на прооперированную стопу разрешалась после выявления на контрольных рентгенограммах признаков удовлетворительной перестройки трансплантата в области остеотомии.

Послеоперационный период

После операции все пациенты соблюдали ортопедический режим с возвышенным положением прооперированной конечности в течение первой недели (сроком от 3 до 7 дней). Контроль динамики отёка стоп проводили

по клиническим признакам. По уменьшении отёчности пациентам после совместной консультации с врачом-реабилитологом назначали индивидуальный курс вертикализации и разработки движений.

После выписки из стационара всех пациентов наблюдали в амбулаторном режиме в установленные сроки. После снятия гипсовой повязки и восстановления паттерна ходьбы, а затем через 6 месяцев и 1 год после оперативного лечения пациенты проходили повторное анкетирование, ортопедический осмотр с оценкой по FPI-6, плантоскопию и рентгенографию прооперированной стопы в прямой и боковой проекциях с нагрузкой.

Статистический анализ

Статистическая обработка данных исследования проводилась с применением программ StatSoft Statistica 10 и Microsoft Excel 2016. Использовался 95% доверительный интервал.

Этическая экспертиза

Исследование одобрено этическим комитетом ФГБУ «НМИЦ ТО им. Н.Н. Приорова» Минздрава России. Авторы в письменной форме получили согласие пациентов (у лиц до 15 лет — согласие их законных представителей) на участие в исследовании.

РЕЗУЛЬТАТЫ

После отбора историй болезни по критериям включения и исключения в когорту исследования были отобраны 64 пациента с плоско-вальгусной деформацией стоп, из них 52 мальчика (81,25%) и 12 девочек (18,75%). Медиана возраста составила 13 лет.

Всем пациентам выполнялось оперативное лечение в объёме остеотомии пяточной кости по Эвансу. 32 пациентам (51 стопа) на этапе предоперационной подготовки выполняли планирование на трёхмерных моделях по разработанному методу, на основании которого заранее подбирали размер индивидуальной пластины (основная группа). Остальные пациенты были включены в контрольную группу. Статистически обе группы сопоставимы по полу, возрасту, результатам оценки по шкале FPI-6 и по рентгенометрическим показателям до операции.

Во время операции отмечались случаи тыльного смещения дистального фрагмента пяточной кости при формировании диастаза. При возникновении данного осложнения выполнялись дополнительная манипуляция фрагментом и его временная фиксация спицей. В контрольной группе данное смещение отмечено у 11 пациентов, в основной группе — только у 4.

На рентгенограммах пациентов на вторые сутки после операции в контрольной группе у 3 детей наблюдали дефекты заполнения диастаза. У всех пациентов основной группы было отмечено полноценное заполнение сформированного диастаза (табл. 1).

Таблица 1. Частота осложнений в раннем послеоперационном периоде**Table 1.** The frequency of complications in the early postoperative period

Группа	Дефект заполнения диастаза		Тыльное смещение дистального фрагмента пяточной кости		Гиперкоррекция деформации		Случаи реакции болезни трансплантата	
	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%
Основная (выполнялось предоперационное планирование), $n=32$	—	0	4	12,5	—	0	2	6,25
Контрольная (интраоперационный контроль коррекции), $n=32$	3	9,37	11	34,37	4	12,5	1	3,12

В раннем послеоперационном периоде (со дня операции до дня выписки) в обеих группах в среднем заживление послеоперационной раны происходило в стандартные сроки 12–16 дней. По сравнению с контрольной в основной группе пациентов было выявлено статистически значимое сокращение сроков сохранения отёчности стопы (с 12 (± 3) до 8 (± 2) дней), что закономерно приводило к более ранним срокам начала вертикализации. В связи с невозможностью выполнения полноценной нагрузочной пробы оценку рентгенограмм в раннем послеоперационном периоде выполняли без нагрузки с целью контроля положения внутренних фиксаторов и трансплантата. У всех пациентов основной группы было отмечено полноценное заполнение сформированного диастаза.

Сроки удовлетворительной консолидации фрагментов пяточной кости, позволяющей начать вертикальную нагрузку, в основной и контрольной группе значительно различались. В контрольной группе при фиксации области остеотомии спицами средние сроки консолидации составляли 2,7 месяца ($\pm 0,16$). В основной группе — 2,4 месяца ($\pm 0,14$).

По результатам клинического осмотра в период начала полноценной опоры на стопу в контрольной группе было выявлено 4 случая гиперкоррекции: в положении стоя у пациентов была отмечена супинационно-аддукционная установка переднего отдела. Установка подавалась одномоментной ручной коррекции, однако при ходьбе рецидивировала. Установка не была антагонической — жалоб на боли пациенты не предъявляли. Пациентам назначался курс массажа и лечебной физкультуры с целью коррекции установки. В динамике через 1 год у 3 пациентов установка скорректировалась. В основной группе пациентов случаев гиперкоррекций не выявлено (табл. 1).

На сроке 6 месяцев после операции у всех больных было отмечено уменьшение степени деформации. В основной группе наблюдалось восстановление угла продольного свода до нормы в 89% случаев (в остальных случаях — до I степени по Богданову). В контрольной группе данный показатель достигал 72% (в остальных случаях — I и II степени по Богданову).

Несмотря на разную степень коррекции, все пациенты указывали на уменьшение болей и увеличение толерантности к физической нагрузке, что впоследствии сохранялось через 6 месяцев и 1 год после операции.

По результатам проводимого анкетирования по опроснику AOFAS через 6 месяцев у пациентов обеих групп был выявлен сопоставимый прирост среднего балла в динамике. Однако при обследовании через 1 год в контрольной группе выявилось некоторое снижение среднего балла.

При клиническом осмотре с балльной оценкой по FPI-6 в обеих группах была выявлена схожая динамика показателей (-7 (± 2) баллов). Клиническая оценка установки стоп у всех пациентов классифицирована как нейтральная. При оценке динамики параметров плантоскопических индексов CSI и SI в обеих группах выявлено их сопоставимое уменьшение до средних значений в их возрастных категориях [16]. Результат в течение 1 года после операции в обеих группах в целом оставался без изменений (табл. 2).

Клинический пример

Пациент С., 13 лет. Диагноз — плоско-вальгусная деформация стоп. Поступил в отделение с жалобами на боли в правой стопе при длительной нагрузке, быструю утомляемость при ходьбе.

Клинически: плоско-вальгусная деформация обеих стоп (более выраженная справа), деформация мобильна, одномоментно пассивно выводится в среднее положение. Количество баллов по системе FPI-6: +11 справа (выраженная пронирующая установка), +9 слева (рис. 2a). Результаты плантоскопии: CSI — 1,12, SI — 1,53.

На рентгенограммах правой стопы (рис. 2b, c): таранно-пяточный угол в прямой проекции — 42° , угол продольного свода — 160° , высота продольного свода — 12 мм (III степень по Богданову), угол Meary в боковой проекции — 18° , угол инклинации пяточной кости — 18° .

При анкетировании по опроснику AOFAS получен результат 64 балла.

Пациенту было выполнено КТ-исследование стоп и голеностопных суставов с имитацией вертикальной нагрузки.

Таблица 2. Динамика оценки по шкалам FPI-6, AOFAS и основным рентгенометрическим показателям**Table 2.** The dynamics of the assessment according to the FPI-6, AOFAS scales and the main rentgenometric parameters

Показатель	Основная группа			Контрольная группа		
	До операции	Через 6 месяцев	Через 1 год	До операции	Через 6 месяцев	Через 1 год
FPI-6	+8,4 (±1,6)	+1,8 (±1,4)	+2,2 (±1,2)	+8,2 (±1,2)	+2,0 (±1,6)	+2,3 (±1,8)
Угол продольного свода	154° (±6,2)	132° (±2,3)	134° (±3,2)	156° (±5,4)	140° (±2,4)	142° (±4,2)
Угол Meary	18° (±2,4)	5,4° (±2,4)	6,3° (±2,4)	17,4° (±2,2)	6,6° (±2,2)	6,8° (±2,3)
Угол инклинации пяточной кости	16,2° (±4,4)	34,3° (±2,4)	32,2° (±3,4)	18° (±2,4)	35,7° (±3,5)	33,1° (±3,3)
Угол Kite	42,2° (±2,4)	26,4° (±2,4)	26,6° (±2,4)	44,1° (±2,4)	25,3° (±2,4)	27,6° (±2,4)
AOFAS	62,22 (±12,59)	93,56 (±4,58)	91,16 (±5,7)	62,42 (±12,59)	92,14 (±5,15)	90,23 (±6,59)

По результатам компьютерной томографии на этапе предоперационной подготовки была создана виртуальная трёхмерная модель правой стопы. На полученной модели в плоскости хирургической коррекции было выполнено измерение угла отведения кубовидной кости — 20°, а также формирование клиновидного диастаза до полной коррекции данного угла. Далее было выполнено измерение параметров открытого клина (10,4 мм) и вычисление объёма необходимого костного трансплантата (5,2 мл) (рис. 1).

Для устранения деформации правой стопы выполнены остеотомия пяточной кости по методике Эванса с сохранением медиального кортикала, фиксация индивидуальной Н-образной реконструктивной пластиной, дефект заполнен остеоиндуктивным материалом (губчатый костный аллотрансплантат необходимого объёма).

Через 6 месяцев со дня операции при клиническом осмотре в положении стоя было выявлено уменьшение деформации правой стопы: +3 балла по системе FPI-6. Результаты плантоскопии: индекс Chippaux-Smirak — 0,6 и Stsaheli — 0,71 (рис. 2d).

Результаты рентгенографии правой стопы с вертикальной нагрузкой через 6 месяцев со дня операции: таранно-пяточный угол в прямой проекции — 25°, угол продольного свода — 138°, высота продольного свода — 25 мм (I степень по Богданову), угол Meary в боковой проекции — 8°, угол инклинации пяточной кости — 28° (рис. 2e, f).

По результатам анкетирования через 6 месяцев по опроснику AOFAS полученный прирост показателя составил 32 балла. Через 1 год результат сохранялся.

ОБСУЖДЕНИЕ

По данным литературы [20], наиболее частыми осложнениями, возникающими после операции Эванса, выступают гипо- либо гиперкоррекция деформации и тыльное смещение дистального фрагмента пяточной кости. Основной причиной данных осложнений, по нашему мнению, является сложность предоперационного планирования при выполнении вмешательства

с формированием трапециевидного диастаза. При такой методике механизм коррекции предполагает сложное синхронное многоплоскостное перемещение фрагментов пяточной кости, таранной кости, а также всего переднего и среднего отделов стопы, точное индивидуальное планирование которого является крайне сложным [21]. Как следствие, хирурги вынуждены прибегать к интраоперационному определению параметров диастаза без необходимого нагрузочного теста, что и приводит к подобным осложнениям.

При проведении операций у пациентов основной группы нами выполнялось сохранение медиального кортикала пяточной кости, сформированный диастаз имел форму клина. Данная модификация показала ряд следующих преимуществ:

- исключение фактора многоплоскостного смещения дистального фрагмента позволило упростить моделирование операции. С учётом смещения фрагмента только в плоскости, перпендикулярной плоскости пяточно-кубовидного сустава, при компьютерном моделировании поэтапно воспроизводили коррекцию деформации на основе известных кадаверных исследований [21]. Формирование клиновидного диастаза вокруг медиального кортикала как оси, в соответствии с механизмом «натягивающейся тетивы лука», приводит к перемещению всего переднего отдела. Вслед за перемещением переднего отдела происходит движение таранной кости на уровне подтаранного сустава по известной траектории, соответствующей инверсии;
- возможность моделирования операции в итоге позволила не допустить гипо- и гиперкоррекции деформации в послеоперационном периоде, а также точно спланировать размеры костного трансплантата для полноценного заполнения диастаза;
- пяточно-кубовидный сустав имеет сложное строение суставных поверхностей: плоские, косо направленные в сагиттальной плоскости, с наличием выступающего элемента по подошвенной поверхности — пяточного отростка кубовидной кости (Processus calcaneus) [9]. Эта особенность строения



Рис. 2. Пациент С., 13 лет, диагноз — плоско-вальгусная деформация стоп: *a* — внешний вид стопы до операции, *b* — рентгенография до операции с нагрузкой (боковая проекция), *c* — рентгенография до операции с нагрузкой (прямая проекция), *d* — внешний вид через 6 месяцев после операции, *e* — рентгенография через 6 месяцев с нагрузкой (боковая проекция), *f* — рентгенография через 6 месяцев с нагрузкой (прямая проекция).

Fig. 2. Patient S., 13 years, diagnosis — planovalgus foot deformity: *a* — view of the foot before surgery, *b* — radiography before surgery with a load (lateral projection), *c* — radiography before surgery with a load (AP projection), *d* — patient appearance 6 months after surgery, *e* — radiography after 6 months with a load (lateral projection), *f* — radiography after 6 months with a load (AP projection).

резко ограничивает ротационные движения в суставе, что позволяет передавать супинационное и пронационное движение пяточной кости всей латеральной колонне. Однако она совершенно не препятствует подошвенному смещению кубовидной кости и, соответственно, тыльному смещению дистального фрагмента пяточной кости при формировании диастаза. Сохранение медиального кортикала ограничивает смещение фрагмента пяточной кости, что вкупе с ротационной стабильностью сустава позволяет использовать восстановление угла отведения кубовидной кости в горизонтальной плоскости как хороший ориентир при выполнении коррекции.

В силу ограниченности отображения мягких тканей при КТ-исследовании, а также сложности их моделирования при коррекции данный способ не позволяет в полной мере учитывать натяжение сухожилий и капсульно-связочного аппарата стопы при планировании операции. Как пример можно привести описанное в литературе влияние натяжения сухожилия короткой малоберцовой мышцы на степень сублиуксации на уровне пяточно-кубовидного сустава и натяжения сухожилия длинной малоберцовой мышцы на формирование дуги продольного свода [22]. Несмотря на это, степень интраоперационной коррекции, рассчитанная предложенным методом, обеспечила хороший клинический результат и достижение референтных угловых значений на рентгенограммах с нагрузкой, что может означать, что на данном этапе мягкотканым компонентом можно пренебречь.

Значительное сокращение времени операции и уменьшение в целом оперативной агрессии за счёт минимизации травмирующих кость и мягкие ткани манипуляций во время подбора степени коррекции позволило в послеоперационном периоде начать более раннюю вертикализацию пациента.

Сроки удовлетворительной перестройки трансплантата, позволяющей начать полноценную нагрузку на стопу, у пациентов контрольной и основной групп различались незначительно.

В основной группе были выявлены два случая реакции болезни трансплантата в раннем послеоперационном периоде: отмечались значительная отёчность области установки металлоконструкции, обильное серозное отделяемое. У данных пациентов была проведена десенсибилизирующая терапия (хлоропирамин, дексаметазон). В течение недели в обоих случаях состояние купировалось (в течение 7 дней в одном случае и 5 дней — в другом).

В ходе работы над исследованием были выявлены слабые стороны разработанного метода. К ним относятся необходимость использования компьютерной томографии с вертикальной нагрузкой (или её имитацией), а также определённый навык использования программ для трёхмерного моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение разработанного способа предоперационного планирования и фиксации фрагментов показало свою эффективность для лечения мобильной плоско-вальгусной деформации стоп у детей старшего возраста.

Полученные хорошие долгосрочные результаты коррекции деформации дают основание считать значения угла отведения кубовидной кости основным ориентиром на этапе предоперационного планирования на трёхмерных моделях. Однако необходимо проведение исследований более высокого уровня достоверности для полноценного подтверждения эффективности метода.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: А.И. Сосин — организация исследования, сбор и анализ литературных источников, курация пациентов, сбор данных исследования, подготовка и написание текста статьи; О.В. Кожевников — хирургическое лечение пациентов, курация процесса написания статьи, редактирование статьи; И.В. Грибова — курация пациентов, сбор данных исследования, хирургическое лечение пациентов, редактирование текста статьи; С.Э. Кралина — курация пациентов, сбор данных исследования, хирургическое лечение пациентов.

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

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

Информированное согласие на публикацию. Авторы получили письменное согласие пациента на публикацию его медицинских данных и фотографий.

ADDITIONAL INFO

Author contribution. All authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication). The greatest contribution is distributed as follows: A.I. Sosin — designed the study, collection and analysis of literary sources, curation of patients, collection of research data, wrote the manuscript with input from all authors; O.V. Kozhevnikov — surgical treatment of patients, curation of the writing process, editing of the manuscript; I.V. Gribova — curation of patients, collection of research

data, surgical treatment of patients, editing of the manuscript; S.E. Kralina — patient supervision, research data collection, surgical treatment of patients.

Funding source. The authors state that there is no external funding when conducting the research and preparing the publication.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Consent for publication. Written consent was obtained from the patient for publication of relevant medical information and all of accompanying images within the manuscript.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шабалдин Н.А., Шабалдин А.В., Титов Ф.В., Кокина В.А. Сравнительный анализ положения стопы у детей с использованием индекса позиции стопы (FPI-6) с симптоматическими и бессимптомными формами плоскостопия // *Фундаментальная и клиническая медицина*. 2020. Т. 5, № 4. С. 76–83. doi: 10.23946/2500-0764-2020-5-4-76-83
2. Evans A.M., Rome K. A Cochrane review of the evidence for non-surgical interventions for flexible pediatric flat feet // *Eur J Phys Rehabil Med*. 2011. Vol. 47, № 1. P. 69–89.
3. Pfeiffer M., Kotz R., Ledl T., Hauser G., Sluga M. Prevalence of flat foot in preschool-aged children // *Pediatrics*. 2006. Vol. 118, № 2. P. 634–639. doi: 10.1542/peds.2005-2126
4. Кенис В.М., Лапкин Ю.А., Хусаинов Р.Х., Сапоговский А.В. Мобильное плоскостопие у детей (Обзор литературы) // *Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста*. 2014. Т. 2, № 2. С. 44–54. doi: 10.17816/PTORS2244-54
5. Армасов А.Р., Киселёв В.Я. Диагностическая ценность метода визуальной оценки стоп при диагностике плоскостопия у подростков // *Гений ортопедии*. 2010. № 3. С. 101–104. EDN: MTYNSN
6. Клинические рекомендации. Травматология и ортопедия детского и подросткового возраста / под ред. С.П. Миронова. Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2017. 416 с.
7. Soomekh D.J., Baravarian B. Pediatric and adult flatfoot reconstruction: subtalar arthroereisis versus realignment osteotomy surgical options // *Clin Podiatr Med Surg*. 2006. Vol. 23, № 4. P. 695–v. doi: 10.1016/j.cpm.2006.08.003
8. Evans D. Calcaneo-valgus deformity // *J Bone Joint Surg Br*. 1975. Vol. 57, № 3. P. 270–278.
9. Raines R.A. Jr, Brage M.E. Evans osteotomy in the adult foot: an anatomic study of structures at risk // *Foot Ankle Int*. 1998. Vol. 19, № 11. P. 743–747. doi: 10.1177/107110079801901106
10. Mosca V.S. Calcaneal lengthening for valgus deformity of the hindfoot. Results in children who had severe, symptomatic flatfoot and skewfoot // *J Bone Joint Surg Am*. 1995. Vol. 77, № 4. P. 500–512. doi: 10.2106/00004623-199504000-00002
11. Lai C.C., Wang T.M., Chang C.H., et al. Calcaneal lengthening using ipsilateral fibula autograft in the treatment of symptomatic pes valgus in adolescents // *BMC musculoskeletal disorders*. 2021. Vol. 22, № 1. P. 977. doi: 10.1186/s12891-021-04855-9
12. Müller S.A., Barg A., Vavken P., Valderrabano V., Müller A.M. Autograft versus sterilized allograft for lateral calcaneal lengthening osteotomies: Comparison of 50 patients // *Medicine (Baltimore)*. 2016. Vol. 95, № 30. P. e4343. doi: 10.1097/MD.0000000000004343
13. Stamos N.J., Murasko M.J., Richardson K., et al. Radiographic Outcomes of Titanium Augment vs Bone Graft in Lateral Column Lengthening for Adult-Acquired Flatfoot Deformity // *Foot & ankle orthopaedics*. 2023. Vol. 8, № 2. P. 24730114231176554. doi: 10.1177/24730114231176554
14. Lima T.C., Volpon J.B. Calcaneal lateral column lengthening osteotomy for symptomatic flexible flatfoot in children and adolescents: a systematic review. Osteotomia de alongamento da coluna lateral do calcâneo para tratamento do pé plano flexível sintomático de crianças e adolescentes: revisão sistemática // *Rev Col Bras Cir*. 2018. Vol. 45, № 6. P. e1969. doi: 10.1590/0100-6991e-20181969
15. Патент РФ на изобретение № 196831/ 18.11.2019. Бюл. № 8. Кожевников О.В., Бухтин К.М., Грибова И.В., и др. Ортопедическая Н-образная реконструктивная пластина. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42589439> EDN: MPGKYL
16. Васильев О.С., Степаник И.А., Лёвушкин С.П., Рохлин А.В. Методы диагностики плоскостопия у детей. Систематический обзор // *Новые исследования*. 2021. № 4(68). С. 71–97. doi: 10.46742/2072-8840-2021-68-4-71-97
17. Choi J.H., Choi Y.H., Kim D.H., et al. Effect of flatfoot correction on the ankle joint following lateral column lengthening: A radiographic evaluation // *PLOS One*. 2023. Vol. 18, № 11. P. e0286013. doi: 10.1371/journal.pone.0286013
18. Кожевников О.В., Грибова И.В., Огарёв Е.В., Сосин А.И., Кралина С.Э. Способ хирургического лечения плоско-вальгусной деформации стопы у детей старшего возраста с использованием остеотомии пяточной кости на основе предоперационного компьютерного моделирования. Свидетельство о государственной регистрации заявки на изобретение, рег. № 2023113705/14(029063) от 26.05.2023. Москва: Роспатент, 2023.
19. Gentili A., Masih S., Yao L., Seeger L.L. Pictorial review: foot axes and angles // *Br J Radiol*. 1996. Vol. 69, № 826. P. 968–974. doi: 10.1259/0007-1285-69-826-968
20. Jara M.E. Evans Osteotomy Complications // *Foot Ankle Clin*. 2017. Vol. 22, № 3. P. 573–585. doi: 10.1016/j.fcl.2017.04.006
21. Dumontier T.A., Falicov A., Mosca V., Sangeorzan B. Calcaneal lengthening: investigation of deformity correction in a cadaver flatfoot model // *Foot Ankle Int*. 2005. Vol. 26, № 2. P. 166–170. doi: 10.1177/107110070502600209
22. Mehanna J., Massaad A., Assi A., et al. Risk Factors for Failure of Calcaneal Lengthening Osteotomy in Children and Adolescents With Planovalgus Foot Deformity: A Retrospective Study // *Cureus*. 2023. Vol. 15, № 8. P. e43157. doi: 10.7759/cureus.43157

REFERENCES

1. Shabaldin NA, Shabaldin AV, Titov FV, Kokina VA. Comparative analysis of the foot position in children with symptomatic and asymptomatic flatfoot using the foot posture index (FPI-6). *Fundamental and Clinical Medicine*. 2020;5(4):76–83. doi: 10.23946/2500-0764-2020-5-4-76-83
2. Evans AM, Rome K. A Cochrane review of the evidence for non-surgical interventions for flexible pediatric flat feet. *Eur J Phys Rehabil Med*. 2011;47(1):69–89.
3. Pfeiffer M, Kotz R, Ledl T, Hauser G, Sluga M. Prevalence of flat foot in preschool-aged children. *Pediatrics*. 2006;118(2):634–639. doi: 10.1542/peds.2005-2126
4. Kenis VM, Lapkin YA, Husainov RK, Sapogovskiy AV. Flexible flatfoot in children (review). *Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery*. 2014;2(2):44–54. doi: 10.17816/PTORS2244-54
5. Armasov AR, Kiselev VY. Diagnostic value of the technique for feet visual estimation in adolescent platypodia determination. *Genij ortopedii*. 2010;(3):101–104. EDN: MTYNSN
6. Mironov SP, editor. *Clinical recommendations. Traumatology and orthopedics of childhood and adolescence*. Moscow: GEOTAR-Media; 2017. 416 p.
7. Soomekh DJ, Baravarian B. Pediatric and adult flatfoot reconstruction: subtalar arthroereisis versus realignment osteotomy surgical options. *Clin Podiatr Med Surg*. 2006;23(4):695–v. doi: 10.1016/j.cpm.2006.08.003
8. Evans D. Calcaneo-valgus deformity. *J Bone Joint Surg Br*. 1975;57(3):270–278.
9. Raines RA Jr, Brage ME. Evans osteotomy in the adult foot: an anatomic study of structures at risk. *Foot Ankle Int*. 1998;19(11):743–747. doi: 10.1177/107110079801901106
10. Mosca VS. Calcaneal lengthening for valgus deformity of the hindfoot. Results in children who had severe, symptomatic flatfoot and skewfoot. *J Bone Joint Surg Am*. 1995;77(4):500–512. doi: 10.2106/00004623-199504000-00002
11. Lai CC, Wang T.M, Chang CH, et al. Calcaneal lengthening using ipsilateral fibula autograft in the treatment of symptomatic pes valgus in adolescents. *BMC musculoskeletal disorders*. 2021;22(1):977. doi: 10.1186/s12891-021-04855-9
12. Müller SA, Barg A, Vavken P, Valderrabano V, Müller AM. Autograft versus sterilized allograft for lateral calcaneal lengthening osteotomies: Comparison of 50 patients. *Medicine (Baltimore)*. 2016;95(30):e4343. doi: 10.1097/MD.0000000000004343
13. Stamatou NJ, Murasko MJ, Richardson K, et al. Radiographic Outcomes of Titanium Augment vs Bone Graft in Lateral Column Lengthening for Adult-Acquired Flatfoot Deformity. *Foot & ankle orthopaedics*. 2023;8(2):24730114231176554. doi: 10.1177/24730114231176554
14. Lima TC, Volpon JB. Calcaneal lateral column lengthening osteotomy for symptomatic flexible flatfoot in children and adolescents: a systematic review. Osteotomia de alongamento da coluna lateral do calcâneo para tratamento do pé plano flexível sintomático de crianças e adolescentes: revisão sistemática. *Rev Col Bras Cir*. 2018;45(6):e1969. doi: 10.1590/0100-6991e-20181969
15. Patent RUS № 196831/18.11.2019. Byul. № 8. Kozhevnikov OV, Bukhtin KM, Gribova IV, et al. *Ortopedicheskaya N-obraznaya rekonstruktivnaya plastina*. Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42589439> (In Russ). EDN: MPGKYL
16. Vasilyev OS, Stepanik IA, Levushkin SP, Rohlin AV. Metody diagnostiki ploskostopiya u detej. Sistematicheskij obzor. *Novye issledovaniya*. 2021;(4):68:71–97. (In Russ). doi: 10.46742/2072-8840-2021-68-4-71-97
17. Choi JH, Choi YH, Kim DH, et al. Effect of flatfoot correction on the ankle joint following lateral column lengthening: A radiographic evaluation. *PLOS One*. 2023;18(11):e0286013. doi: 10.1371/journal.pone.0286013
18. Kozhevnikov OV, Gribova IV, Ogarev EV, Sosin AI, Kralina SE. *Sposob hirurgicheskogo lecheniya plosko-val'gusnoj deformacii stopy u detej starshego vozrasta s ispol'zovaniem osteotomii pyatochnoj kosti na osnove predoperacionnogo komp'yuternogo modelirovaniya*. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii zayavki na izobretenie, reg. № 2023113705/14(029063) 26.05.2023. Moscow: Rospatent; 2023.
19. Gentili A, Masih S, Yao L, Seeger LL. Pictorial review: foot axes and angles. *Br J Radiol*. 1996;69(826):968–974. doi: 10.1259/0007-1285-69-826-968
20. Jara ME. Evans Osteotomy Complications. *Foot Ankle Clin*. 2017;22(3):573–585. doi: 10.1016/j.fcl.2017.04.006
21. Dumontier TA, Falicov A, Mosca V, Sangeorzan B. Calcaneal lengthening: investigation of deformity correction in a cadaver flatfoot model. *Foot Ankle Int*. 2005;26(2):166–170. doi: 10.1177/107110070502600209
22. Mehanna J, Massaad A, Assi A, et al. Risk Factors for Failure of Calcaneal Lengthening Osteotomy in Children and Adolescents With Planovalgus Foot Deformity: A Retrospective Study. *Cureus*. 2023;15(8):e43157. doi: 10.7759/cureus.43157

ОБ АВТОРАХ

* Сосин Антон Игоревич;

адрес: Россия, 127299, Москва, ул. Приорова, 10;
ORCID: 0009-0000-6399-8603;
eLibrary SPIN: 5579-2844;
e-mail: SosinAI@cito-priorov.ru

AUTHORS' INFO

* Anton I. Sosin;

address: 10 Priorova str., 127299 Moscow, Russia;
ORCID: 0009-0000-6399-8603;
eLibrary SPIN: 5579-2844;
e-mail: SosinAI@cito-priorov.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Кожевников Олег Всеволодович, д-р мед. наук,
ORCID: 0000-0003-3929-6294;
eLibrary SPIN: 9538-4058;
e-mail: kozhevnikovov@cito-priorov.ru

Грибова Инна Владимировна, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0001-7323-0681;
eLibrary SPIN: 5618-4231;
e-mail: 10otdcito@mail.ru

Кралина Светлана Эдуардовна, канд. мед. наук,
ORCID: 0000-0001-6956-6801;
eLibrary SPIN: 9178-0184;
e-mail: Kralina_s@mail.ru

Oleg V. Kozhevnikov, MD, Dr. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0003-3929-6294;
eLibrary SPIN: 9538-4058;
e-mail: kozhevnikovov@cito-priorov.ru

Inna V. Gribova, MD, Cand. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0001-7323-0681;
eLibrary SPIN: 5618-4231;
e-mail: 10otdcito@mail.ru

Svetlana E. Kralina, MD, Cand. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0001-6956-6801;
eLibrary SPIN: 9178-0184;
e-mail: Kralina_s@mail.ru

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto630428>

Neuro-microcirculatory interrelationships in patients with kyphoscoliosis associated with neurological deficits

Anton G. Nazarenko, Alexander I. Krupatkin, Alexander A. Kuleshov, Igor M. Militsa, Marchel S. Vetrile, Igor N. Lisyansky, Sergey N. Makarov

N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The use of laser Doppler flowmetry with spectral wavelet analysis of blood flow fluctuations allows us to assess the functional state of thin unmyelinated nerve fibers and objectify the dynamics of recovery processes in patients with kyphoscoliotic spinal deformities associated with spinal cord compression.

AIM: To study the features of neuromicrocirculatory relationships in patients with kyphoscoliosis associated with neurological deficits before and after surgical treatment.

MATERIALS AND METHODS: 20 patients with spinal deformities associated with neurological deficits of varying severity were examined using the LDF method and operated on. Patients were examined before surgery, 1–2 weeks after surgery following regression of acute postoperative pain syndrome, 3–6 months, 6–12 months, and more than a year after surgery. The scope of the study included a general examination with a detailed assessment of the neurological status, radiation diagnostics (postural radiographs of the spine, computed tomography and magnetic resonance imaging of the spine with assessment of spinal canal stenosis). Patients with severe kyphoscoliotic deformities underwent CT myelography followed by the design of individual full-size 3D plastic models of the spine and myeloradicular structures. LDF with wavelet analysis was carried out at all periods of the survey. A perfusion study with determination of the average microcirculation was carried out at the level of the pad of the distal phalanx of the big toe using a two-channel LAKK-02 device with a semiconductor laser (sensing in the red Raman and infrared IR channels). The obtained LDF results were processed by spectral amplitude-frequency wavelet analysis to characterize microcirculation regulation factors in the ranges of sympathetic adrenergic regulation (0.02–0.046 Hz), sensory peptidergic influences (0.047–0.069 Hz), myogenic oscillations (0.07–0.145 Hz).

RESULTS: After surgery, the activity of trophotropic sensory peptidergic nerve fibers, the values of perfusion of the microcirculatory channel increased and was maintained starting from the early postoperative period. Ergotropic sympathetic adrenergic activity was significantly decreased in the period of 6–12 months after surgery. Maximum mobilization of trophotropic neurogenic mechanisms of sanogenesis was observed in the period of 6–12 months after surgery.

CONCLUSION: The obtained data indicate a significant participation of thin nerve fibers in the recovery processes after decompressive surgeries in the spinal canal zone and the creation of anatomical conditions for neurophysiological repair at the spinal cord level. The use of the LDF method with spectral wavelet analysis of blood flow fluctuations makes it possible to objectify the dynamics of thin unmyelinated nerve fibers and recovery processes in patients with kyphoscoliotic deformities of the spine associated with spinal cord compression.

Keywords: kyphosis; scoliosis; neurological deficit; laser doppler flowmetry; microcirculation; wavelet analysis.

To cite this article:

Nazarenko AG, Krupatkin AI, Kuleshov AA, Militsa IM, Vetrile MS, Lisyansky IN, Makarov SN. Neuro-microcirculatory interrelationships in patients with kyphoscoliosis associated with neurological deficits. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2024;31(3):295–304. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto630428>

Received: 17.04.2024

Accepted: 24.04.2024

Published online: 17.07.2024

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto630428>

Функциональная оценка тонких немиелинизированных нервных волокон у пациентов с кифосколиозом, ассоциированным с компрессией спинного мозга

А.Г. Назаренко, А.И. Крупаткин, А.А. Кулешов, И.М. Милица, М.С. Ветрилэ, И.Н. Лисянский, С.Н. Макаров

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

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Использование метода лазерной доплеровской флоуметрии со спектральным вейвлет-анализом колебаний кровотока позволяет оценить функциональное состояние тонких немиелинизированных нервных волокон и объективизировать динамику восстановительных процессов у пациентов с кифосколиотическими деформациями позвоночника, ассоциированными с компрессией спинного мозга.

Цель. Изучить особенности нейромикроциркуляторных взаимосвязей у пациентов с кифосколиозом, ассоциированным с неврологическим дефицитом, до и после оперативного лечения.

Материалы и методы. Обследованы с использованием метода ЛДФ и прооперированы 20 пациентов с деформациями позвоночника, ассоциированными с неврологическим дефицитом различной степени выраженности. Обследование пациентов проводилось до операции, через 1–2 недели после неё (после регресса острого послеоперационного болевого синдрома), через 3–6 месяцев, 6–12 месяцев и более года после операции. Объём исследования включал общий осмотр с подробной оценкой неврологического статуса, лучевую диагностику (постуральные рентгенограммы позвоночника, компьютерную и магнитно-резонансную томографию позвоночника с оценкой стеноза позвоночного канала). Пациентам с грубыми кифосколиотическими деформациями проводилась КТ-миелография с последующим проектированием индивидуальных полноразмерных 3D-моделей позвоночника и миелорадикулярных структур из пластика. На всех сроках обследования была проведена ЛДФ с вейвлет-анализом. Исследование перфузии с определением среднего показателя микроциркуляции проводилось на уровне подушечки дистальной фаланги большого пальца стопы с использованием двухканального аппарата ЛАКК-02 с полупроводниковым лазером (зондирование в красном и инфракрасном канале). Полученные результаты ЛДФ обрабатывались методом спектрального амплитудно-частотного вейвлет-анализа для характеристики факторов регуляции микроциркуляции в диапазонах симпатической адренергической регуляции (0,02–0,046 Гц), сенсорных пептидергических влияний (0,047–0,069 Гц), миогенных осцилляций (0,07–0,145 Гц).

Результаты. После операции возрастала и поддерживалась активность трофотропных сенсорных пептидергических нервных волокон, величины перфузии микроциркуляторного русла, начиная с раннего послеоперационного периода. Эрготропная симпатическая адренергическая активность значительно снижалась в период 6–12 месяцев после операции. Максимальная мобилизация трофотропных нейрогенных механизмов саногенеза отмечалась в период 6–12 месяцев после операции.

Заключение. Полученные данные свидетельствуют о значимом участии тонких нервных волокон в восстановительных процессах после декомпрессивных операций в зоне позвоночного канала и создания анатомических условий для нейрофизиологической репарации на уровне спинного мозга. Использование метода ЛДФ со спектральным вейвлет-анализом колебаний кровотока позволяет объективизировать динамику состояния тонких немиелинизированных нервных волокон и восстановительных процессов у пациентов с кифосколиотическими деформациями позвоночника, ассоциированными с компрессией спинного мозга.

Ключевые слова: кифоз; сколиоз; неврологический дефицит; лазерная доплеровская флоуметрия; микроциркуляция; вейвлет-анализ.

Как цитировать:

Назаренко А.Г., Крупаткин А.И., Кулешов А.А., Милица И.М., Ветрилэ М.С., Лисянский И.Н., Макаров С.Н. Функциональная оценка тонких немиелинизированных нервных волокон у пациентов с кифосколиозом, ассоциированным с компрессией спинного мозга // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2024. Т. 31, № 3. С. 295–304. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto630428>

Рукопись получена: 17.04.2024

Рукопись одобрена: 24.04.2024

Опубликована online: 17.07.2024

BACKGROUND

Spinal deformities, such as kyphosis and scoliosis, may lead to spinal canal stenosis and subsequently to compression of the vascular-nerve structures, including the spinal cord. Imaging modalities for radiological-clinical and anatomical diagnostics [1] do not show the quantitative characteristics of the degree of damage and restoration of spinal cord function and the dynamics of the neurological status. Moreover, stenosis can cause changes in neurologic function parameters, such as the myelinated type A fibers and thin unmyelinated C-fibers. Myelinated structures contribute to specific functions within the body such as movements and deep sensitivity. Conversely, unmyelinated sympathetic and thin sensory fibers are involved in adaptation processes, tropism, patho- and sanogenesis, and pain systems. Sympathetic activity is associated with dystrophy, and sensory peptidergic nerve fibers play a crucial role in restorative processes, sanogenesis, and recovery [2]. In evaluating myelinated structures, including in spinal stenosis, electroneuromyography (ENMG) methods are used to determine the diagnostically significant indicators, namely, the amplitude of action potentials, motor and sensory response parameters, impulse conduction velocity and F-wave [3], and evoked potentials (somatosensory, cognitive, etc.) [4]. However, the state of thin unmyelinated and poorly myelinated fibers in spinal stenosis has not been studied; this may be due to the fact that these fibers have low conduction velocity and thus cannot be assessed using traditional ENMG. Thin fibers in the limbs are represented by sympathetic vegetative postganglionic C-fibers (vasomotor, to a lesser extent sweat-secreting, etc.) and sensory A-delta and C-fibers for pain and temperature sensitivity (sensory function, as well as trophic function, associated with neuropeptide secretion). Parasympathetic innervation is absent in the tissues of the limbs. In the field of vertebrology, some studies have investigated the function of thin nerve fibers. For example, using the thermography method, the role of the somatosympathetic reflex in the diagnosis of discopathy of the lumbar spine was determined [5].

Laser Doppler flowmetry (LDF) with spectral wavelet analysis of blood flow oscillations is a commonly used noninvasive method for assessing microcirculation [2, 6–9]. In the amplitude–frequency wavelet spectrum of the LDF records of microhemocirculatory signals, several characteristic frequency intervals ranging from 0.005 to 2 Hz were identified, each of which was associated with a specific physiological effect in skin microcirculation. This facilitates noninvasive assessment of the regulation of microcirculatory tissue systems. These include active tone-forming effects (endothelial, neurogenic, and myogenic) and passive effects caused by changes in pressure in microvessels (cardiac and respiratory) [2, 10]. Because the tone-forming ranges of 0.02–0.046 Hz and 0.047–0.069 Hz are associated, respectively, with sympathetic vasomotor adrenergic and

sensory peptidergic influences on microvessels, respectively, the functional state of vasomotor sympathetic and sensory peptidergic innervation can be diagnosed noninvasively [2, 10]. This technique was first proposed in 2004 [10]. Regarding the range of microvessel perfusion oscillations, sympathetic adrenergic influences and accompanying angiospastic manifestations are considered ergotropic and sensory peptidergic, myogenic, and endothelial influences are trophotropic. The predominance of ergotropic factors is associated with degenerative–dystrophic processes, and the prevalence of trophotropic components of the regulation of microcirculatory tissue systems is linked to regeneration and restorative processes [2].

Notably, microcirculatory tissue systems are among the first to respond in the development of sanogenesis; therefore, the use of LDF indicators with wavelet analysis of blood flow oscillations before and after spinal surgeries is promising for the detection of the vector of functional dynamics [2, 9].

MATERIALS AND METHODS

Study design

A monocentric cohort retrospective comparative study was performed.

Eligibility criteria

At the N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, 20 patients with spinal deformities associated with neurological deficits of varying severity were examined using the LDF method and operated on: 17 patients were below 18 years old (13.9 ± 2.6 years) and three were adults. In the pediatric group, 10 cases of grade IV idiopathic kyphoscoliosis with Frankel neurological status C (seven patients) and D (three patients) and seven cases of thoracolumbar kyphosis that developed against hypoplasia of the Th12–L1 vertebral bodies were noted. This group of patients had spinal canal stenosis of $54.1 \pm 19.1\%$, assessed according to computed tomography (CT) myelography of the deformity apex in the sagittal plane. In adult patients, kyphotic deformity of the thoracic and thoracolumbar spine was registered. Examination showed a spinal canal stenosis of $53.3 \pm 16.4\%$. Frankel neurological status C (two patients) and D (one patient) were noted.

Study conditions

The patients were examined before the surgery, 1–2 weeks after surgery following regression of acute postoperative pain syndrome, and 3–6 months, 6–12 months, and more than a year after the surgery.

Method of medical intervention

Instrumental correction and fixation of the deformity without direct decompression of the spinal canal were performed in seven patients and two-stage surgical treatment involving dorsal stabilization of the spinal deformity and

anterior decompression of the spinal canal in ten patients. Posterolateral decompression of the spinal canal was conducted in three patients.

Methods of recording outcomes

General examination including assessment of the neurological status and radiation diagnostics (i.e., postural radiographs of the spine and CT and magnetic resonance imaging of the spine with assessment of spinal stenosis) were carried out. Patients with severe kyphoscoliosis underwent CT myelography with subsequent design of individual full-size 3D models of the spine and myeloradicular structures made of plastic.

LDF with wavelet analysis was performed in all stages of the examination (Figs. 1–3). A perfusion study, with determination of the average microcirculation index (M, in perfusion units (p.u.)), was performed at the level of the pad of the distal phalanx of the big toe using a two-channel LAKK-02 device with a semiconductor laser (probing in the red and infrared channels) [2, 9]. The LDF results were processed using spectral amplitude–frequency wavelet analysis to characterize the factors of microcirculation regulation in the ranges of sympathetic adrenergic regulation (0.02–0.046 Hz), sensory peptidergic influences (0.047–0.069 Hz), and myogenic oscillations (0.07–0.145 Hz). The maximum average amplitude of oscillations in each range, normalized by the root-mean-square deviation (σ), was determined by the equation A/σ , where A is the amplitude value in p.u. according to the previously described technique [2, 9] (Figs. 1–3).

Statistical analysis

Statistical processing was performed using the Biostat 4.03 program. The Mann–Whitney test was used to compare two samples. Quantitative data were presented as mean $\pm$ standard deviation.

Ethical considerations

The study was conducted according to the standards of the local ethics committee (meeting no. 7, dated August 5, 2021) and the 1964 Helsinki Declaration and its later amendments or comparable ethical standards. All patients (or their representatives) signed an informed consent to participate in the study.

RESULTS

After surgical treatment, the relative magnitude of spinal canal stenosis in patients in the postoperative period was $27.5 \pm 14.7\%$ (before surgery: $54.1 \pm 19.1\%$). Eight patients with the Frankel C neurological status (in the form of lower mixed deep paraparesis) showed positive dynamics up to Frankel D. Seven of 12 patients with preoperative neurological status Frankel D did not show changes in neurological deficit, whereas five patients showed regression of neurological disorders up to Frankel E. The outcomes of surgical treatment of patients were assessed as good. In 13 patients (65%), regression of neurological deficit was detected during the follow-up period of 3–6 months after surgery. The delta of deformity correction in this group of patients was $29.3 \pm 12.1\%$.

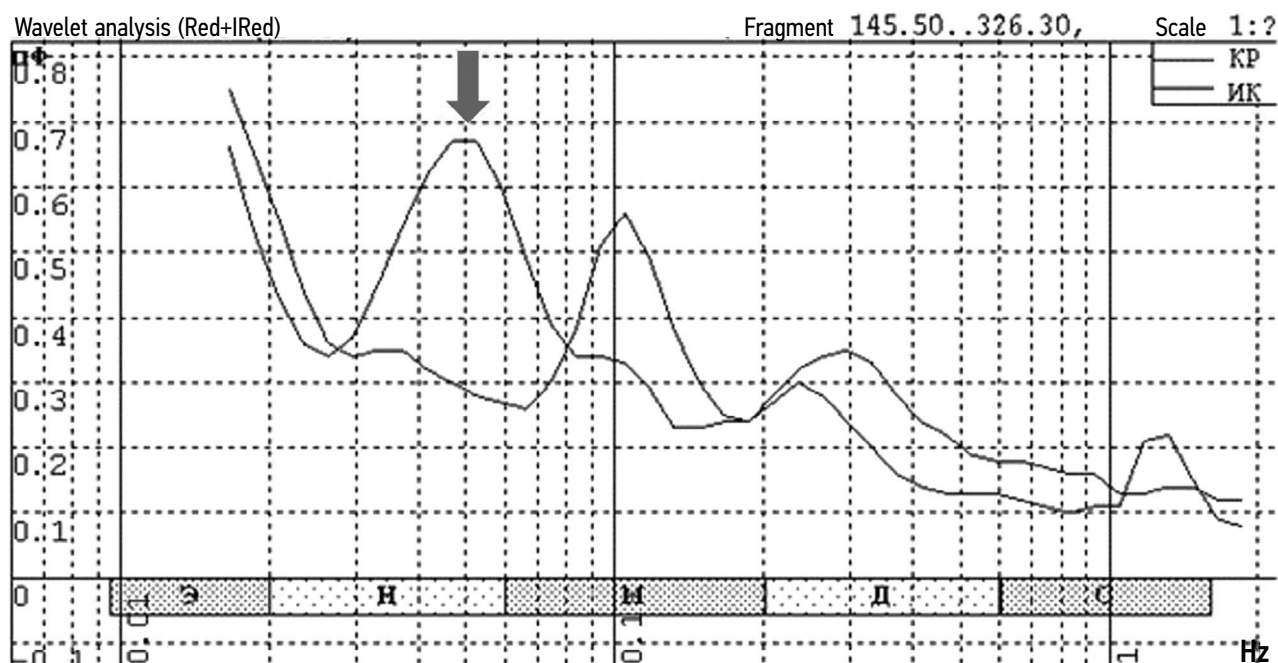


Fig. 1. An example of recording the wavelet spectrum of blood flow fluctuations according to laser Doppler flowmetry data before surgery. *Note.* Horizontally — frequency ranges in Hz: e (endothelial), n (neurogenic), m (myogenic), rv (respiratory venular), c (cardiac). Vertically — the amplitude of fluctuations in blood flow in perfusion units. The red arrow is the activation of oscillations in the range of sympathetic adrenergic regulation of microvessels in the infrared channel. Sensory peptidergic activity has not been recorded.

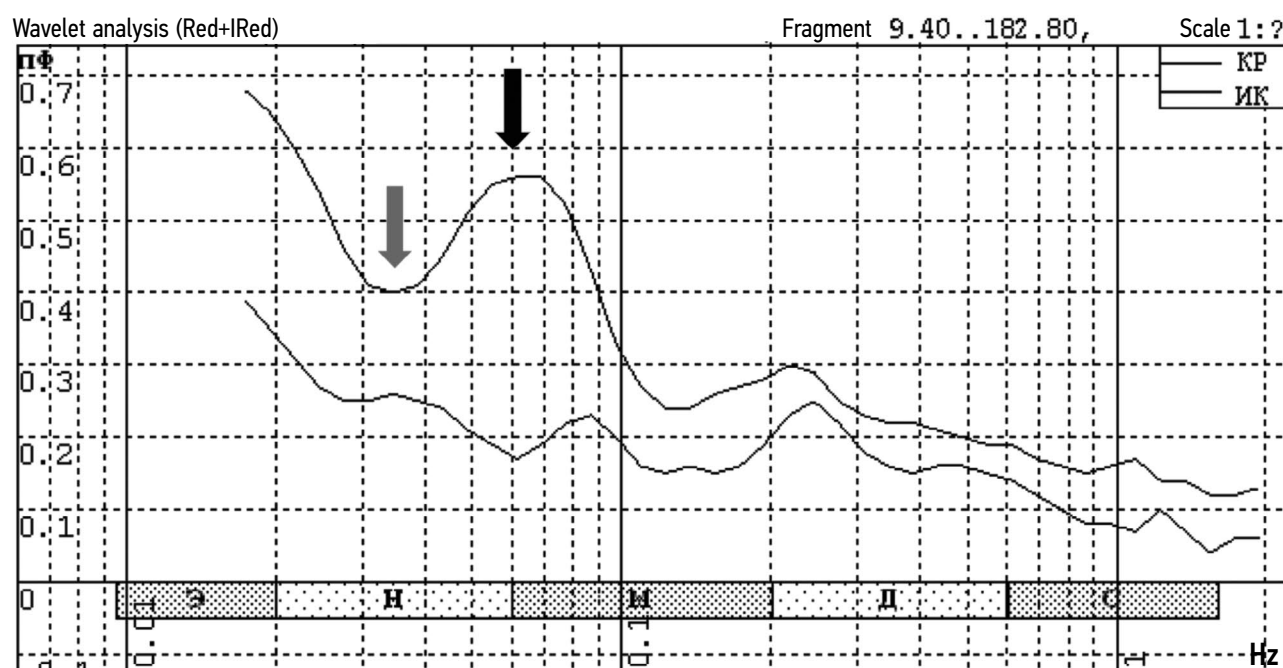


Fig. 2. An example of recording the wavelet spectrum of blood flow fluctuations according to laser Doppler flowmetry 8 months after surgery.

Note. Horizontally — frequency ranges in Hz: e (endothelial), n (neurogenic), m (myogenic), rv (respiratory venular), c (cardiac). Vertically — the amplitude of fluctuations in blood flow in perfusion units. The red arrow indicates the absence of sympathetic adrenergic activity in the infrared channel and its marked decrease in the red recording channel. The blue arrow indicates the pronounced activity of sensory peptidergic regulation in the infrared recording channel.

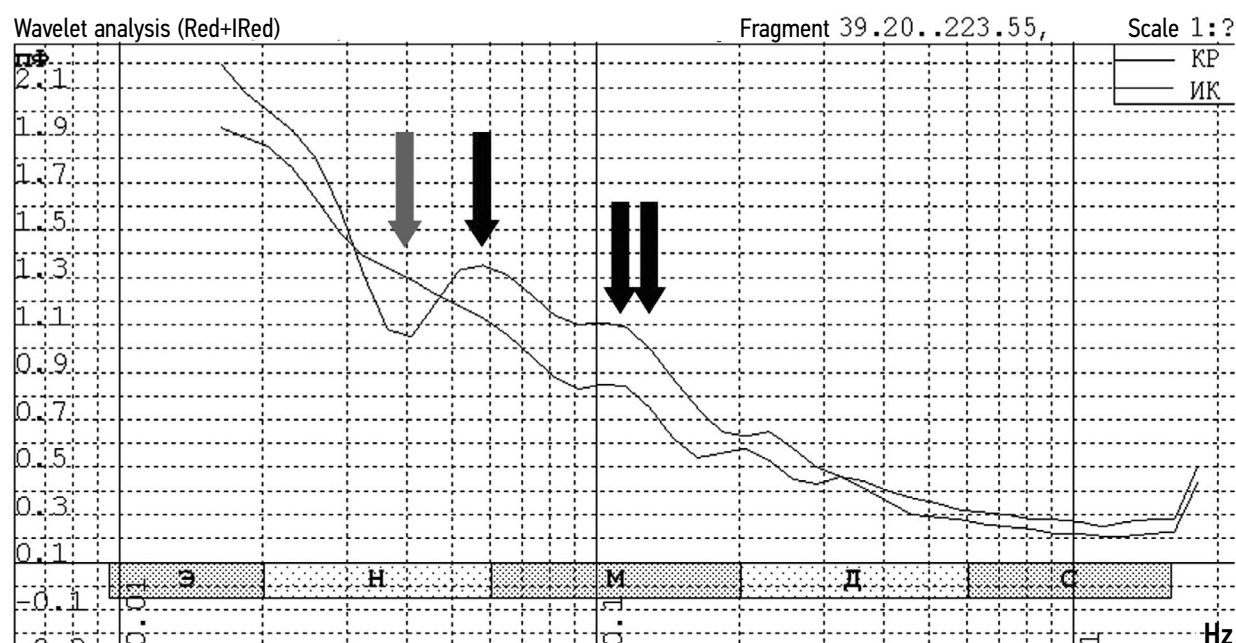


Fig. 3. An example of recording the wavelet spectrum of blood flow fluctuations according to laser Doppler flowmetry 1.5 years after surgery.

Note. Horizontally: frequency ranges in Hz — e (endothelial), n (neurogenic), m (myogenic), rv (respiratory venular), c (cardiac). Vertically — the amplitude of fluctuations in blood flow in perfusion units. The red arrow indicates the absence of sympathetic adrenergic activity in the red and infrared recording channels. The blue arrow is the activation of sensory peptidergic regulation in the infrared recording channel. The double blue arrow is the synchronization of the frequency of myogenic activity in the red and infrared channels.

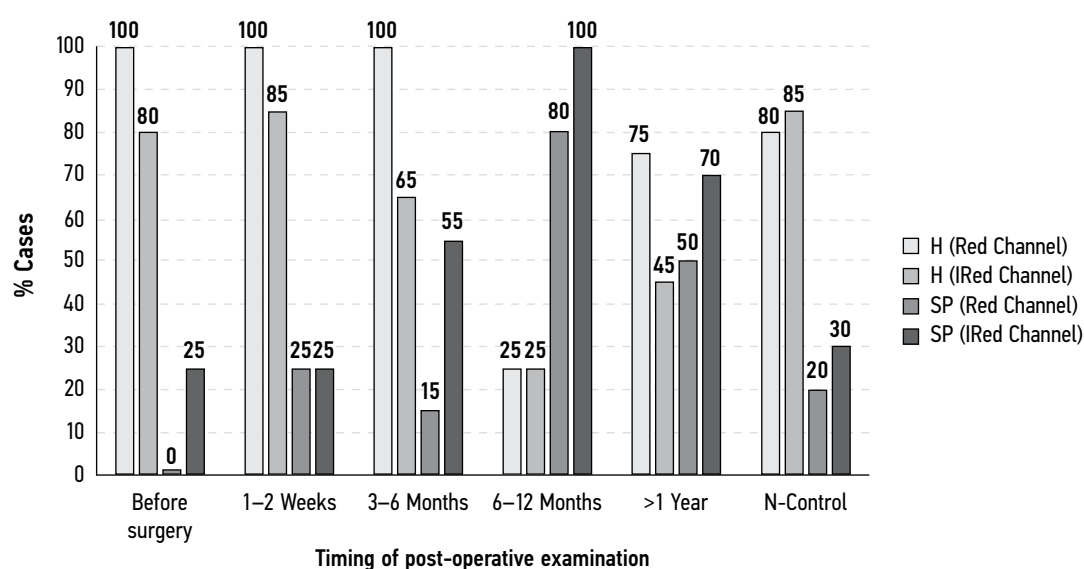


Fig. 4. Frequency of activity of sympathetic adrenergic and sensory peptidergic regulation of microvessels in the wavelet spectrum of blood flow fluctuations, %.

Note. H — sympathetic adrenergic regulation of microvessels, SP — sensory peptidergic regulation of microvessels, IRed — infrared.

Figure 4 and Table 1 present the results of the study using the LDF method.

Examples of recording the wavelet spectrum of blood flow oscillations are shown in Figures 1–3.

Based on the data presented, during the postoperative recovery, clear dynamics of the functional state of thin nerve fibers were noted (Fig. 4). Under physiological rest conditions in healthy individuals (control group), the sympathetic adrenergic regulation was predominant, whereas trophotropic sensory peptidergic activity was detected in the wavelet spectrum in no more than 30% of cases. In patients in the preoperative period, this distribution was preserved; however, in precapillary microvessels (red channel recordings), sensory peptidergic regulation was not detected in the wavelet spectrum. After the surgery, a progressive

change in the vector of nervous control of microcirculatory tissue systems was noted, namely, a distinct increase in the contribution of trophotropic sensory peptidergic innervation against a decrease in the representation of the ergotropic sympathetic adrenergic channel of regulation. The highest trophotropic contribution was observed in the time interval of 6–12 months after the surgery, regarding it as the most active recovery period.

The quantitative indices of the state of microcirculation and its regulation are of interest (Table 1). The preoperative period was characterized by low values of perfusion (M, p.u.) of the microvascular bed in the red recording channel, reflecting predominantly nutritive blood flow, absence of trophotropic sensory peptidergic oscillations in the same recording channel, and relatively low values of the amplitudes

Table 1. Indicators of laser Doppler flowmetry before and after surgical treatment

Examination interval	An./σ R	An./σ IR	Asp./σ R	Asp./σ IR	Am./σ R	Am./σ IR	M, p.u. R	M, p.u. IR
Before surgery	0.45±0.12	0.53±0.11	—	0.38±0.08	0.38±0.04	0.24±0.03	1.1±0.07	11.7±1.1
1–2 weeks after surgery	0.4±0.2	0.64±0.04*	0.57±0.12*	0.53±0.05*	0.41±0.09	0.3±0.08	2.3±0.05*	10±1.5
3–6 months after surgery	0.6±0.1	0.65±0.06*	0.41±0.08*	0.54±0.04*	0.39±0.07	0.19±0.1	2.34±0.04*	13±1.4
6–12 months after surgery	0.37±0.07*	0.44±0.06*	0.47±0.11*	0.43±0.04*	0.43±0.03*	0.28±0.05	5.4±0.09*	13±2.3
More than 1 year after surgery	0.45±0.15	0.5±0.12	0.32±0.07*	0.54±0.12*	0.35±0.1	0.34±0.04*	7.2±1.1*	18.7±1.5*
Control (n=20)	0.4±0.09	0.48±0.1	0.27±0.1	0.29±0.1	0.45±0.07	0.4±0.03	5.1±0.09	11.8±1.3

Note. *, $p < 0.05$ for data in dynamics after surgery compared with preoperative results; R, red channel; IR, infrared channel.

of myogenic blood flow oscillations associated with capillary perfusion. Positive changes of microvascular indices were determined after the surgery. The M value significantly increased, especially in the red recording channel. Moreover, the activity of sensory peptidergic nerve fibers increased and was maintained starting from the early postoperative period. Sympathetic adrenergic activity significantly decreased 6–12 months after the surgery.

DISCUSSION

In the present study, the laser Doppler flowmetry method was used to evaluate thin unmyelinated nerve fibers. LDF is widely used in modern fundamental and clinical medicine to evaluate microcirculatory tissue systems. In PubMed alone, approximately 12,000 publications on this topic in various fields of medicine were found. The advantages of the method are noninvasiveness, harmlessness of research, and the possibility of unlimited control over time, and for Russian devices of the LAKK series, it is also a computer quantitative analysis of records using spectral wavelet analysis of blood flow oscillations. This quantitative approach enables evaluation of the factors regulating microcirculation, including the functional state of thin unmyelinated nerve fibers involved in the innervation of microvessels (vasomotor sympathetic and sensory peptidergic). This is especially valuable for traumatology and orthopedics, as the results of LDF characterize not only the purely vascular component of tissue tropism implemented at the level of microcirculation but also the condition of the nervous component of tropism implemented through thin nerve fibers [2, 9]. Currently, this opportunity has become even more crucial owing to the fact that neurophysiological diagnostics in traumatology and orthopedics, including vertebrology, is based on an electrophysiological approach with an assessment of conductivity along myelinated nerve fibers. However, this approach is ineffective for diagnosing unmyelinated innervation.

The choice of the skin of the plantar surface of the big toe as the LDF registration zone was due to the high density of unmyelinated fibers, including perivascular, in the skin of the plantar and palmar surfaces in humans [9].

Results indicate that the contribution of trophotropic sensory peptidergic regulation begins to increase 3–6 months after surgery, reaches a maximum in 6–12 months, and decreases slightly, but remains a year or more after surgery. In this context, the participation of the ergotropic channel of regulation associated with sympathetic fibers is maintained at all stages; however, their contribution to the control of microcirculatory tissue systems decreased starting from month six after surgery, reaching a minimum in 6–12 months.

Among the quantitative parameters of microcirculation, the average perfusion value M demonstrated a clear progression in dynamics after the surgery. In quantitative terms, for cases of representation in the wavelet spectrum,

the activity of the trophotropic sensory peptidergic channel of regulation (the values of the normalized amplitudes of blood flow oscillations of the corresponding genesis) increased significantly after surgery, and the activity of the ergotropic sympathetic channel (the values of the amplitudes of oscillations of the sympathetic adrenergic genesis) significantly decreased 6–12 months after surgery.

The obtained data indicate the significant participation of thin nerve fibers in the recovery processes after decompression surgeries in the spinal canal zone and in creating anatomical conditions for neurophysiological reparation in the spinal cord.

CONCLUSION

Using the LDF with spectral wavelet analysis of blood flow oscillations enables evaluation of the dynamics of the state of thin unmyelinated nerve fibers and recovery processes in patients with kyphoscoliotic spinal deformities associated with spinal cord compression. After surgery, the activity of trophotropic sensory peptidergic nerve fibers and microcirculatory bed perfusion increased and were maintained since the early postoperative period. Ergotropic sympathetic adrenergic activity significantly decreased 6–12 months after surgery. Maximum mobilization of trophotropic neurogenic mechanisms of sanogenesis was noted 6–12 months after the intervention.

ADDITIONAL INFO

Author contribution. All authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication). The greatest contribution is distributed as follows: A.I. Krupatkin and I.M. Militsa — data collection and analysis, writing the text of the article, analysis of literary sources; A.G. Nazarenko and A.A. Kuleshov — writing and editing the text of the article; M.S. Vetrile, I.N. Lisiansky, S.N. Makarov — editing the text of the article.

Funding source. The authors state that there is no external funding when conducting the research and preparing the publication.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Consent for publication. The patient gave his written consent for publication of his medical data.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: А.И. Крупаткин и И.М. Милица — сбор

и анализ данных, написание текста статьи, анализ литературных источников; А.Г. Назаренко и А.А. Кулешов — написание и редактирование текста статьи; М.С. Ветрилэ, И.Н. Лисянский, С.Н. Макаров — редактирование текста статьи.

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

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

Информированное согласие. Авторы получили письменное согласие пациента на публикацию его медицинских данных.

REFERENCES

1. Alsaleh K, Alduhaish A. A limited unilateral transpedicular approach for anterior decompression of the thoracolumbar spinal cord in elderly and high-risk patients. *J Craniovertebr Junction Spine*. 2019;10(2):88–93. doi: 10.4103/jcvjs.JCVJS_20_19
2. Krupatkin AI, Sidorov VV. Laser Doppler flowmetry. In: Beresten NF, Sandrikova VA, Fedorova SI, editors. *Functional diagnostics: National guidelines*. Moscow: GEOTAR-Media; 2019. P. 488–499.
3. Ippolitova EG, Damdinov BB, Koshkareva ZV, Verkhovina TK. Electroneuromyographic parameters in patients with spinal canal stenosis at the cervical level. *Acta Biomedica Scientifica*. 2020;5(5):68–72. doi: 10.29413/ABS.2020-5.5.9
4. Adambaev ZI. Prognostic significance of electroneuromyography and evoked potentials in spinal canal stenosis. *Medical news*. 2019;(6):69–71. EDN: GPZGZQ
5. Mironov SP, Vetrile ST, Krupatkin AI, Shvets VV. Features of regional vegetative regulation and radicular microhemocirculation in patients with osteochondrosis of the spine before and after lumbar discectomy. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2008;(2):15–19. EDN: JTGfYB
6. Srinivasan G, Sujatha N. Fractal Dimension Characterization of in-vivo Laser Doppler Flowmetry signals. *Physics Procedia*. 2011;19:49–54. doi: 10.1016/j.phpro.2011.06.124
7. Gallagher MJ, Hogg FRA, Zoumprouli A, et al. Spinal Cord Blood Flow in Patients with Acute Spinal Cord Injuries. *J Neurotrauma*. 2019;36(6):919–929. doi: 10.1089/neu.2018.5961
8. Reynès C, Vinet A, Maltinti O, Knapp Y. Minimizing the duration of laser Doppler flowmetry recordings while maintaining wavelet analysis quality: A methodological study. *Microvasc Res*. 2020;131:104034. doi: 10.1016/j.mvr.2020.104034
9. Krupatkin AI, Sidorov VV. *Functional diagnostics of the state of microcirculatory and tissue systems. Fluctuations, information, non-linearity. A guide for doctors*. Moscow: LIBROCOM Book House; 2013. 496 p.
10. Krupatkin AI. Functional assessment of perivascular innervation of the skin of the extremities using laser Doppler flowmetry. *Human Physiology*. 2004;30(1):99–104. EDN: OXNWFR

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alsaleh K., Alduhaish A. A limited unilateral transpedicular approach for anterior decompression of the thoracolumbar spinal cord in elderly and high-risk patients // *J Craniovertebr Junction Spine*. 2019. Vol. 10, № 2. P. 88–93. doi: 10.4103/jcvjs.JCVJS_20_19
2. Крупаткин А.И., Сидоров В.В. Лазерная доплеровская флоуметрия. В кн.: *Функциональная диагностика: национальное руководство* / под ред. Н.Ф. Берестень, В.А. Сандрикова, С.И. Фёдоровой. Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2019. С. 488–499.
3. Ипполитова Е.Г., Дамдинов Б.Б., Кошкарёва З.В., Верхожина Т.К. Электронейромиографические показатели у больных со стенозирующим процессом позвоночного канала на шейном уровне // *Acta Biomedica Scientifica*. 2020. Т. 5, № 5. С. 68–72. doi: 10.29413/ABS.2020-5.5.9
4. Адамбаев З.И. Прогностическая значимость показателей электронейромиографии и вызванных потенциалов при стенозе позвоночного канала // *Медицинские новости*. 2019. № 6 (297). С. 69–71. EDN: GPZGZQ
5. Миронов С.П., Ветрилэ С.Т., Крупаткин А.И., Швеи В.В. Особенности регионарной вегетативной регуляции и корешковой микрогемодинамики у больных остеохондрозом позвоночника до и после поясничной дискэктомии // *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова*. 2008. № 2. С. 15–19. EDN: JTGfYB
6. Srinivasan G., Sujatha N. Fractal Dimension Characterization of in-vivo Laser Doppler Flowmetry signals // *Physics Procedia*. 2011. Vol. 19. P. 49–54. doi: 10.1016/j.phpro.2011.06.124
7. Gallagher M.J., Hogg F.R.A., Zoumprouli A., et al. Spinal Cord Blood Flow in Patients with Acute Spinal Cord Injuries // *J Neurotrauma*. 2019. Vol. 36, № 6. P. 919–929. doi: 10.1089/neu.2018.5961
8. Reynès C., Vinet A., Maltinti O., Knapp Y. Minimizing the duration of laser Doppler flowmetry recordings while maintaining wavelet analysis quality: A methodological study // *Microvasc Res*. 2020. Vol. 131. P. 104034. doi: 10.1016/j.mvr.2020.104034
9. Крупаткин А.И., Сидоров В.В. *Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем. Колебания, информация, нелинейность. Руководство для врачей*. Москва: Книжный дом ЛИБРОКОМ, 2013. 496 с.
10. Крупаткин А.И. Функциональная оценка периваскулярной иннервации кожи конечностей с помощью лазерной доплеровской флоуметрии // *Физиология человека*. 2004. Т. 30, № 1. С. 99–104. EDN: OXNWFR

AUTHORS' INFO

Anton G. Nazarenko, MD, Dr. Sci. (Medicine),
professor of RAS;
ORCID: 0000-0003-1314-2887;
eLibrary SPIN: 1402-5186;
e-mail: nazarenkoag@cito-priorov.ru

Alexander I. Krupatkin, MD, Dr. Sci. (Medicine), professor;
ORCID: 0000-0001-5582-5200;
eLibrary SPIN: 3671-5540;
e-mail: krup.61@mail.ru

Alexander A. Kuleshov, MD, Dr. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0002-9526-8274;
eLibrary SPIN: 7052-0220;
e-mail: cito-spine@mail.ru

*** Igor M. Militsa**;
address: 10 Priorova str., 127299 Moscow, Russia;
ORCID: 0009-0005-9832-316X;
eLibrary SPIN: 4015-8113;
e-mail: igor.milica@mail.ru

Marchel S. Vetrile, MD, Cand. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0001-6689-5220;
eLibrary SPIN: 9690-5117;
e-mail: vetrilams@cito-priorov.ru

Igor N. Lisyansky, MD, Cand. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0002-2479-4381;
eLibrary SPIN: 9845-1251;
e-mail: lisigornik@list.ru

Sergey N. Makarov, MD, Cand. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0003-0406-1997;
eLibrary SPIN: 2767-2429;
e-mail: moscow.makarov@gmail.com

ОБ АВТОРАХ

Назаренко Антон Герасимович, д-р мед. наук,
профессор РАН;
ORCID: 0000-0003-1314-2887;
eLibrary SPIN: 1402-5186;
e-mail: nazarenkoag@cito-priorov.ru

Крупаткин Александр Ильич, д-р мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0001-5582-5200;
eLibrary SPIN: 3671-5540;
e-mail: krup.61@mail.ru

Кулешов Александр Алексеевич, д-р мед. наук;
ORCID: 0000-0002-9526-8274;
eLibrary SPIN: 7052-0220;
e-mail: cito-spine@mail.ru

*** Милица Игорь Михайлович**;
адрес: Россия, 127299, Москва, ул. Приорова, 10;
ORCID: 0009-0005-9832-316X;
eLibrary SPIN: 4015-8113;
e-mail: igor.milica@mail.ru

Ветрилэ Марчел Степанович, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0001-6689-5220;
eLibrary SPIN: 9690-5117;
e-mail: vetrilams@cito-priorov.ru

Лисянский Игорь Николаевич, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0002-2479-4381;
eLibrary SPIN: 9845-1251;
e-mail: lisigornik@list.ru

Макаров Сергей Николаевич, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0003-0406-1997;
eLibrary SPIN: 2767-2429;
e-mail: moscow.makarov@gmail.com

* Corresponding author / Автор, ответственный за переписку

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto629134>

Decision-making in unicompartmental knee arthroplasty using radiological parameters in South Asian populations

Aswin Vijay, Haemanath Pandian, Pradeep Elangovan, Arunkumar K. Vijayakumari, Ganesh Anantharaman, Sheik M. Tajudeen, Rajan Raghul

Chettinad Hospital and Research Institute, Chennai, India

ABSTRACT

BACKGROUND: Many patients who visit orthopedic surgeons mainly complained of knee pain, which is often diagnosed as osteoarthritis affecting the medial compartment, whereas the lateral compartment and patello-femoral joint remain relatively unaffected.

AIM: This study aimed to establish criteria for patient selection and validate an evidence-based approach for selecting candidates for unicompartmental knee arthroplasty (UKA). Key considerations in patient selection for UKA include identifying the presence of bone-on-bone osteoarthritis in the medial compartment, ensuring a functionally normal anterior cruciate ligament, maintaining full-thickness cartilage in the lateral compartment, verifying a functionally normal medial collateral ligament, and confirming the absence of severe damage lateral to the patello-femoral joint.

MATERIALS AND METHODS: From a consecutive cohort of 390 patients with medial knee pain, preoperative radiographs of bilateral knee including anteroposterior/lateral/Rosenberg/20° valgus stress views were collected, and results were tabulated. Patients were categorized into appropriate groups. The suitability for UKA was determined based on the Oxford radiological decision aid, history, examination, and radiographic assessment including stress radiographs.

RESULTS: The Oxford radiological decision aid demonstrated 92% sensitivity and 88% specificity. According to the radiographic assessment, 49% of the knees were considered suitable for Oxford UKA (OUKA), whereas 51% were deemed unsuitable. Among the 51 knees identified as unsuitable for OUKA, 40% did not meet one radiographic criterion, 38% did not meet two criteria, 22% did not meet three criteria, and <1% did not meet four criteria.

CONCLUSION: The Oxford radiographic decision aid safely and reliably identifies the appropriate patients for meniscal-bearing UKA and achieves good results in this population. The widespread use of this radiological decision aid should improve the results of UKA.

Keywords: Oxford radiological decision aid; unicompartmental knee arthroplasty; osteoarthritis.

To cite this article:

Vijay A, Pandian H, Elangovan P, Vijayakumari KA, Anantharaman G, Tajudeen SM, Raghul R. Decision-making in unicompartmental knee arthroplasty using radiological parameters in South Asian population. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2024;31(3):305–313. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto629134>

Received: 15.03.2024

Accepted: 13.05.2024

Published online: 09.09.2024

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto629134>

Принятие решения об однокомпонентном эндопротезировании коленного сустава с использованием рентгенологических параметров в южноазиатской популяции

А. Виджай, Х. Пандиан, П. Элангован, А.К. Виджаякумари, Г. Анантхараман, Ш.М. Таджудин, Р. Рагхул

Больница и исследовательский институт Четтинад, Ченнай, Индия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Значительное число пациентов обращаются к хирургам-ортопедам с жалобами на боль в колене, которая часто диагностируется как остеоартрит, поражающий медиальный отдел, в то время как латеральный отдел и надколенно-бедренный сустав остаются относительно незатронутыми.

Цель. Установление критериев отбора пациентов и проверка научно обоснованного подхода к отбору кандидатов на одномыщелковое протезирование коленного сустава. Ключевыми моментами при отборе пациентов для одномыщелкового протезирования коленного сустава являются выявление остеоартроза кости в кости в медиальном отсеке, обеспечение функционально нормальной передней крестообразной связки, сохранение полной толщины хряща в латеральном отсеке, проверка функционально нормальной медиальной коллатеральной связки и подтверждение отсутствия серьёзного повреждения пателлофemorального сустава в латеральном направлении.

Материалы и методы. У 390 пациентов с болью в медиальной части коленного сустава были собраны предоперационные рентгенограммы коленных суставов, включая AP/LAT/Rosenberg view/20° valgus stress view, и результаты были сведены в таблицу. Пациенты были распределены по соответствующим группам. Отбор кандидатов на одномыщелковое протезирование коленного сустава определялся с помощью Оксфордской рентгенологической системы принятия решений, анамнеза, осмотра, рентгенографической оценки, включая стресс-рентгенограммы.

Результаты. Оксфордская рентгенологическая система принятия решений продемонстрировала чувствительность 92% и специфичность 88%. По результатам рентгенографической оценки 49% коленных суставов были признаны пригодными для проведения одномыщелкового протезирования коленного сустава, а 51% — непригодными. Среди 51 коленного сустава, признанных непригодными, 40% не соответствовали одному рентгенографическому критерию, 38% не соответствовали двум критериям, 22% — трём и менее 1% — четырём критериям.

Заключение. Оксфордская рентгенологическая система принятия решений безопасно и надёжно определяет подходящих пациентов для проведения одномыщелкового протезирования коленного сустава с менисковой опорой и позволяет достичь хороших результатов в данной популяции. Широкое использование этого рентгенологического пособия по принятию решений должно улучшить результаты одномыщелкового протезирования коленного сустава.

Ключевые слова: Оксфордская рентгенологическая система принятия решений; односуставная артропластика коленного сустава; остеоартрит.

Как цитировать:

Виджай А., Пандиан Х., Элангован П., Виджаякумари А.К., Анантхараман Г., Таджудин Ш.М., Рагхул Р. Принятие решения об однокомпонентном эндопротезировании коленного сустава с использованием рентгенологических параметров в южноазиатской популяции // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2024. Т. 31, № 3. С. 305–313. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto629134>

BACKGROUND

Most commonly found in older individuals, knee osteoarthritis (OA), which results from the wear and tear of knee joint, is a degenerative joint disease that leads to articular cartilage loss [1]. OA is a progressive disease that can lead to disability. The intensity of clinical symptoms may differ among individuals; however, they generally become more severe, frequent, and debilitating with time [1]. The progression rate also varies individually. Common clinical symptoms encompass gradual onset of knee pain aggravated by activity, knee stiffness, swelling, pain after prolonged sitting or resting, and worsening pain. Treatment for knee OA is initiated with conservative methods and advanced to surgical options if conservative treatment proves ineffective [2].

Many patients who visit orthopedic surgeons complained of knee pain, which is often diagnosed as OA affecting the medial compartment, whereas the lateral compartment and patello-femoral joint remain relatively unaffected [3]. Total knee arthroplasty (TKA) has been the conventional treatment of choice; however, this procedure involves removing healthy joint surfaces. Recently, a trend has developed toward less invasive surgery with unicompartmental knee replacement (UKR) gaining a high popularity [3].

Compared with TKA, patients who underwent UKA experience faster recovery, achieve superior functional outcomes, face lower morbidity and mortality rates, and report higher levels of satisfaction. Moreover, UKA was reported to be more cost-effective than TKA in both the short and long terms. UKA has been in existence since the 1950s; however, the initial designs were plagued with complications [4]. With the evolution of component designs and instrumentation, the survivorship of UKA has significantly improved. In the United States, the utilization rates of UKA from 2002 to 2008 had steadily increased, followed by a subsequent decline [3]. According to data from the 2018 Australian National Joint Replacement Registry, partial knee replacement constituted 8.6% of primary knee arthroplasties in 2017, showing a decline from its previous representation of 16.9% in 2003 [5]. The National Joint Registry of England and Wales also reported a similar UKA use rate of 8.9% in 2017, which has remained consistent over the past decade [6].

Since the establishment of the Indian Joint Registry in 2016, a similar trend of UKA use has been observed. UKA utilization has steadily increased, starting from 0.33% of TKAs in 2016, to 2.85% in 2019. However, the trend declined in 2020, with UKA accounting for 1.67% of TKAs.

However, not all arthroplasty surgeons perform UKA, and a small percentage of surgeons perform most of these procedures. In addition, attitudes toward UKA tend to be quite rigid among surgeons, with some being strong advocate, whereas others are vocal critics [7].

Aim: this study aimed to establish the criteria for patient selection and validate an evidence-based approach for selecting candidates for UKA. Key considerations in the patient

selection for UKA include identifying bone-on-bone OA in the medial compartment, ensuring a functionally normal anterior cruciate ligament, maintaining full-thickness cartilage in the lateral compartment, verifying a functionally normal medial collateral ligament, and confirming the absence of severe damage laterally to the patello-femoral Joint.

MATERIALS AND METHODS

Research design

From a consecutive cohort of 390 patients with medial knee pain, preoperative radiographs of both knees including standing anteroposterior (AP), true lateral, posteroanterior (PA) view with 20° flexion, valgus stress view with 20° flexion, and skyline view were taken (Fig. 1), and results were tabulated. UKA suitability was determined using the Oxford Radiological Criteria (decision aid), history, examination, and radiographic assessment including stress radiographs.

The X-ray knee instability and degenerative scoring system (X-KIDS) is currently being used as a tool to determine the optimal treatment choice between UKA or TKA for an individual knee.

Regarding UKA, the X-KIDS scoring system lacks robust evidence to support its application.

Consequently, a novel atlas-based radiographic Oxford decision aid has been developed. This new tool is tailored for medial Oxford UKA (OUKA) within the context of anteromedial OA (AMOA).

The Oxford decision aid (Fig. 2) comprises five distinct sections, each dedicated to evaluating one of the five criteria: standing AP, true lateral, PA view with 20° flexion, valgus stress view with 20° flexion, and skyline view. Within these sections, radiographic views are presented alongside illustrative radiographs that showcase instances where the criteria are fulfilled. Conversely, exemplar radiographs were also included to illustrate situations where the criteria are not satisfied. The assessment of each criterion was conducted through a binary, yes-or-no question format, characterized by a polar response. Importantly, all five criteria must be met collectively to warrant the consideration of OUKA as a suitable intervention for AMOA.

To evaluate the effectiveness of this decision aid, its sensitivity, specificity, positive predictive value, negative predictive value, and accuracy in identifying cases suitable for OUKA were determined (Fig. 3, 4). This evaluation was conducted solely through radiographic assessment.

Conformity criteria

Inclusion criteria:

- patient with knee pain, aged >30 years.

Exclusion criteria:

- age <30 years;
- fractures around the knee and tibia;
- ligamentous injury of the knee;
- tumors;



Fig. 1. Patient positioning for X-rays.

- Charcot's disease;
- skeletally immature knees.

Research facilities

Chettinad Hospital and Research Institute, Chennai, India.

Research duration

Two years.

The main research outcome

In this section, the primary endpoints were described. They could be "true" (lethal outcome, serious adverse effects, etc.) or "substitute" finishing point (biochemical parameters and quality of life assessment scores). Usually, the main research outcome is characterized by safety, efficiency, and affordability.

Ethical review

Ethical committee approval was obtained from Chettinad Academy of Higher Education — Institutional Human Ethics

Committee for Student Research (CARE IHEC-I) with ID no. IHEC-I/1219/22 approved on 06/09/2022.

Statistical analysis

Principles of samples size calculating: sample size cross-sectional study.

$$N = z^2(2)SD^2/e^2,$$

$$n = 1.64^2 \times 0.6 \times (1-62) / 0.05^2 = 390-400,$$

where $z = 1.64$ (i.e) 90% CI, $SD = 0.6\%$.

RESULTS

Research sample (participants / respondents)

A total of 390 knees were subjected to assessment based on the Oxford decision aid criteria. The use of the radiographic decision aid led to the identification of 49% (191 knees) of the knees as suitable candidates for OUKA, whereas the remaining



Radiographic Assessment for Medial Oxford® Partial Knee Replacement (PKR)

- See the package insert for complete indications, contraindications and patient selection criteria
- Recommended X-rays: AP weight bearing, true lateral, valgus stress & skyline. (Varus stress or Rosenberg/standing PA 20° flexion if bone-on-bone not seen on AP X-ray)
- Only proceed if **all** criteria are satisfied*

Patient Name:

Date of Birth:

Hospital Number:

Which Knee:

Comments:

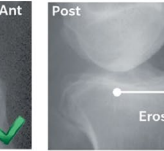
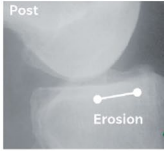
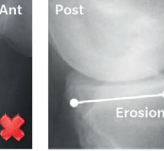
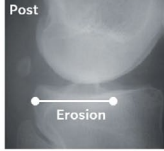
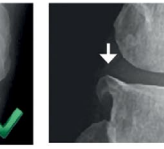
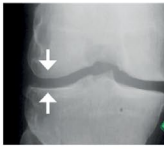
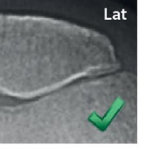
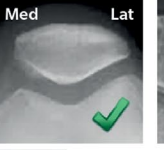
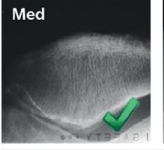
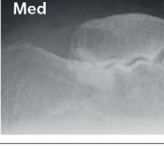
Criterion	Example X-rays	Conclusion
(1) Medial Bone-on-bone X-ray: - AP weight bearing - Varus stress (20° flexion) or Rosenberg/standing PA 20° flexion	  If bone-on-bone is not seen on AP weight bearing view perform varus stress or Rosenberg/standing PA 20° flexion X-ray. If these do not show bone-on-bone consider arthroscopy. Only perform PKA if there is exposed bone on both the femur and tibia in the medial compartment.	☐ Bone-on-bone (or bone loss) Meets criteria ☐ No Bone-on-bone Does not meet criteria
(2) Functionally Intact ACL X-ray: True lateral (femoral condyles overlapping)	 	☐ Functional ACL (preserved posterior tibia) Meets criteria ☐ Absent ACL (posterior erosion/subluxation) Does not meet criteria
(3) Full Thickness Lateral Cartilage X-ray: Valgus stress (20° flexion)	  Repeat if inadequately stressed or X-ray not parallel to joint surface.	☐ Full thickness (ignore osteophytes) Meets criteria ☐ Lateral narrowing Does not meet criteria
(4) Functionally Normal MCL (correctable intra-articular deformity) X-ray: Valgus stress (20° flexion)	  Repeat if inadequately stressed or X-ray not parallel to joint surface.	☐ Correctable deformity (Normal medial opening) Meets criteria ☐ Not correctable (Incomplete medial opening) Does not meet criteria
(5) Acceptable Patellofemoral joint X-ray: Skyline	  PFJ acceptable if: - Normal - Medial facet OA, with or without bone loss - Lateral facet OA, <u>without</u> bone loss PFJ not acceptable: - Lateral facet OA, <u>with</u> bone loss, grooving & subluxation	☐ Meets criteria ☐ Does not meet criteria

Fig. 2. Oxford radiological decision aid.

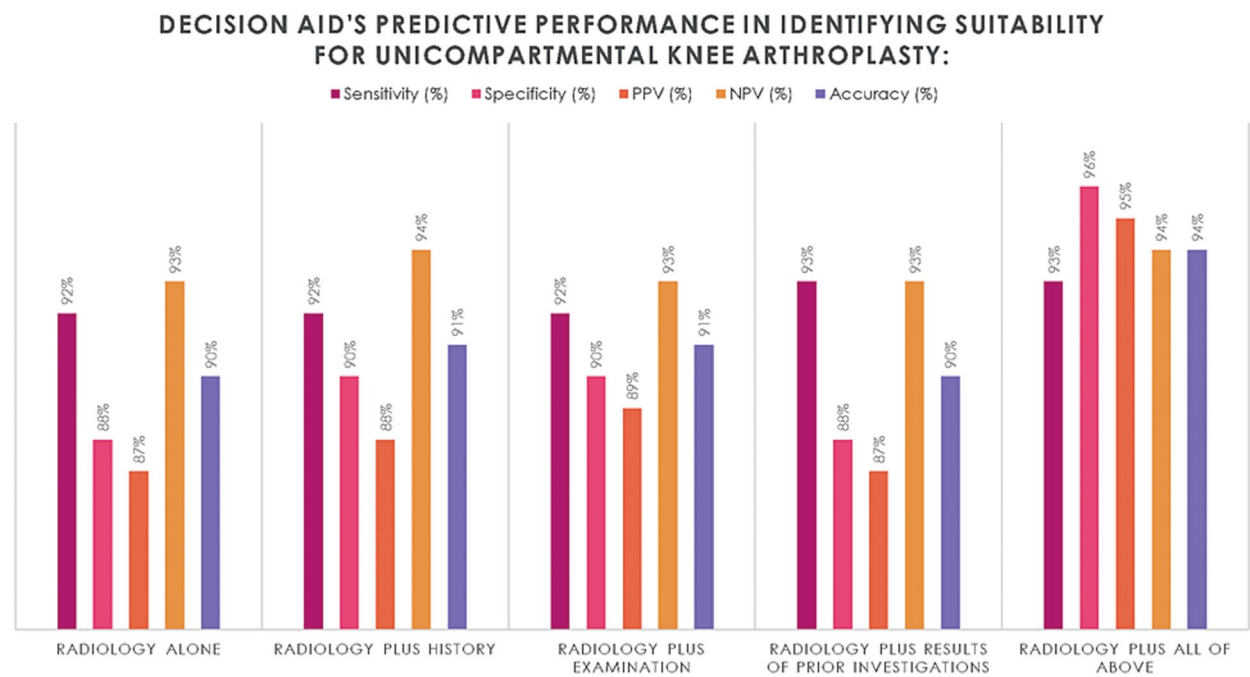


Fig. 3. Decision aid's predictive performance in identifying suitability for unicompartmental knee arthroplasty.

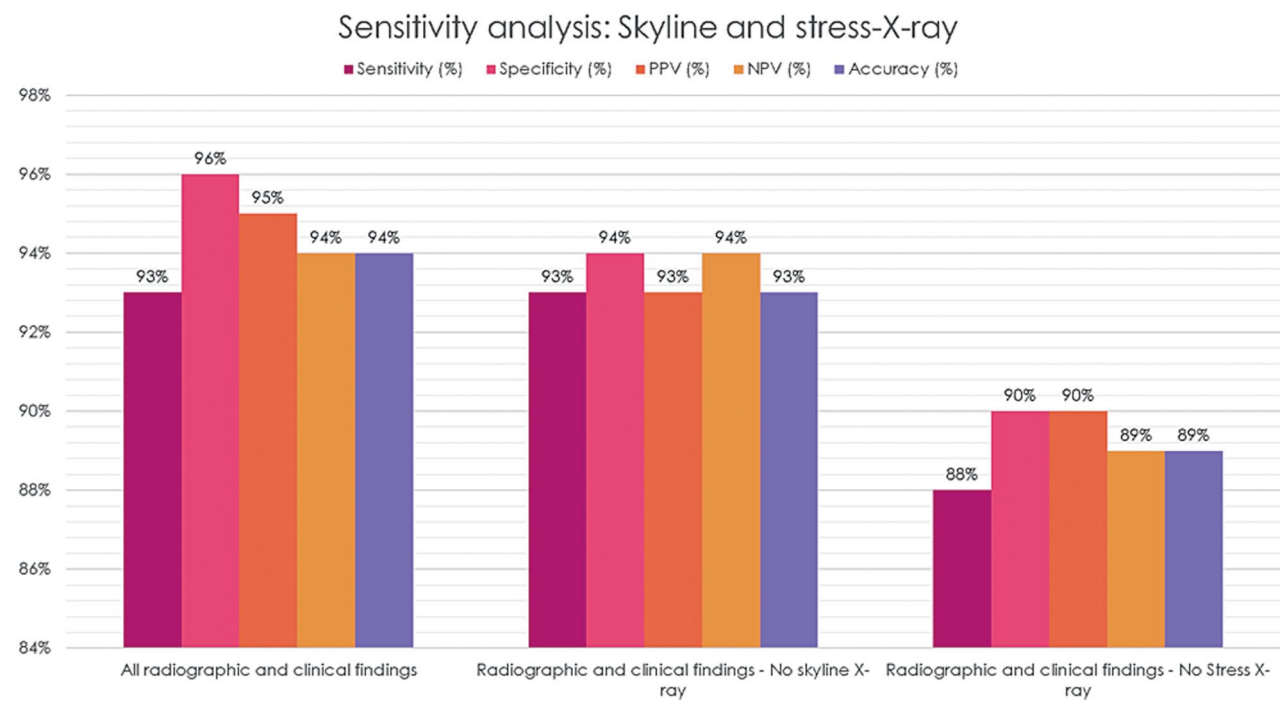


Fig. 4. Sensitivity analysis of skyline and stress X-rays.

51% (199 knees) were not deemed suitable. Remarkably high levels of agreement were observed, both within observers (intraobserver agreement with Cohen's kappa of 0.90) and between different observers (interobserver agreement with Cohen's kappa of 0.85).

Among the knees identified as unsuitable for OUKA (51%), 40% (79 knees) failed to meet a single radiographic criterion, 38% (75 knees) fell short of meeting two criteria, 22% (43 knees) did not meet the three criteria, and an

insignificant portion <1% (1 knee) did not fulfill the four criteria (Fig. 5).

In knees that did not meet the radiographic criteria, observations were as follows: 67 knees (46%) showed partial-thickness cartilage loss in the medial compartment, 69 (45%) exhibited posterior bone loss on true lateral radiographs, signifying ACL insufficiency, 113 (67%) displayed evidence of lateral compartment disease, 21 (11%) demonstrated signs of MCL shortening, and 31 (16%)

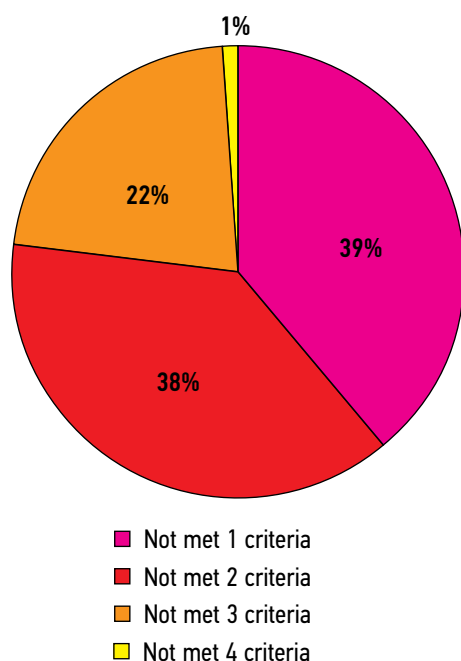


Fig. 5. Radiographic assessment of X-rays.

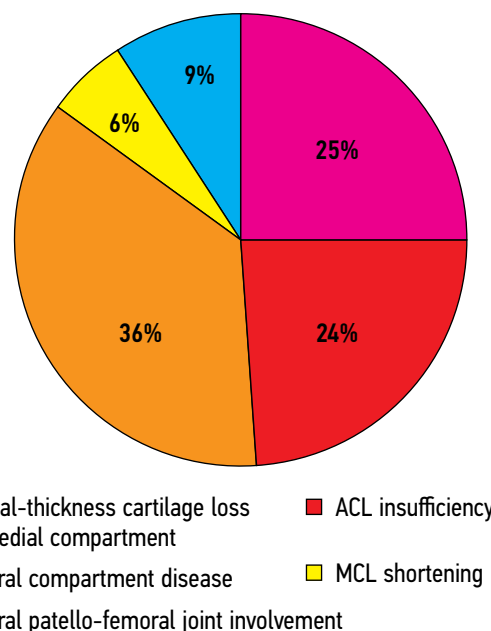


Fig. 6. Specific findings in X-rays of patients that failed to meet the criteria.

exposed evidence of bone loss with grooving affecting the lateral patello-femoral joint (Fig. 6).

Undesirable phenomena

No undesirable phenomenon was observed in this study.

DISCUSSION

The X-KIDS was conducted based on the evaluation of five radiographic views, namely, standing AP, lateral, PA, varus, and valgus stress views. The knees were assessed for narrowing, presence of osteophytes, and subluxation in the coronal and sagittal planes [7].

The evaluation for joint space narrowing included examining both the medial and lateral compartments. A compartment is deemed narrowed when bone-on-bone arthritis is detected in standing AP, standing PA 15° flexion, or varus and valgus stress views. Upon identifying the bone-on-bone arthritis compartment, 3 points were credited, provided that the opposite knee compartment maintains a joint space width of ≥ 5 mm on all views. However, if the joint space width in the other compartment is < 5 mm, it was scored 6 points [1].

Osteophytes are assigned a score of 1 point for the presence of either a medial or lateral osteophyte. Subluxation is evaluated using both standing AP and lateral views. In the AP view, 1 point is allotted for subluxation; however, this point is deducted if the subluxation is corrected on varus or valgus stress views. Subluxation observed in the lateral view credited 2 points, with a maximum total of 3 points achievable if uncorrectable subluxation is evident on both AP and lateral views [6].

Overall, knees can accumulate a maximum of 10 points. A score of 3–4 indicates that UKA is the preferred treatment. A score of 5 suggests that UKA might be suitable pending clinical findings and surgical correlation, while a score exceeding 5 points indicates that TKA is the more appropriate choice [6].

However, in clinical practice, the standing radiographs of some patients exhibit bone-on-bone arthritis, particularly in the medial compartment. In such cases, the value of conducting standing AP view in 15° flexion and varus stress views in 20° flexion to further evaluate the medial compartment appears limited because it does not alter the knee scores.

The X-KIDS score raises additional concerns, one of which pertains to the incorporation of osteophytes as a predictive factor for outcomes. However, these osteophytes do not affect functional outcomes or likelihood of surgery failure. Moreover, X-KIDS falls short in its evaluation of the patello-femoral joint. Lastly, inherent problems occurred in the calculation of scores using the X-KIDS system. Given its reliance on a points-based framework, a risk of misinterpretation associated with X-KIDS utilization is possible [7].

Collectively, these findings imply that the Oxford decision aid holds valuable utility in identifying suitable candidates for OUKA among individuals who fulfill the criteria for joint arthroplasty.

Summary of the primary research results

The Oxford radiological decision aid has shown high sensitivity and specificity in predicting the suitability of medial OUKA. Its use is expected to be associated with improved implant durability and better functional outcomes.

Research limitations

The functional outcome of patients selected for UKA was not evaluated in the study.

CONCLUSION

The Oxford radiological decision aid demonstrates high sensitivity and specificity in forecasting the appropriateness of medial OUKA. Its application is anticipated to correlate with superior implant longevity and favorable functional results. Furthermore, the decision aid maintains a low false-positive rate. Given that surgeons meticulously assess the knee during the surgical procedure, any false positives can be promptly recognized, thus averting the occurrence of OUKA in any patients.

ADDITIONAL INFO

Author contribution. All authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication). The greatest contribution is distributed as follows: A. Vijay, H. Pandian — research, data collection and write up; P. Elangovan, A.K. Vijayakumari, A. Ganesh, S.M. Tajudeen — research and write up.

Funding source. The authors state that there is no external funding when conducting the research and preparing the publication.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Consent for publication. The patients gave their written consent for publication of their medical data (date: August 6, 2022).

Acknowledgements. We thank Dr. Nalli R. Uvaraj, Head of the Department, Department of Orthopaedics, Chettinad Hospital and Research Institute, Chennai.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: А. Виджай, Х. Пандиан — проведение исследования, подготовка и написание статьи; П. Элангован, А.К. Виджаякумари, Г. Анантхараман, Ш.М. Таджудин — проведение исследования и написание статьи.

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

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

Информированное согласие. Авторы получили письменное согласие пациентов на публикацию их медицинских данных (06.08.2022).

Благодарности. Авторы выражают свою признательность доктору Налли Р. Уварадж, заведующему отделением ортопедии в больнице и исследовательском институте Четтинад, Ченнай, Индия.

REFERENCES

1. Hsu H, Siwiec RM. Knee Osteoarthritis. In: *StatPearls* [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2023. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK507884/>
2. Lundgren Nilsson Å, Dencker A, Palstam A, et al. Patient-reported outcome measures in osteoarthritis: a systematic search and review of their use and psychometric properties. *RMD Open*. 2018;4(2):e000715. doi: 10.1136/rmdopen-2018-000715
3. McCormack DJ, Puttock D, Godsiff SP. Medial compartment osteoarthritis of the knee: a review of surgical options. *EFORT Open Rev*. 2021;6(2):113–117. doi: 10.1302/2058-5241.6.200102
4. Ode Q, Gaillard R, Batailler C, et al. Fewer complications after UKA than TKA in patients over 85 years of age: A case-control study. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2018;104(7):955–959. doi: 10.1016/j.otsr.2018.02.015
5. Shlomo YB, Blom A, Boulton C, et al. *The National Joint Registry 16th Annual Report 2019* [Internet]. The National Joint Registry. 2019. Available from: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-National-Joint-Registry-16th-Annual-Report-2019-Ben-Shlomo-Blom/e73d48948fb87c3830e881c6f2061dd60b531179>
6. Clement ND, Afzal I, Liu P, et al. The Oxford Knee Score is a reliable predictor of patients in a health state worse than death and awaiting total knee arthroplasty. *Arthroplasty*. 2022;4(1):33. doi: 10.1186/s42836-022-00132-9
7. Oosthuizen C, Burger S, Vermaak D, et al. The X-Ray Knee instability and Degenerative Score (X-KIDS) to determine the preference for a partial or a total knee arthroplasty (PKA/TKA). *SA Orthopaedic Journal*. 2015;14(3):61–69. doi: 10.17159/2309-8309/2015/v14n3a7

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hsu H., Siwiec R.M. Knee Osteoarthritis. B: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2023. Режим доступа: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK507884/>
2. Lundgren Nilsson Å., Dencker A., Palstam A., et al. Patient-reported outcome measures in osteoarthritis: a systematic search and review of their use and psychometric properties // RMD Open. 2018. Vol. 4, № 2. P. e000715. doi: 10.1136/rmdopen-2018-000715
3. McCormack D.J., Puttock D., Godsiff S.P. Medial compartment osteoarthritis of the knee: a review of surgical options // EFORT Open Rev. 2021. Vol. 6, № 2. P. 113–117. doi: 10.1302/2058-5241.6.200102
4. Ode Q., Gaillard R., Batailler C., et al. Fewer complications after UKA than TKA in patients over 85 years of age: A case-control

study // Orthop Traumatol Surg Res. 2018. Vol. 104, № 7. P. 955–959. doi: 10.1016/j.otsr.2018.02.015

5. Shlomo Y.B., Blom A., Boulton C., et al. The National Joint Registry 16th Annual Report 2019 [Internet]. The National Joint Registry. 2019. Режим доступа: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-National-Joint-Registry-16th-Annual-Report-2019-Ben-Shlomo-Blom/e73d48948fb87c3830e881c6f2061dd60b531179>

6. Clement N.D., Afzal I., Liu P., et al. The Oxford Knee Score is a

reliable predictor of patients in a health state worse than death and awaiting total knee arthroplasty // Arthroplasty. 2022. Vol. 4, № 1. P. 33. doi: 10.1186/s42836-022-00132-9

7. Oosthuizen C., Burger S., Vermaak D., et al. The X-Ray Knee instability and Degenerative Score (X-KIDS) to determine the preference for a partial or a total knee arthroplasty (PKA/TKA) // SA Orthopaedic Journal. 2015. Vol. 14, № 3. P. 61–69. doi: 10.17159/2309-8309/2015/v14n3a7

AUTHORS' INFO

Aswin Vijay, postgraduate student;
ORCID: 0009-0008-2075-2046;
e-mail: aswin7009@gmail.com

* **Haemanath Pandian**, associate professor;
address: Chettinad Health City, SH 49A, Kelambakkam, Tamil Nadu 603103, India;
ORCID: 0000-0002-6268-9478;
e-mail: haemanath@gmail.com

Pradeep Elangovan, professor;
ORCID: 0000-0003-0312-2428;
e-mail: prad_87@yahoo.co.in

Arunkumar K. Vijayakumari, associate professor;
ORCID: 0000-0001-8590-0988;
e-mail: arun5684@gmail.com

Ganesh Anantharaman, associate professor;
ORCID: 0000-0002-0692-6213;
e-mail: aganesh.anantharaman@gmail.com

Sheik M. Tajudeen, senior resident;
ORCID: 0009-0008-9491-0983;
e-mail: sheik.145@gmail.com

Rajan Raghu,
ORCID: 0009-0008-5430-6175
e-mail: rahul_2022@ymail.com

ОБ АВТОРАХ

Асвин Виджай, аспирант;
ORCID: 0009-0008-2075-2046;
e-mail: aswin7009@gmail.com

* **Хаманатх Пандиан**, доцент;
адрес: Город здоровья Четтинад, SH 49A, Келамбаккам, Тамилнад, 603103, Индия;
ORCID: 0000-0002-6268-9478;
e-mail: haemanath@gmail.com

Прадип Элангован, профессор;
ORCID: 0000-0003-0312-2428;
e-mail: prad_87@yahoo.co.in

Арункумар К. Виджаякумари, доцент;
ORCID: 0000-0001-8590-0988;
e-mail: arun5684@gmail.com

Ганеш Анантхараман, доцент;
ORCID: 0000-0002-0692-6213;
e-mail: aganesh.anantharaman@gmail.com

Шейх М. Таджудин, старший ординатор;
ORCID: 0009-0008-9491-0983;
e-mail: sheik.145@gmail.com

Раджан Рагхул;
ORCID: 0009-0008-5430-6175;
e-mail: rahul_2022@ymail.com

* Corresponding author / Автор, ответственный за переписку

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto611025>

Применение ортезов в комплексной реабилитации детей, перенёсших онкологическое эндопротезирование

А.В. Петриченко¹⁻³, Е.А. Иванова¹, И.А. Шавырин¹, Е.А. Букреева^{1,3}, Б.В. Курдюков¹,
К.Ф. Савлаев¹, А.А. Очкуренко^{2,4}, Н.М. Иванова^{1,2}

¹ Научно-практический центр специализированной медицинской помощи детям им. В.Ф. Войно-Ясенецкого, Москва, Россия;

² Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования, Москва, Россия;

³ Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова, Москва, Россия;

⁴ Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Актуальность проблемы медицинской реабилитации детей, перенёсших заболевание костной саркомой, чрезвычайно высока и обусловлена заболеваемостью наиболее социально значимого контингента населения, увеличением продолжительности жизни пациентов, страдающих костными саркомами, а также развитием отдалённых ортопедических последствий, что требует поиска высокоэффективных многокомпонентных программ не только лечения, но и реабилитации.

Цель. Максимальное восстановление для остаточных способностей качества жизни детей, больных костными саркомами, с помощью применения ортезов в различные периоперационные периоды.

Материалы и методы. В исследование были включены 61 пациент с заболеваниями опухолью костей, получавшие противоопухолевое лечение, перенёсшие хирургическое вмешательство в объёме удаления опухоли с имплантацией эндопротеза. Медицинская реабилитация начиналась с момента постановки диагноза и проводилась во все периоды противоопухолевой терапии для адаптации пациента к проводимому лечению, восстановления функций в послеоперационном периоде и во время ремиссии и минимизации последствий агрессивного специального лечения.

Результаты. Оценка функционального результата проводилась по международной шкале MSTS. Функция конечности по шкале MSTS была оценена через 12 и 24 месяца после операции. Неудовлетворительных результатов получено не было. В течение 24 месяцев функциональный результат улучшился.

Заключение. Необходимы динамически изменяющаяся индивидуальная программа реабилитации детей с костными саркомами, соответствующая состоянию и потребностям пациента на момент наблюдения, индивидуальный подбор ортезов, а также своевременная хирургическая коррекция ортопедических последствий, которая должна выполняться в стационарах ортопедического профиля.

Ключевые слова: костные саркомы; эндопротезирование; реабилитация; ортезирование.

Как цитировать:

Петриченко А.В., Иванова Е.А., Шавырин И.А., Букреева Е.А., Курдюков Б.В., Савлаев К.Ф., Очкуренко А.А., Иванова Н.М. Применение ортезов в комплексной реабилитации детей, перенёсших онкологическое эндопротезирование // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2024. Т. 31, № 3. С. 315–324. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto611025>

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto611025>

Use of orthoses in complex rehabilitation of children that have underwent oncological arthroplasty

Anna V. Petrichenko^{1–3}, Evgeniya A. Ivanova¹, Ilya A. Shavyrin¹, Elena A. Bukreeva^{1,3}, Boris V. Kurdyukov¹, Kazbek F. Savlaev¹, Aleksandr A. Ochkurenko^{2,4}, Nadezhda M. Ivanova^{1,2}

¹ V.F. Voyno-Yasenetsky Scientific and Practical Center of Specialized Medical Care for Children, Moscow, Russia;

² Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, Moscow, Russia;

³ N.I. Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia;

⁴ N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopaedics, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The urgency of medical rehabilitation for children with bone sarcoma is extremely high due to the significant impact on a socially important population and the increasing life expectancy of patients with bone sarcomas, leading to long-term orthopedic complications. This necessitates the development of highly effective, comprehensive programs not only for treatment but also for rehabilitation.

AIM: Maximizing the recovery of residual quality of life abilities in children with bone sarcomas through the use of orthoses during various perioperative periods.

MATERIALS AND METHODS: The study included 61 patients with bone tumors who underwent anti-tumor treatment and surgical intervention involving tumor removal with endoprosthesis implantation. Medical rehabilitation began from the moment of diagnosis and was conducted throughout all periods of anti-tumor therapy to help patients adapt to the treatment, restore functions in the postoperative period, and during remission, as well as to minimize the effects of aggressive specialized treatment.

RESULTS: The functional outcome was assessed using the international MSTS scale. Limb function according to the MSTS scale was evaluated 12 and 24 months after surgery. No unsatisfactory results were observed. Functional outcomes improved over the course of 24 months.

CONCLUSION: A dynamically evolving individualized rehabilitation program for children with bone sarcomas is necessary, tailored to the patient's condition and needs at the time of observation, along with personalized selection of orthoses and timely surgical correction of orthopedic consequences, which should be performed in orthopedic specialized hospitals.

Keywords: bone sarcomas; arthroplasty; rehabilitation; orthotics.

To cite this article:

Petrichenko AV, Ivanova EA, Shavyrin IA, Bukreeva EA, Kurdyukov BV, Savlaev KF, Ochkurenko AA, Ivanova NM. Use of orthoses in complex rehabilitation of children that have underwent oncological arthroplasty. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2024;31(3):315–324. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto611025>

ОБОСНОВАНИЕ

Актуальность проблемы медицинской реабилитации детей, перенёсших заболевание костной саркомой, чрезвычайно высока и обусловлена заболеваемостью наиболее социально значимого контингента населения, увеличением продолжительности жизни пациентов, страдающих костными саркомами, а также развитием отдалённых ортопедических последствий, что требует поиска высокоэффективных многокомпонентных программ не только лечения, но и реабилитации. Пациенты онкологического профиля с вовлечением в патологический процесс сегментов опорно-двигательного аппарата зачастую подвергаются высокотехнологическому оперативному лечению. Как правило, это обширные операции, требующие длительного послеоперационного восстановления. И без своевременно начатой адекватной физической реабилитации невозможно полноценно восстановить утерянные или сниженные функции конечности [1]. На сегодняшний день обоснованным, обладающим необходимым терапевтическим действием является комплексный подход к ранней реабилитации больных с костными саркомами с использованием эндопротезирования в сочетании с реконструктивно-пластическими операциями, ортезированием и корсетированием, фармакотерапии, лечебной физкультуры и физиотерапии (локальных низкочастотных магнито-, лазеро-, электротерапии) [2].

За последние годы выживаемость онкологических пациентов улучшилась. Поэтому в настоящее время становится актуальным не только специализированное лечение, но и улучшение качества жизни. Реабилитация, проводимая до хирургического этапа лечения костных сарком, так называемая пререабилитация, может помочь повысить толерантность к токсичным и вредным нежелательным эффектам [3]. Пререабилитация начинается после постановки диагноза. Она включает физическую и психологическую оценку, которая устанавливает исходный функциональный уровень, выявляет нарушения и помогает снизить частоту и/или тяжесть будущих последствий. При эффективном назначении физических упражнений пререабилитация полезна для сокращения продолжительности пребывания в больнице и послеоперационных осложнений, а также улучшения восстановления и качества жизни после операции [4].

В основные направления реабилитации, помимо восстановительных медицинских мероприятий, реконструктивной хирургии и санаторно-курортного лечения, входят протезирование и ортезирование. Во исполнение статьи 10 Федерального закона «О социальной защите инвалидов в Российской Федерации» Правительством Российской Федерации 30 декабря 2005 г. было принято распоряжение № 2347-р об утверждении Федерального перечня реабилитационных мероприятий, технических средств реабилитации и услуг, предоставляемых инвалиду. Ортезы, согласно Федеральному перечню, относятся

к техническим средствам реабилитации [5]. Ортез (от греч. *orthos* — прямой, правильный) — это техническое средство, применяемое для фиксации, разгрузки, коррекции, активизации и, в конечном итоге, восстановления или замещения функции при патологических состояниях сегментов конечности или туловища. Ортезирование входит в основные направления реабилитации, помимо восстановительных медицинских мероприятий, реконструктивной хирургии и санаторно-курортного лечения, и представляет особый вид реабилитации, направленный на восстановление функции отдельных органов с использованием ортезов. Ортезирование как метод реабилитации позволяет добиться ранней вертикализации и нагрузки поражённой конечности, что способствует восстановлению функционального состояния в максимально короткие сроки [6]. Ортезы используются при лечении нестабильности сустава, ограничении функции, после ортопедических операций для разработки, стабилизации и защиты суставов [7]. Ортезирование позволяет достичь раннего дозированного увеличения динамической нагрузки повреждённого коленного сустава, что приводит к стабильному улучшению функции повреждённого сегмента у детей [8]. Современные ортезы для пациентов при отвисающей стопе позволяют улучшить функцию нижней конечности, опороспособность и устойчивость при стоянии, рисунок походки [9], в том числе у детей, больных злокачественными опухолями, получающих химиотерапию [10]. Основная функция ортезов — это разгрузка повреждённого участка кости [11]. Эффект разгрузки при наложении ортеза связан, очевидно, с тем, что часть массы тела снимается с трубчатых костей, переносится на корпус ортеза и передаётся на опору через него [12]. Ортезирование применяется при сложных операциях, таких как резекции костей таза или субтотальная резекция большеберцовой кости по поводу сарком, позволяет ходить с опорой на костыли [13, 14]. Шарнирные ортезы широко применяются с целью иммобилизации/фиксации постоянно или периодически, в зависимости от этапа реабилитации при эндопротезировании крупных суставов конечностей у детей и взрослых [15, 16], либо при удалении эндопротеза вследствие нестабильности [17]. У всех пациентов, перенёсших технически сложное эндопротезирование плечевого либо тазобедренного сустава, обосновано применение иммобилизации конечности в отводящем ортезе сроком на 5–6 недель с целью профилактики вывиха [18–20].

Хирургическое лечение больных костными саркомами может быть сопряжено с целым рядом осложнений и последствий, связанных с необходимостью удаления большого объёма тканей и сложной реконструкцией. При эндопротезировании крупных суставов развиваются осложнения хирургического лечения — как механические, так и инфекционные, что требует выполнения реэндопротезирования. Ортопедические последствия противоопухолевого лечения детей, больных костными саркомами, также неизбежны, связаны с объёмом

Таблица 1. Характеристика пациентов, больных саркомами костей

Table 1. Patients' data

Показатель	n	%
Всего	61	100
Мальчики	36	59,0
Девочки	25	41,0
Возраст	4–8 лет, M=12,28±0,493; Me=13,00 [9,00; 16,00]	
Остеосаркома	46	75,4
Саркома Юинга	10	16,4
Хондросаркома	2	3,3
Аневризмальная костная киста	1	1,6
Метастазы в длинные трубчатые кости	2	3,3
Диссеминированные	21	34,4
Патологический перелом	7	11,5

и агрессивностью проведённого противоопухолевого лечения, в том числе лучевого и хирургического, и анатомо-функциональными особенностями активно растущего детского организма. С целью профилактики осложнений и последствий целесообразно проведение ранней медицинской реабилитации [21].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Проведено ретроспективное открытое нерандомизированное контролируемое когортное исследование.

Критерии соответствия

В настоящее исследование были включены 61 пациент, перенёвшие заболевание опухолями костей и получавшие противоопухолевое лечение в ГБУЗ «Научно-практический центр специализированной медицинской помощи детям им. В.Ф. Войно-Ясенецкого ДЗМ» с 2011 по 2023 г. (табл. 1).

Способ медицинского вмешательства

Программа лечения детей, больных костными саркомами, состояла из неоадьювантной полихимиотерапии (ПХТ), локального контроля опухоли хирургическим и/или лучевым методом, адьювантной полихимиотерапии и сопровождалась коррекцией последствий противоопухолевой терапии и болезни по мере их развития.

Медицинская реабилитация начиналась с момента постановки диагноза и проводилась во все периоды противоопухолевой терапии с целью адаптации пациента к проводимому лечению, а также для восстановления функций в послеоперационном периоде и в ремиссии для минимизации последствий агрессивного специального лечения (рис. 1).

Хирургическое лечение в объёме удаления опухоли с имплантацией эндопротеза перенесли 61 (100%) пациент.

Целью реабилитационного лечения было восстановление максимального для остаточных способностей качества жизни детей, больных костными саркомами. Медицинская реабилитация проводилась с момента установления диагноза (ранняя, или пререабилитация) до окончания специального противоопухолевого лечения и в ремиссии у пациентов с последствиями специального лечения и болезни.

В предоперационном периоде (пререабилитации) ношение ортеза показано во весь период проведения полихимиотерапии при наличии остеолитического процесса,

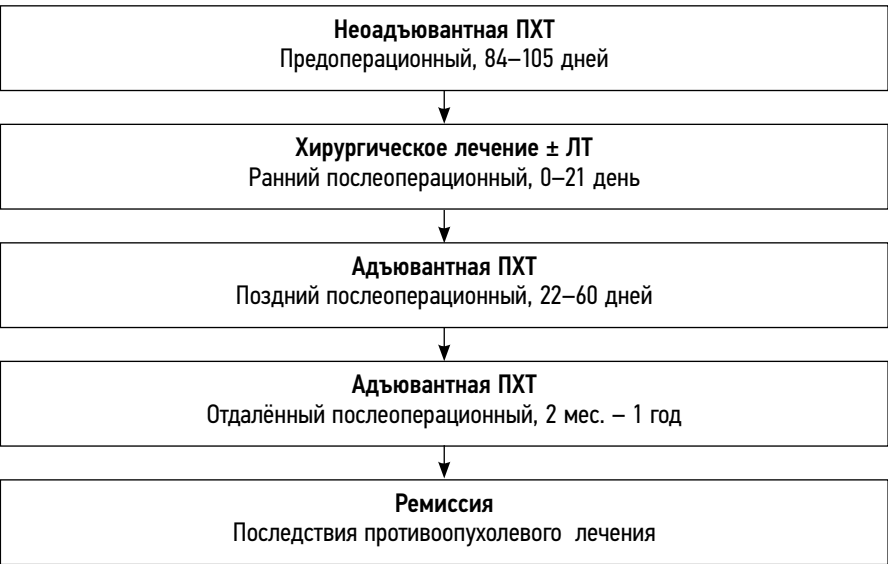


Рис. 1. Схема соотношения периодов реабилитации и этапов противоопухолевой терапии.
Примечание. ПХТ — полихимиотерапия, ЛТ — лучевая терапия.

Fig. 1. Scheme of correlation between rehabilitation periods and stages of antitumour therapy.
Note. ПХТ — polychemotherapy, ЛТ — radiation therapy.



Рис. 2. Классификация эндопротезов.

Fig. 2. Classification of endoprotheses.

патологического перелома или опухолевой контрактуры. Ортезы применялись с момента установления наличия патологического очага. Основная функция ортезов в данном периоде — это иммобилизация с целью фиксации отломков, уменьшения болевого синдрома, повышения опороспособности либо разгрузки повреждённого участка кости. Ношение ортеза показано во весь период проведения ПХТ при наличии остеолитического процесса вследствие угрозы развития патологического перелома.

В раннем послеоперационном периоде ортезирование как метод реабилитации позволяет добиться ранней вертикализации и нагрузки поражённой конечности, что способствует восстановлению функционального состояния в максимально короткие сроки. Ортез надевался в палате реанимации в 1–2-е сутки после операции на фоне обезболивания, седации.

Начиная с 21-х суток и до окончания противоопухолевого лечения, в позднем и отдалённом послеоперационном периодах, формировались индивидуальные программы реабилитации, соответствующие состоянию и потребностям пациента на момент наблюдения. Ортезы использовались при лечении нестабильности сустава, ограничении функции, после ортопедических операций для разработки, стабилизации и защиты суставов.

Методы регистрации исходов

Применялись следующие методы контроля: контроль исходного состояния, активный, статистический, исторический контроль.

Этическая экспертиза

При проведении клинического исследования были соблюдены требования Хельсинкской декларации 1975 года, пересмотренной в 2008 году, и получено разрешение

локального независимого этического комитета ГБУЗ «Научно-практический центр специализированной медицинской помощи детям им. В.Ф. Войно-Ясенецкого ДЗМ» от 27.04.2023 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

У детей устанавливались все виды онкологических мегаэндопротезов, в том числе удлиняющиеся неинвазивные двухуставные (рис. 2).

Эндопротезирование было выполнено 61 пациенту (табл. 2).

Распределение по конструкции и механизму дистракции показано на рис. 3.

После эндопротезирования у всех пациентов применялись шарнирные ортезы с целью иммобилизации и/или фиксации постоянно или периодически, в зависимости от этапа реабилитации при эндопротезировании

Таблица 2. Установленные онкологические эндопротезы

Table 2. Types and locations of oncological endoprosthesis implanted

Резецированный сустав	n	%
Тотальный большеберцовой кости	1	1,6
Голеностопный	1	1,6
Позвонок	1	1,6
Тотальный плечевой кости	5	8,2
Тазобедренный	6	9,8
Плечевой	6	9,8
Тотальный бедренной кости	10	16,4
Коленный, большеберцовая кость	12	19,7
Коленный, бедренная кость	19	31,1



Рис. 3. Распределение установленных имплантатов по конструкции.

Fig. 3. Distribution of placed implants by construction.

крупных суставов конечностей. Поскольку устанавливались онкологические мегаэндопротезы, предпочтение отдавалось длинным ортезам с регулируемыми шарнирами. При эндопротезировании коленного сустава длина ортеза выбиралась чуть ниже паховой складки до лодыжки. При необходимости в случае неврологических нарушений присоединялась поддержка стопы. При эндопротезировании двухсуставными протезами ортезировалась вся конечность.

При эндопротезировании тазобедренного сустава предпочтение отдавалось конструкциям, позволяющим достичь отведения оперированной конечности, в ряде случаев для достижения отведения у маленьких детей стандартные ортезы дополнялись шинами Виленского. Верхняя конечность ортезировалась абдукционным ортезом. У всех пациентов, перенёсших технически сложное эндопротезирование плечевого либо тазобедренного сустава, обосновано применение иммобилизации конечности в отводящем ортезе сроком на 5–6 недель с целью профилактики вывиха. Следует отметить, что онкологическое эндопротезирование в детском возрасте сопряжено с развитием ряда осложнений. В настоящее время общепринятой считается классификация осложнений эндопротезирования по шкале E.R. Henderson (2014) [22]. Осложнения эндопротезирования были отмечены у 19 (31,1%) пациентов (рис. 4).

Резэндопротезирование вследствие наступивших инфекционных осложнений потребовалось 4 детям (6,5%). Ортезирование конечности выполнялось всем пациентам, перенёсшим резэндопротезирование. Иммобилизация конечности в ортезе осуществлялась всем пациентам,

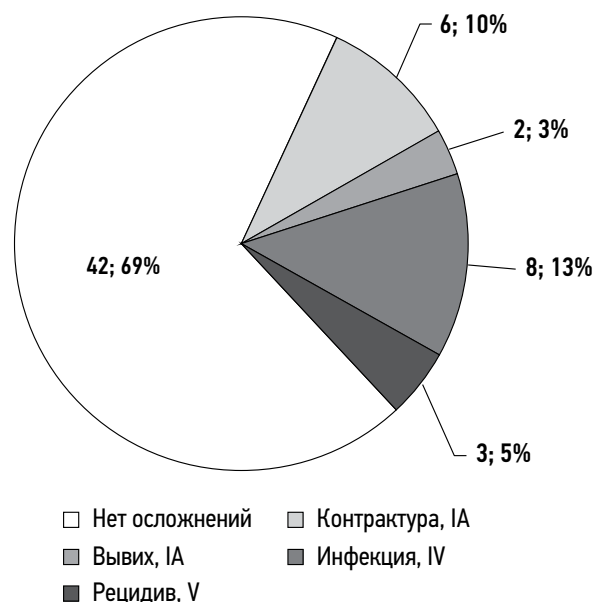


Рис. 4. Распределение осложнений по классификации Henderson.

Fig. 4. Distribution of complications according to the Henderson classification.

перенёсшим установку спейсера, в случае выполнения двухэтапного резэндопротезирования.

Онкологическое эндопротезирование сопряжено с развитием не только осложнений, но и последствий. Ортезирование в ремиссии направлено на коррекцию деформации, уменьшение её прогрессирования и удержание состояния коррекции во время движения. Подбор ортезов осуществлялся индивидуально для повышения опороспособности конечности. При парезе стоп использовались брейсы на голеностопный сустав в сочетании с динамическим стоподержателем.

Пациенты, не достигшие ремиссии или вышедшие из ремиссии вследствие развившегося рецидива, были признаны инкурабельными. Ортезирование проводилось с целью сохранения максимально высокого, насколько это возможно, качества оставшейся у них жизни. Количество и продолжительность любых процедур у паллиативных больных определялись индивидуально, ортезирование применялось для сохранения функции и опороспособности конечности.

Для оценки функционального результата проведённого лечения также использовалась общепринятая международная шкала MSTs (Musculoskeletal Tumor Society) [23], поскольку специальных педиатрических шкал оценки функционального результата в настоящее время не существует. Показатели шкалы MSTs 80–100% расценивали как отличный результат, 60–80% — как хороший, 40–60% — как удовлетворительный, менее 40% от нормальной функции — как неудовлетворительный. Функция конечности по шкале MSTs была оценена через 12 и 24 месяца после операции (табл. 3).

Таблица 3. Оценка функции по шкале MSTS

Table 3. Functional evaluation according to MSTS scale

Сегмент	M±SE; SD		Me [Q25; Q75]	
	12 мес	24 мес	12 мес	24 мес
Коленный, бедренная кость	91,00±3,59 11,353	98,17±0,40 0,983	96,5 [84,0; 98,25]	98,5 [97,00; 99,00]
Коленный, большеберцовая кость	56,00±11,54 30,529	74,50±10,49 25,704	45,0 [35,0; 89,0]	76,5 [51,5; 98,0]
Тотальный, бедренная кость	56,80±12,43 27,806	52,00±3,51 6,083	45,0 [33,5; 86,0]	55,0 [45,0; –]
Плечевой	77,00±5,89 13,191	88,025±3,96 7,93	79,0 [65,0; 88,0]	90,0 [80,00; 94,75]
Тазобедренный	75,60±5,56 12,442	85,67±6,00 10,408	78,0 [65,0; 85,0]	98,0 [74,00; –]
Тотальный плечевой	69,00±12,01 20,809	83,67±6,23 10,79	58,0 [56,0; –]	79,0 [76,0; –]

Как видно из представленной таблицы, неудовлетворительных результатов получено не было, в течение 24 месяцев функциональный результат улучшился.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение мы хотели бы остановиться на ряде вопросов, которые, как ни странно, довольно часто возникают у детских онкологов:

- Можно ли считать выраженный болевой синдром при злокачественном образовании противопоказанием для ортезирования? Нет, поскольку, выполняя иммобилизационную функцию, ортез способствует уменьшению болевого синдрома;
- Как долго нужно носить ортез? Срок ношения ортеза определяется индивидуально, зависит от объёма поражения конечности, осложнений и последствий;
- Способствует ли ортез развитию остеопороза? Нет, он позволяет адекватно нагружать конечность;
- Способствует ли ортез усугублению мышечной атрофии? Нет, он способствует поддержанию нормального мышечного тонуса;
- Какой ортез лучше: индивидуально изготовленный или готовый? Идеального ортеза не существует.

Подход к ортезированию однозначно должен быть индивидуальным, поскольку необходимо решать уникальные проблемы конкретного больного. Безусловно, ортезирование позволяет достичь раннего дозированного увеличения динамической нагрузки повреждённого сустава, что приводит к стабильному улучшению функции повреждённого сегмента у детей. Современные ортезы позволяют улучшить функцию конечности, опороспособность и устойчивость при стоянии, рисунок походки, в том числе у детей, больных злокачественными опухолями, как на фоне противоопухолевой терапии, так и в ремиссии. Необходимы динамически изменяющаяся индивидуальная программа реабилитации,

соответствующая состоянию и потребностям пациента на момент наблюдения, индивидуальный подбор ортезов, а также своевременная хирургическая коррекция, которая должна выполняться в стационарах ортопедического профиля. Профилактика осложнений и ортопедических последствий у детей с костными саркомами достигается ранним проведением комплексных реабилитационных мероприятий, включающих методы кинезитерапии, физиотерапии, ортезирования, корригирующих оперативных вмешательств и медикаментозной поддержки.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

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

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

ADDITIONAL INFO

Author contribution. All authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Funding source. The authors state that there is no external funding when conducting the research and preparing the publication.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлова О.Ю., Калимуллина А.Ф., Гаврилова Е.А. Физическая реабилитация пациентов онкологического профиля с патологией опорно-двигательного аппарата после высокотехнологического оперативного лечения. В кн.: Спортмед–2018: Сборник материалов тезисов XIII Международной научной конференции по вопросам состояния и перспективам развития медицины в спорте высших достижений, Пятой научно-практической конференции, XII Международной научной конференции молодых учёных, Москва, 06–07 декабря 2018 г. Москва: Российская ассоциация по спортивной медицине и реабилитации больных и инвалидов, 2018. С. 159. EDN: YWKONZ
2. Грушина Т.И., Тепляков В.В. Физиотерапия при ранней реабилитации больных с костными саркомами после эндопротезирования крупных костей и суставов // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. 2018. Т. 17, № 4. С. 192–198. doi: 10.18821/1681-3456-2018-17-4-192-198
3. Andrews C.C., Siegel G., Smith S. Rehabilitation to Improve the Function and Quality of Life of Soft Tissue and Bony Sarcoma Patients // Patient Related Outcome Measures. 2020. Vol. 10. P. 417–425. doi: 10.2147/PROM.S130183
4. Chowdhury R.A., Brennan F.P., Gardiner M.D. Cancer Rehabilitation and Palliative Care-Exploring the Synergies // J Pain Symptom Manage. 2020. Vol. 60, № 6. P. 1239–1252. doi: 10.1016/j.jpainsymman.2020.07.030
5. Федеральный перечень реабилитационных мероприятий, технических средств реабилитации и услуг, предоставляемых инвалиду (в ред. распоряжения Правительства РФ № 1980-р от 12.11.2010), утверждён распоряжением Правительства Российской Федерации № 2347-р от 30 декабря 2005 г. Режим доступа: <https://www.diaconia.ru/federalnyj-perechen-reabilitacionnykh-meropriyatij-tekhnicheskikh-sredstv-reabilitacii-i-uslug-predostavlyaemykh-invalidu?ysclid=lyt2m2s6km927288449>
6. Сергеев С.В., Спивак Б.Г. Медицинская реабилитация с использованием ортезирования // Медико-социальные проблемы инвалидности. 2017. № 2. С. 36–41. EDN: YZBWON
7. Никитин С.Е., Пихлак А.Э., Гаркави А.В., Мутьева Н.А. Роль и место ортезотерапии в медико-социальной реабилитации больных с поражением костно-суставной системы // Российский медицинский журнал. 2013. № 6. С. 44–48. EDN: RWILXD
8. Васильев М.В., Рябчиков И.В. Раннее дозированное увеличение динамической нагрузки при повреждении капсульно-связочного аппарата коленного сустава // Практическая медицина. 2016. № 7(99). С. 25–27. EDN: XBGZTZ
9. Хмелевская И.О., Роман Л.К., Бобошко Р.А., Солнцева И.Л. Влияние силиконового ортеза на ходьбу больных при отвисающей стопе // Ортопедия, травматология и протезирование. 2012. № 2(257). С. 80–83. EDN: QBYNUZ
10. Tanner L.R., Hooke M.C., Hinshon S., et al. Effect of an Ankle Foot Orthosis Intervention for Children With Non-Central Nervous System Cancers: A Pilot Study // Pediatr Phys Ther. 2015. Vol. 27, № 4. P. 425–431. doi: 10.1097/PEP.0000000000000180
11. Кейер А.Н., Рожков А.В. Руководство по протезированию и ортезированию. Санкт-Петербург: Крисмас+, 1999. 624 с. EDN: ZATKCT
12. Дашевский И.Н., Никитин С.Е. Биомеханика разгрузки нижних конечностей при ортезировании // Российский журнал биомеханики. 2016. Т. 20, № 2. С. 134–149. EDN: WHKMCV
13. Toge Y., Tajima F., Narikawa N., et al. A novel thoracic weight-bearing long-leg orthosis that permits ambulation after massive pelvic tumor resection // Arch Phys Med Rehabil. 2006. Vol. 87, № 7. P. 1007–1012. doi: 10.1016/j.apmr.2006.03.001
14. Нисиченко Д.В., Хестанов Д.Б., Михайлова Е.В., и др. Субтотальная резекция большеберцовой кости в НИИ Детской онкологии и гематологии ФГБУ «РОНЦ им. Н.Н. Блохина» Минздрава России // Саркомы костей, мягких тканей и опухоли кожи. 2017. № 1. С. 52–58. EDN: YOCZXB
15. Большаков Н.А., Щупак М.Ю., Талыпов С.Р., и др. Первый опыт применения модульных онкологических эндопротезов в лечении сарком костей в ФГБУ ФНКЦ ДГОИ им. Дмитрия Рогачёва // Российский журнал детской гематологии и онкологии. 2014. № 4. С. 48–54. EDN: TJCDPL
16. Мурылёв В., Холодаев М., Елизаров П., и др. Эндопротезирование коленного сустава при его массивных деструкциях у ортопедических больных // Врач. 2012. № 2. С. 74–81. EDN: OWAHNT
17. Неверов В.А., Мирошниченко О.И., Мирошниченко А.П. Особенности реабилитации пациентов после неинфекционных осложнений тотального эндопротезирования тазобедренного сустава // Вестник хирургии им. И.И. Грекова. 2016. № 2. С. 66–72. EDN: VUTARR
18. Schneiderbauer M.M., Sierra R.J., Schleck C., et al. Dislocation rate after hip hemiarthroplasty in patients with tumor-related conditions // J Bone Joint Surg Am. 2005. Vol. 87. P. 1810–1815. doi: 10.2106/JBJS.D.02830
19. Тихилов Р.М., Пташников Д.А., Засульский Ф.Ю., и др. Ближайшие и среднесрочные результаты эндопротезирования тазобедренного сустава при опухолях проксимального отдела бедренной кости // Травматология и ортопедия России. 2014. № 2(72). С. 14–21. EDN: SIWBNR
20. Чирков Н.Н., Каминский А.В., Поздняков А.В. Среднесрочные функциональные исходы тотального эндопротезирования плечевого сустава с использованием реверсивного эндопротеза // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 3. С. 486–495. EDN: SYZQUB
21. Петриченко А.В. Ортопедические последствия, осложнения и результаты противоопухолевого лечения костных сарком у детей: автореф. дис. ... д-ра мед. наук. Москва, 2020. 46 с. EDN: BZNZFW
22. Henderson E.R., O'Connor M.I., Ruggieri P., et al. Classification of failure of limb salvage after reconstructive surgery for bone tumours: a modified system Including biological and expandable reconstructions // Bone Joint J. 2014. Vol. 96-B, № 11. P. 1436–40. doi: 10.1302/0301-620X.96B11.34747
23. Enneking W.F., Dunham W., Gebhardt M.C., et al. A system for the functional evaluation of reconstructive procedures after surgical treatment of tumors of the musculoskeletal system // Clin Orthop Relat Res. 1993. № 286. P. 241–246.

REFERENCES

1. Pavlova OYu, Kalimullina AF, Gavrilova EA. Physical rehabilitation of oncological patients with pathology of the musculoskeletal system after high-tech surgical treatment. In: *Sportmed-2018: Collection of abstracts of the XIII International Scientific Conference on the state and prospects of development of medicine in high-performance sports, the Fifth Scientific and practical Conference, the XII International Scientific Conference of Young Scientists, Moscow, December 06–07, 2018*. Moscow: Russian Association for Sports Medicine and Rehabilitation of Patients and the Disabled; 2018. P. 159. (In Russ.) EDN: YWKOHZ
2. Grushina TI, Teplakov VV. Physiotherapy in early rehabilitation of patients with bone sarcomas after endoprosthetics of large bones and joints. *Fizioterapiya, bal'neologiya i reabilitaciya*. 2018;17(4):192–198. doi: 10.18821/1681-3456-2018-17-4-192-198
3. Andrews CC, Siegel G, Smith S. Rehabilitation to Improve the Function and Quality of Life of Soft Tissue and Bony Sarcoma Patients. *Patient Related Outcome Measures*. 2020;10:417–425. doi: 10.2147/PROM.S130183
4. Chowdhury RA, Brennan FP, Gardiner MD. Cancer Rehabilitation and Palliative Care-Exploring the Synergies. *J Pain Symptom Manage*. 2020;60(6):1239–1252. doi: 10.1016/j.jpainsymman.2020.07.030
5. *The Federal list of rehabilitation measures, technical means of rehabilitation and services provided to a disabled person* (as amended by Decree of the Government of the Russian Federation No. 1980-r dated 11/12/2010), approved by Decree of the Government of the Russian Federation No. 2347-r dated December 30, 2005. Available from: <https://www.diaconia.ru/federalnyj-perechen-reabilitacionnykh-meropriyatij-tehnicheskikh-sredstv-reabilitacii-i-uslug-predostavlyaemykh-invalidu?ysclid=lyt2m2s6km927288-449> (In Russ.)
6. Sergeev SV, Spivak BG. Medical rehabilitation using orthosis. *Mediko-social'nye problemy invalidnosti*. 2017;(2):36–41. EDN: YZBWON
7. Nikitin SE, Pihlak AE, Garkavi AV, Mutyeva NA. The role and place of orthotherapy in the medical and social rehabilitation of patients with damage to the osteoarticular system. *Rossiiskij medicinskij zhurnal*. 2013;(6):44–48. EDN: RWILXD
8. Vasiliev MV, Ryabchikov IV. Early dosed increase in dynamic load in case of damage to the capsule-ligamentous apparatus of the knee joint. *Prakticheskaya medicina*. 2016;7(99):25–27. EDN: XBGZTZ
9. Khmelevskaya IO, Roman LK, Boboshko RA, Solntseva IL. The effect of silicone orthosis on walking in patients with a sagging foot. *Ortopediya, travmatologiya i protezirovaniye*. 2012;2(257):80–83. EDN: QBYNUZ
10. Tanner LR, Hooke MC, Hinshon S, et al. Effect of an Ankle Foot Orthosis Intervention for Children With Non-Central Nervous System Cancers: A Pilot Study. *Pediatr Phys Ther*. 2015;27(4):425–431. doi: 10.1097/PEP.0000000000000180
11. Keyer AN, Rozhkov AV. *Guidelines for prosthetics and orthotics*. St. Petersburg: Crismas+; 1999. 624 p. EDN: ZATKCT
12. Dashevsky IN, Nikitin SE. Biomechanics of unloading of the lower extremities during orthosis. *Rossiiskij zhurnal biomekhaniki*. 2016;20(2):134–149. EDN: WHKMCV
13. Toge Y, Tajima F, Narikawa N, et al. A novel thoracic weight-bearing long-leg orthosis that permits ambulation after massive pelvic tumor resection. *Arch Phys Med Rehabil*. 2006;87(7):1007–1012. doi: 10.1016/j.apmr.2006.03.001
14. Nisichenko DV, Khestanov DB, Mikhailova EV, et al. Subtotal resection of the tibia at the Research Institute of Pediatric Oncology and Hematology of the Federal State Budgetary Institution "RONC named after N.N. Blokhin" of the Ministry of Health of the Russian Federation. *Sarkomy kostej, myagkih tkanej i opuholi kozhi*. 2017;(1):52–58. EDN: YOCZXB
15. Bolshakov NA, Shchupak MYu, Talypov SR, et al. The first experience of using modular oncological endoprostheses in the treatment of bone sarcomas at the FGBI FNCC DGOI. Dmitry Rogachev. *Rossiiskij zhurnal detskaj gematologii i onkologii*. 2014;(4):48–54. EDN: TJCDPL
16. Murylev V, Kholodaev M, Elizarov P, et al. Endoprosthetics of the knee joint in case of its massive destruction in orthopedic patients. *Vrach*. 2012;(2):74–81. EDN: OWAHHT
17. Neverov VA, Miroshnichenko OI, Miroshnichenko AP. Features of rehabilitation of patients after non-infectious complications of total hip replacement. *Vestnik hirurgii im. I.I. Grekova*. 2016;(2):66–72. EDN: VUTARR
18. Schneiderbauer MM, Sierra RJ, Schleck C, et al. Dislocation rate after hip hemiarthroplasty in patients with tumor-related conditions. *J Bone Joint Surg Am*. 2005;87:1810–1815. doi: 10.2106/JBJS.D.02830
19. Tikhilov RM, Ptashnikov DA, Zasulsky FYu, et al. Short- and medium-term results of hip replacement in tumors of the proximal femur. *Travmatologiya i ortopediya Rossii*. 2014;2(72):14–21. EDN: SIWBNR
20. Chirkov N, Kaminsky AV, Pozdnyakov AV. Medium-term functional outcomes of total shoulder joint replacement using a reversible endoprosthesis. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014;(3):486–495. EDN: SYZQUB
21. Petrichenko AV. *Orthopedic consequences, complications and results of antitumor treatment of bone sarcomas in children* [dissertation]. Moscow; 2020. 46 p. (In Russ.) EDN: BZNZFW
22. Henderson ER, O'Connor MI, Ruggieri P, et al. Classification of failure of limb salvage after reconstructive surgery for bone tumours: a modified system Including biological and expandable reconstructions. *Bone Joint J*. 2014;96-B(11):1436–40. doi: 10.1302/0301-620X.96B11.34747
23. Enneking WF, Dunham W, Gebhardt MC, et al. A system for the functional evaluation of reconstructive procedures after surgical treatment of tumors of the musculoskeletal system. *Clin Orthop Relat Res*. 1993;(286):241–246.

ОБ АВТОРАХ

Петриченко Анна Викторовна, д-р мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0001-6876-7898;
eLibrary SPIN: 6906-6292;
e-mail: a.shvarova@rambler.ru

AUTHORS' INFO

Anna V. Petrichenko, MD, Dr. Sci. (Medicine), professor;
ORCID: 0000-0001-6876-7898;
eLibrary SPIN: 6906-6292;
e-mail: a.shvarova@rambler.ru

Иванова Евгения Александровна;

ORCID: 0000-0001-8042-9090;

eLibrary SPIN: 2922-8306;

e-mail: evgenia_i07@mail.ru

Шавырин Илья Александрович, канд. мед. наук;

ORCID: 0000-0002-1837-3249;

eLibrary SPIN: 3532-2690;

e-mail: shailya@yandex.ru

Букреева Елена Анатольевна;

ORCID: 0000-0001-7660-4933;

eLibrary SPIN: 2813-1090;

e-mail: bukreeva191965@mail.com

Курдюков Борис Вадимович, канд. мед. наук;

ORCID: 0000-0001-6727-0644;

e-mail: bor.kurdukov@gmail.com

Савлаев Казбек Фидарович, канд. мед. наук;

ORCID: 0000-0002-1857-2870;

eLibrary SPIN: 2707-7451;

e-mail: k.savlaev@mail.ru

*** Очкуренко Александр Алексеевич, д-р мед. наук, профессор;**

адрес: Россия, 127299, Москва, ул. Приорова, 10;

ORCID: 0000-0002-1078-9725;

eLibrary SPIN: 8324-2383;

e-mail: cito-omo@mail.ru

Иванова Надежда Михайловна, д-р мед. наук;

ORCID: 0000-0001-5282-0471;

eLibrary SPIN: 3825-8785;

e-mail: det.onco.ivanova@rambler.ru

Evgeniya A. Ivanova, MD;

ORCID: 0000-0001-8042-9090;

eLibrary SPIN: 2922-8306;

e-mail: evgenia_i07@mail.ru

Ilya A. Shavyrin, MD, Cand. Sci. (Medicine);

ORCID: 0000-0002-1837-3249;

eLibrary SPIN: 3532-2690;

e-mail: shailya@yandex.ru

Elena A. Bukreeva;

ORCID: 0000-0001-7660-4933;

eLibrary SPIN: 2813-1090;

e-mail: bukreeva191965@mail.com

Boris V. Kurdyukov, MD, Cand. Sci. (Medicine);

ORCID: 0000-0001-6727-0644;

e-mail: bor.kurdukov@gmail.com

Kazbek F. Savlaev, MD, Cand. Sci. (Medicine);

ORCID: 0000-0002-1857-2870;

eLibrary SPIN: 2707-7451;

e-mail: k.savlaev@mail.ru

*** Aleksandr A. Ochurenko, MD, Dr. Sci. (Medicine), professor;**

address: 10 Priorova str., 127299 Moscow, Russia;

ORCID: 0000-0002-1078-9725;

eLibrary SPIN: 8324-2383;

e-mail: cito-omo@mail.ru

Nadezhda M. Ivanova, MD, Dr. Sci. (Medicine);

ORCID: 0000-0001-5282-0471;

eLibrary SPIN: 3825-8785;

e-mail: det.onco.ivanova@rambler.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto629188>

Differential diagnostics of musculoskeletal pain in spondyloarthrosis and osteoarthritis using magnetic resonance imaging

Yuriy O. Novikov¹, Artem A. Bogachev², Mikhail B. Tsykunov^{3, 4}

¹ Bashkir State Medical University, Ufa, Russia;

² Pirogov National Medical and Surgical Center, Moscow, Russia;

³ N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopaedics, Moscow, Russia

⁴ Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Musculoskeletal pain (MSP) has now become a non-infectious epidemic and is the second leading cause of disability, resulting in a significant loss of productivity among the able-bodied population in all industrialized countries. The main conditions most commonly encountered in outpatient appointments are spondyloarthritis (SA) of the lumbar spine and osteoarthritis (OA) of the knee. These diseases have similar pathogenesis and are accompanied by aseptic inflammation, involvement of muscles and ligaments, leading to the formation of various movement disorders, antinociceptive insufficiency, and peripheral and central sensitization. In this study, the results of magnetic resonance imaging (MRI) are presented, which can be used in early diagnosis of MSP, as well as dynamic control of treatment.

AIM: To evaluate neuroimaging signs in patients with SA and OA depending on the cause of the disease.

MATERIALS AND METHODS: Analytical one-stage study was performed with 158 patients with established clinical diagnosis of MSP, who were divided into four groups: primary knee OA (46 patients), posttraumatic OA (48 patients), spondylogenic OA (40 patients) and OA of 0–I stage (24 patients). To study neuroimaging signs the examination was performed on MRI devices Siemens Magnetom Aera 1.5T and General Electric Signa 1.5T.

RESULTS: MRI examination revealed stage III spondyloarthritis in 47.2% of patients, and stage II in 30.1%. Of the total number of patients, 33.3% had fragmentation of the inner and outer menisci of the knee joint, longitudinal damage of the inner meniscus was detected in 30.1% of cases and osteophytes of the knee joint in 30% of cases. Intervertebral disc sequestration (2.4%) and stage I spondyloarthrosis (7.3%) were the least common. When comparing the groups, more pronounced neuroimaging signs were detected in posttraumatic and primary OA, while they were significantly lower in spondylogenic genesis. No differences between the groups were found in the spine examination.

CONCLUSION: The study showed high informativeness of MRI in OA, which allows early diagnosis and differential diagnosis of the disease.

Keywords: musculoskeletal pain; spondyloarthritis; osteoarthritis; magnetic resonance imaging.

To cite this article:

Novikov YuO, Bogachev AA, Tsykunov MB. Differential diagnostics of musculoskeletal pain in spondyloarthrosis and osteoarthritis using magnetic resonance imaging. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2024;31(3):325–336. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto629188>

Received: 18.03.2024

Accepted: 16.05.2024

Published online: 17.07.2024

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto629188>

Дифференциальная диагностика мышечно-скелетных болей при спондилоартрозе и остеоартрозе с использованием магнитно-резонансной томографии

Ю.О. Новиков,¹ А.А. Богачёв², М.Б. Цыкунов^{3, 4}¹ Башкирский государственный медицинский университет, Уфа, Россия;² Национальный медико-хирургический центр им. Н.И. Пирогова, Москва, Россия;³ Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова, Москва, Россия⁴ Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Мышечно-скелетная боль (МСБ) в настоящее время приняла характер неинфекционной эпидемии и занимает второе место среди причин инвалидности, приводя к существенной потере производительности среди трудоспособного населения во всех индустриально развитых странах. Основными заболеваниями, которые наиболее часто встречаются на амбулаторном приёме, являются спондилоартроз (СА) поясничного отдела позвоночника и остеоартроз (ОА) коленного сустава. Эти заболевания имеют сходный патогенез и сопровождаются асептическим воспалением, вовлечением в процесс мышечного и связочного аппарата, приводящим к формированию разнообразных двигательных нарушений, антиноцицептивной недостаточности, периферической и центральной сенситизации. В данном исследовании представлены результаты магнитно-резонансной томографии (МРТ), которые могут использоваться при ранней диагностике МСБ, а также динамического контроля в процессе лечения.

Цель. Оценка нейровизуализационных признаков у пациентов с СА и ОА в зависимости от генеза заболевания.

Материалы и методы. Выполнено аналитическое одномоментное исследование с участием 158 пациентов с установленным клиническим диагнозом МСБ, которые были разделены на четыре группы: первичный ОА коленного сустава (46 человек), посттравматический ОА (48 человек), спондилогенный ОА (40 человек) и ОА 0–I стадии (24 человека). Для изучения нейровизуализационных признаков обследование проводилось на аппаратах МРТ Siemens Magnetom Aera 1.5T и General Electric Signa 1.5T.

Результаты. При МРТ-обследовании у 47,2% пациентов выявили спондилоартроз III стадии, у 30,1% — II стадии. Из общего количества пациентов 33,3% имели повреждение в виде фрагментации внутреннего и наружного менисков коленного сустава, в 30,1% случаев выявили повреждение внутреннего мениска в виде продольного расщепления и в 30% случаев — остеофиты коленного сустава. Реже всего встречались секвестрация межпозвонкового диска — 2,4% и спондилоартроз I стадии — 7,3%. При сравнении в группах более выраженные нейровизуализационные признаки выявлялись при посттравматическом и первичном ОА, при спондилогенном генезе они были существенно ниже. При исследовании позвоночника различий в группах установлено не было.

Заключение. Исследование показало высокую информативность МРТ при ОА, позволяющую осуществлять раннюю диагностику и проводить дифференциальную диагностику заболевания.

Ключевые слова: мышечно-скелетная боль; спондилоартроз; остеоартроз; магнитно-резонансная томография.

Как цитировать:

Новиков Ю.О., Богачёв А.А., Цыкунов М.Б. Дифференциальная диагностика мышечно-скелетных болей при спондилоартрозе и остеоартрозе с использованием магнитно-резонансной томографии // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2024. Т. 31, № 3. С. 325–336.
DOI: <https://doi.org/10.17816/vto629188>

BACKGROUND

Currently, musculoskeletal pain (MSP) is a crucial medical and social problem, ranking second among the causes of disability according to the Centers for Disease Control and Prevention. It presents an economic burden for society owing to the increased risk of temporary or complete loss of working capacity and decreased labor productivity; in the USA, the annual costs of treating patients with MSP account for 9% of the total national costs [1, 2]. The most common causes of MSP are spondyloarthritis (SA) and osteoarthritis (OA) of the knee joint [3, 4].

Spondyloarthritis (OA of the facet joints of the spine) and gonarthrosis (OA of the knee joint) have a long progressive course. The disease affects the entire complex of joint and periarticular tissues, namely, the synovial membrane, articular cartilage, muscles, and ligamentous apparatus, resulting in the development of pain and impaired joint function and congruence. Notably, the main mechanism of disease development is chronic inflammation, leading to sensitization of nociceptors in the joint area. In SA, inflammation develops as a result of microtrauma of the muscular and ligamentous apparatus of the spine due to static and dynamic overloads, leading to locomotor disorders. Pain and sanogenetic hypertonicity play crucial roles in disease occurrence, which then contributes to the formation of myofascial trigger points. Moreover, OA is accompanied by the development of enthesopathy and inflammation of the synovial bursae, often involving the collateral ligaments and infrapatellar bursa. Furthermore, local damage to the ligamentous apparatus of the spine causes acute back pain in SA. Significant pathogenetic mechanisms leading to chronicity and a progressive disease course include degenerative–dystrophic changes and microcirculation disorders [5–9].

According to the International Classification of Diseases, 10th revision, OA is classified into primary, post-traumatic, secondary, and unspecified. Primary OA is largely due to hereditary predisposition caused by abnormalities in the formation of cartilaginous tissue of the joints that is, it is associated with risk factors. These risk factors include connective tissue dysplasia, sex, age, weight, mechanical overload, and inflammatory, metabolic, and endocrine diseases. [10–12]. Secondary OA is primarily associated with traumatic joint injury. It is often due to articular cartilage damage associated with meniscus injury [13]. Some studies distinguished spondylogenic OA, which is associated with degenerative changes in the spine, which leads to static and dynamic overloads of the knee joint [14–16].

The main imaging modality for SA and OA is radiography, which allows determining the severity of degenerative changes in the joint, assessment of the functional state of the ligamentous apparatus, and differential diagnostics [17, 18].

Moreover, many studies revealed a discrepancy between radiographic changes and the clinical presentation of SA and OA. Hannan et al. [19] studied 6880 patients aged 25–74 years.

Among patients with stage II–IV knee OA, 47% complained of knee pain. A total of 1004 patients (14.6%) reported knee pain; only 15% of them had radiographic changes of stage II–IV OA. Furthermore, Zhou et al. [20, 21] showed the insufficient reliability of radiographic examination in SA. According to the Institute of Rheumatology of the Russian Academy of Medical Sciences [22], radiography does not allow direct visualization of the cartilage, of which thickness can only be determined indirectly by the width of the joint space. The authors point out false-positive and false-negative study results in 40% of those examined. Thus, radiolucent OA was identified, of which development remains controversial [23]. Pain in this variant of OA is believed to be sclerotomic in nature. In this study, the radiolucent type of OA was considered stage 0 knee OA, which emphasized the absence of radiographic signs, but with the presence of a characteristic clinical presentation.

In recent decades, magnetic resonance imaging (MRI) has been widely used to visualize SA and OA, allowing diagnosis of the early signs of the disease. The advantage of MRI is its high-contrast resolution, which enables the detection of even minor differences in soft tissue contrast and obtaining MRI images in any views, identifying various pathologies of the spine and joints, diagnosing degenerative disease of the joint and surrounding tissues, and assessing cartilage thickness [24–27].

This study aimed to evaluate neuroimaging signs in patients with SA and OA depending on the disease origin.

In addition, to radiographic and magnetic resonance staging of the severity of SA and OA, it is crucial to use a rehabilitation diagnosis according to the International Classification of Functioning (ICF). The ICF allows describing joint dysfunctions that have developed in a patient and is a tool for integrating assessment criteria when describing these dysfunctions [28]. It is a descriptive tool, and not a scale.

MATERIALS AND METHODS

Study design

An analytical cross-sectional study was conducted.

Eligibility criteria

The *inclusion criterion* was a diagnosis established at least 1 month before the start of the study.

The *exclusion criteria* were newly diagnosed SA and OA of the knee joint, other concomitant diseases and conditions that prevent the examination, and back and knee pain associated with other specific processes (e.g., cancer, infection).

Study conditions

The study was conducted at the Pirogov National Medical and Surgical Center from October 2023 to December 2023. The assessment included an initial clinical examination of the patient and MRI diagnostics, which was usually performed the following day.

This study was performed as part of medical diagnostic measures conducted in accordance with the standards for the provision of primary healthcare for OA of the knee joint and SA.

Study outcomes

Determination of the incidence of neuroimaging signs in knee OA of various origins.

Subgroup analysis

The criterion for distributing patients were divided into groups based on the origin of knee OA determined during clinical examination, namely, primary, post-traumatic, spondylogenic, and degree 0 osteoarthritis of the knee joint.

Methods for recording outcomes

Each patient underwent a full clinical examination before neuroimaging, including palpation assessment of pain points in periarticular tissues and visual assessment of the range of motion in the knee joints and spinal configuration disorders, such as flattening of the lumbar lordosis, hyperlordosis, and scoliosis, to assess the current state of the lumbosacral spine and knee joints. All patients underwent MRI using Siemens Magnetom Aera 1.5T and General Electric Signa 1.5T in transverse, sagittal, and coronal views, according to T1W, T2W, and STIR with suppression of fat tissue in transverse, sagittal, and coronal views.

Ethical considerations

Voluntary informed consent was obtained from each examined patient with knee OA, which complies with the ethical standards of the Helsinki Declaration (2013).

Statistical analysis

The results were statistically analyzed using the Statistica 13.0 software package. When comparing several groups, the Kruskal–Wallis test was used. $P \leq 0.05$ indicated statistical

significance. The Bayes method was used to calculate the probability of an event (MRI criterion).

RESULTS

Study participants

The study included 158 patients aged 37–72 years (mean age: 58.54 ± 8.36 years) who complained of pain in the knee joints and lumbosacral spine, including 53 men and 105 women (Table 1).

During the clinical examination, the anamnestic characteristics were clarified, namely, the presence of pain and its localization, starting pain, and gait disturbance (lameness). These indicated what preceded the occurrence of OA of the knee joint (e.g., physical activity, injury, and disease). The presence of hereditary factors, metabolic disorders (e.g., diabetes mellitus, gout, and obesity), and unfavorable factors, such as professional environment, uncomfortable postures, monotonous movements, and vibration, were clarified. The range of motion in the lumbar spine and knee joints was assessed, and the presence of painful points and spinal configuration disorders (i.e., flattening of the lumbar lordosis, hyperlordosis, and kyphosis) were detected. Based on the data obtained, primary, post-traumatic, and spondylogenic osteoarthritis and osteoarthritis of the knee joint stage 0 were determined (patients underwent X-ray examination of the knee joints no more than 6 months before the visit). This was used as basis for patient distribution.

To assess the function of the knee joints according to the ICF, we used tables for assessing pain associated with loading (Table 2), joint mobility during testing of the passive range of motion (Table 3), joint mobility during testing of the active range of motion (Table 4), and the ICF assessment of pain during palpation of periarticular tissues (Table 5), proposed by Prof. M.B. Tsykunov [28].

Table 1. Distribution of subjects by sex and age

Age	Male	Female	Total
37–48 years old	7	15	22
49–60 years old	14	27	41
61–72 years old	32	63	95
Total, <i>n</i> (%)	53 (33.5)	105 (66.5)	158 (100)

Table 2. Assessment of pain associated with loading according to ICF (b28015 pain in lower limb)

Sign characteristic	ICF assessment
No pain	0
Inconstant; mild pain is noted with heavy loads, which occurs periodically after excessively prolonged physical activity or physical activity in difficult conditions	1
Constantly noted with impaired stability of the joint or spine (sensation of displacement) and/or heavy and excessively prolonged loads on the joint and/or periodically intensifies with little physical activity and/or noted during walking long distance (more than 2 km)	2
Noted during prolonged walking and inconstantly with household loads	3
Noted during short-distance walking, constantly with household loads or constant severe pain	4

Table 3. Assessment of knee joint mobility according to ICF (b710) during passive movement testing (goniometry)

Sign characteristic	ICF assessment
Passive range of motion is not limited (96%–100% of normal)	0
Passive range of motion is slightly limited (50%–95% of normal)	1
Passive range of motion is moderately limited (25%–49% of normal)	2
Passive range of motion is severely limited (5%–24% of normal)	3
Passive range of motion is absent (0%–4% of normal) or ankylosis	4

Table 4. Assessment of knee joint mobility according to ICF (b710) during active movement testing (goniometry)

Sign characteristic	ICF assessment
Active range of motion is not limited (96%–100% of normal)	0
Active range of motion is slightly limited (50%–95% of normal)	1
Active range of motion moderately limited (25%–49% of normal)	2
Active range of motion is severely limited (5%–24% of normal)	3
Active range of motion is absent (0%–4% of normal) or ankylosis	4

Table 5. Pain on palpation of periarticular tissues according to ICF (b28015 pain in lower limb)

Sign characteristic	ICF assessment
No pain	0
Minor pain	1
Facial reaction	2
Limb withdrawal	3
Patient screams during palpation or does not allow the joint to be palpated	4

The MRI indicators were analyzed, and the main criteria for assessing neuroimaging disorders in the knee joint and spine were established depending on disease origin.

Research results

The predictive Bayesian approach provides basis for ensuring the quality of risk analysis and allows establishing probable relationships between the variables of interest.

The approach considers that the risk cannot be adequately described and assessed simply by summing up probabilities [29, 30].

When analyzing the clinical examination data, which included the anamnestic characteristics of all the patients, each sign was represented by a logical variable with two possible values (1 or 0). The occurrence of the sign in each group was calculated as percentage (Table 6). Then, the

Table 6. Syndromes and risk factors in groups of patients with knee osteoarthritis, *n* (%)

Syndrome	Primary osteoarthritis (<i>n</i> =46)	Post-traumatic osteoarthritis (<i>n</i> =48)	Spondylogenic osteoarthritis (<i>n</i> =40)	Osteoarthritis deg. 0 (<i>n</i> =24)
Knee and spine pain	46 (100)	48 (100)	40 (100)	24 (100)
Painful points	43 (93.5)	47 (97.9)	40 (100)	23 (95.8)
Limited movement in the knee joint	45 (97.8)	45 (93.7)	37 (92.5)	21 (87.5)
Limited movement in the lumbar spine	38 (82.6)	32 (66.7)	40 (100)	15 (62.5)
Gait disturbance (lameness)	46 (100)	43 (89.6)	27 (67.5)	13 (54.2)
Violation of the spine configuration	41 (89.1)	38 (79.2)	39 (97.5)	20 (83.3)
Hereditary predisposition	41 (89.1)	26 (54.2)	33 (82.5)	11 (45.8)
Presence of injuries	25 (54.3)	47 (97.9)	23 (57.5)	7 (29.2)
Metabolic disorders	43 (93.5)	38 (79.2)	23 (57.5)	9 (37.5)
Physical and psychoemotional overload at work	38 (82.6)	40 (83.3)	35 (87.5)	17 (70.8)

decimal logarithms of the sign frequencies were obtained, which were considered as diagnostic coefficients. Afterward, the smallest value was subtracted from the values of the four sign coefficients, obtaining a zero value. By multiplying each coefficient by 10, the final diagnostic score was obtained (Table 7). The median values of the ICF assessments in patients with knee OA are presented in Table 8.

Clinical examination showed that gait disturbance (lameness) can be highly considered as a differential diagnosis in patients with primary and post-traumatic OA of the knee joint (Table 7). The maximum score in differential diagnostics is determined in the column "Limitation of motion in the lumbar spine" for spondylogenic and primary OA. Identifying provoking factors, such as metabolic disorders, are crucial for differential diagnosis; they have the maximum value in primary and post-traumatic OA, and injuries are more often detected in post-traumatic OA. Regarding hereditary predisposition, a higher score was revealed in primary and spondylogenic OA. However, it should be noted that the difference in most signs for differential diagnostics is insignificant, which explains the complexity of differential diagnostics of OA. The above necessitated a neuroimaging examination.

Diagnostic criteria of the MRI study consisted of qualitative and quantitative disorders. The qualitative signs were assessed according to the "presence-absence" principle; prevalence was calculated in each group. Group 4 was not included in the calculations (Table 9). Analysis of the final diagnostic scores (Table 10) showed that the maximum number of diagnostic scores was obtained in post-traumatic OA with signs of "incongruence of articular surfaces" and "partial inveterate rupture of the posterior cruciate ligament," whereas diagnostic scores were relatively high in cases of partial inveterate rupture of the anterior cruciate ligament. In primary OA, the diagnostic scores were lower and were more often high in cases wherein narrowing of the joint space and partial inveterate rupture of the posterior cruciate ligament were noted. In spondylogenic OA, the scores were higher in cases wherein disk sequestration and disk extrusion were observed. The remaining diagnostic scores were not of such significant importance for differential diagnostics.

Tables 11 and 12 present data obtained from a detailed group-by-group assessment of quantitative changes (the width of the joint space of the knee joint and facet joints of the lumbar spine). If a significant difference in the width of the joint space of the knee joint was obtained ($p=0.0001$), no

Table 7. Differential diagnostic scores in study groups

Syndrome	Primary osteoarthritis (<i>n</i> =46)	Post-traumatic osteoarthritis (<i>n</i> =48)	Spondylogenic osteoarthritis (<i>n</i> =40)	Osteoarthritis deg. 0 (<i>n</i> =24)
Knee and spine pain	0	0	0	0
Painful points	0.3	0.1	0.1	0
Limited movement in the knee joint	0.4	0.4	0.2	0
Limited movement in the lumbar spine	1.2	0.2	2	0
Gait disturbance (lameness)	2.8	2.3	1	0
Violation of the spine configuration	0.5	0	0.9	0.3
Hereditary predisposition	2.7	0.6	2.4	0
Presence of injuries	2.5	4.9	2.5	0
Metabolic disorders	4	3.3	1.8	0
Physical and psychoemotional overload at work	0.5	0.6	0.7	0

Table 8. Median values of ICF scores in patients with knee osteoarthritis of different origin, points

ICF assessment criteria	Primary osteoarthritis	Post-traumatic osteoarthritis	Spondylogenic osteoarthritis	Osteoarthritis deg. 0
Pain associated with loading	2	3	3	1
Passive range of motion	1	2	1	0
Active range of motion	1	3	1	0
Pain during palpation of periarticular tissues	2	3	3	1

Table 9. Diagnostic MRI criteria in groups of patients with knee osteoarthritis, *n* (%)

Criterion	Primary osteoarthritis (<i>n</i> =46)	Post-traumatic osteoarthritis (<i>n</i> =48)	Spondylogenic osteoarthritis (<i>n</i> =40)
Presence of high-intensity fluid	15 (32.6)	21 (43.7)	5 (12.5)
Partial inveterate rupture of the anterior cruciate ligament	12 (26)	35 (72.9)	3 (7.5)
Fragmentation of the medial and lateral meniscus	11 (23.9)	37 (77)	4 (10)
Longitudinal damage of the medial meniscus	19 (41.3)	44 (92.6)	17 (42.5)
Presence of osteophytes	17 (36.9)	40 (83.3)	4 (10)
Degenerative damage to cartilage tissue	20 (43.4)	20 (41.6)	5 (12.5)
Longitudinal damage of the lateral meniscus	7 (15.2)	12 (25)	8 (20)
Narrowing of the joint space to 1–2 mm	24 (52.1)	7 (14.5)	3 (7.5)
Incongruence of articular surfaces	4 (8.6)	41 (85.4)	1 (2.5)
Partial inveterate rupture of the posterior cruciate ligament	1 (2.1)	5 (10.4)	–
Spondyloarthrosis stage I	6 (13)	3 (6.2)	4 (10)
Spondyloarthrosis stage II	15 (32.6)	21 (43.7)	13 (32.5)
Spondyloarthrosis stage III	25 (54.3)	24 (50)	23 (57.5)
Disk protrusion	7 (15.2)	3 (6.2)	13 (32.5)
Disk extrusion	4 (8.6)	1 (2)	8 (20)
Disk sequestration	–	–	4 (10)

Table 10. Diagnostic scores of MRI changes in patients with knee osteoarthritis

Criterion	Primary osteoarthritis (<i>n</i> =46)	Post-traumatic osteoarthritis (<i>n</i> =48)	Spondylogenic osteoarthritis (<i>n</i> =40)
Presence of high-intensity fluid	4	6	0
Partial inveterate rupture of the anterior cruciate ligament	6	11	0
Fragmentation of the medial and lateral meniscus	3	9	0
Longitudinal damage of the medial meniscus	0	4	0
Presence of osteophytes	6	7	0
Degenerative damage to cartilage tissue	5	6	0
Longitudinal damage of the lateral meniscus	0	8	7
Narrowing of the joint space to 1–2 mm	7	2	0
Incongruence of articular surfaces	4	14	0
Partial inveterate rupture of the posterior cruciate ligament	7	4	0
Spondyloarthrosis stage I	3	0	3
Spondyloarthrosis stage II	2	3	4
Spondyloarthrosis stage III	0	0	1
Disk protrusion	3	0	6
Disk extrusion	5	0	9
Disk sequestration	0	0	10

Table 11. Joint space width in osteoarthritis and spondyloarthrosis in groups

Group	Joint space of the knee joint	Joint space of the facet joint
Primary osteoarthritis (<i>n</i> =46)	3.43±0.28	1.10±0.04
Post-traumatic osteoarthritis (<i>n</i> =48)	5.16±0.30	1.09±0.05
Spondylogenic osteoarthritis (<i>n</i> =40)	5.51±0.32	1.11±0.08
Kruskal–Wallis test, <i>p</i>	0.0001	0.12

Table 12. Joint gap width of facet joints depending on the stage of spondyloarthritis

Stage of spondyloarthritis	Joint cavity of facet joint	Kruskal–Wallis test, <i>p</i>
I	1.73±0.6	0.0001
II	1.38±0.02	
III	0.86±0.03	

significant differences were noted when measuring the facet joints ($p = 0.12$). However, a significant difference ($p = 0.0001$) was found in the width of the joint space of the facet joints depending on the stage of SA.

Measurement of the sizes of the collateral ligaments conducted during the study is of particular interest. The length of the lateral ligament ranged from 5.45 cm to 6.30 cm, and the transverse size ranged from 0.43 cm to 0.74 cm in diameter. Furthermore, the length of the medial collateral ligament ranged from 4.47 cm to 5.10 cm, and the transverse size was from 0.40 cm to 0.53 cm in diameter.

Adverse events

No adverse events were noted during the study.

DISCUSSION

Summary of the main results of the study

The study confirmed neuroimaging signs in patients with SA and OA of the knee joint, depending on the disease pathogenesis, some of which, such as the presence of bone growths in the form of osteophytes, degenerative changes in cartilage tissue in the form of a violation of its integrity, the presence of high-intensity fluid, MRI signs of SA, protrusions, extrusions, and sequestration of the disk, have been described in the literature. Additionally, the diagnostic scores for the main signs of the disease in groups were calculated, and the sizes of the joint space of the knee joint and facet joints were determined, as well as the sizes of the joint space of the facet joints, depending on the stage of SA.

Discussion of the main result of the study

Study results demonstrate that disease development is influenced by various factors. Similarities in pathogenesis between different diseases causes certain difficulties for clinicians in differential diagnostics.

MRI is a relatively informative modality for establishing the pathological process in the knee and facet joints. However, information in the literature on the use of neuroimaging studies in OA of various origins is insufficient. The pathogenesis of stage 0 knee OA remains controversial. Notably, the disease is characterized by sclerotomic spread of pain due to mechanical action in the ligaments, tendons, and periosteum at the level of L_{III}–L_{IV} [31, 32].

Study limitations

This study did not conduct a neuroorthopedic examination of patients (i.e., goniometry, tensoalgometry, and

scoliosometry), which may have its own characteristics in people with musculoskeletal pain. The analysis focused on neuroimaging changes that affect locomotor disorders.

CONCLUSION

Neuroimaging examination is the most informative method for diagnosing injuries and degenerative changes in the knee joint. The developed criteria can be used in practical work for diagnostics, which enables assessment of the severity of knee joint damage in OA. The developed scoring system for diagnostics allows differential diagnostics of various types of knee OA.

ADDITIONAL INFO

Author contribution. All authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication). The greatest contribution is distributed as follows: Yu.O. Novikov — study design development, analysis of literature sources, analysis of obtained data, writing and editing the text of the article; A.A. Bogachev — literature review, collection and analysis of literature sources, clinical testing of subjects, analysis of obtained data, writing and editing the text of the article; M.B. Tsykunov — study design development, analysis of literature sources, analysis of obtained data, writing and editing the text of the article.

Funding source. The authors state that there is no external funding when conducting the research and preparing the publication.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Consent for publication. The patients gave their written consent for publication of their medical data.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: Ю.О. Новиков — разработка дизайна исследования, анализ литературных источников, анализ полученных данных, написание и редактирование текста статьи; А.А. Богачёв — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, проведение клинического тестирования испытуемых, анализ полученных

данных, написание и редактирование текста статьи; М.Б. Цыкунов — разработка дизайна исследования, анализ литературных источников, анализ полученных данных, написание и редактирование текста статьи.

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

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

Информированное согласие. Авторы получили письменное согласие пациентов на публикацию их медицинских данных.

REFERENCES

1. Davis MA, Onega T, Weeks WB, Lurie JD. Where the United States Spends Its Spine Dollars: Expenditures on Different Ambulatory Services for the Management of Back and Neck Conditions. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2012;37(19):1693–1701. doi: 10.1097/BRS.0b013e3182541f45
2. Haldeman S, Dagenais S. A supermarket approach to the evidence-informed management of chronic low back pain. *Spine J*. 2008;8(1):1–7. doi: 10.1016/j.spinee.2007.10.009
3. Juniper M, Le T, Mladsi D. The epidemiology, economic burden, and pharmacological treatment of chronic low back pain in France, Germany, Italy, Spain and the UK: a literature-based review. *Expert Opin Pharmacother*. 2009;10(16):2581–92. doi: 10.1517/14656560903304063
4. Zhang Y, Jordan J. Epidemiology of osteoarthritis. *Clin Geriatr Med*. 2010;26(3):355–69. doi: 10.1016/j.cger.2010.03.001
5. Krutko AV, Vasiliev AI, Kareva NP. *Spondyloarthrosis: Clinical recommendations*. Novosibirsk: GKT Federal State Budgetary Institution "NNIITO named after Y.L. Tsvyran" of the Ministry of Health of the Russian Federation; 2016. 45 p. EDN: YMGEMP
6. Makushin VD, Chegurov OK. Gonarthrosis (questions of pathogenesis and classification). *Genius of orthopedics*. 2005;(2):19–22. EDN: LDFLOF
7. Nasonov EL, Yakhno NN, Karateev AE, et al. General principles of treatment of musculoskeletal pain: interdisciplinary consensus. *Scientific and practical rheumatology*. 2016;54(3):247–265. doi: 10.14412/1995-4484-2016-247-265
8. Perolat R, Kastler A, Nicot B, et al. Facet joint syndrome: from diagnosis to interventional management. *Insights Imaging*. 2018;9(5):773–789. doi: 10.1007/s13244-018-0638-x
9. Oichi T, Taniguchi Y, Oshima Y, Tanaka S, Saito T. Pathomechanism of intervertebral disc degeneration. *JOR Spine*. 2020;3(1):e1076. doi: 10.1002/jsp2.1076
10. Nasonov EL, editor. *Rheumatology: National guidelines*. Moscow: GEOTAR-Media; 2020. 448 p.
11. Dosin YuM, Yagur VE, Martusevich NA, et al. Primary gonarthrosis: the state of the problem. *Medical business: a scientific and practical therapeutic journal*. 2013;(2):74–78. EDN: UCNTLJ
12. Novikov YuO. The role of unfavorable production factors in the formation of dorsalgias. *Healthcare of Bashkortostan*. 2000;(S4):139–140. EDN: TVLFFD
13. Al-Bsheni FA. The role of trauma factors in the development of secondary gonarthrosis. In: *Health for everyone. Materials of the 4th International Scientific and Practical Conference*. Pinsk: Polessky State University; 2012. P. 26–27. EDN: GXAUAE
14. Veselovsky VP. *Practical vertebroneurology and manual therapy*. Riga; 1991. 344 p.
15. Kuznetsov VF. *Handbook of vertebroneurology: clinic, diagnosis*. Minsk: Belarus; 2000. 351 p.
16. Khabirov FA. *Guidelines for clinical neurology of the spine*. Kazan: Kazan State Medical Academy; 2006. 520 p. EDN: VSHFBR
17. Pathria M, Sartoris DJ, Resnick D. Osteoarthritis of the facet joints: accuracy of oblique radiographic assessment. *Radiology*. 1987;164(1):227–230. doi: 10.1148/radiology.164.1.3588910
18. Kellgren JH, Lawrence JS. Radiological assessment of osteo-arthritis. *Ann Rheum Dis*. 1957;16:494–502. doi: 10.1136/ard.16.4.494
19. Hannan MT, Felson DT, Pincus T. Analysis of the discordance between radiographic changes and knee pain in osteoarthritis of the knee. *The Journal of rheumatology*. 2000;27(6):1513–1517.
20. Zhou X, Liu Y, Zhou S, et al. The correlation between radiographic and pathologic grading of lumbar facet joint degeneration. *BMC Med Imaging*. 2016;16(1):1–8. doi: 10.1186/s12880-016-0129-9
21. Kalichman L, Li L, Kim DH, et al. Facet joint osteoarthritis and low back pain in the community-based population. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2008;33(23):2560–2565. doi: 10.1097/BRS.0b013e318184ef95
22. Zaitseva EM, Alekseeva LI, Smirnov AV, Nasonov EL. Magnetic resonance imaging in osteoarthritis. *Scientific and practical rheumatology*. 2006;44(5):59–75. EDN: HZSMTN
23. Bedson J, Croft PR. The discordance between clinical and radiographic knee osteoarthritis: a systematic search and summary of the literature. *BMC Musculoskeletal Disorders*. 2008;9(1):1–11. doi: 10.1186/1471-2474-9-116
24. Sumin DYU, Galashina EA. The possibilities of magnetic resonance imaging in detecting early manifestations of gonarthrosis. In: *Technological innovations in traumatology, orthopedics and neurosurgery: Integration of science and practice: To the 75th anniversary of the Saratov Scientific Research Institute of Traumatology, Orthopedics and Neurosurgery*. Saratov: Limited Liability Company "Amirit"; 2020. P. 86–89. EDN: DXFWRY
25. Kholin AV. *Magnetic resonance imaging in diseases and injuries of the central nervous system*. Moscow: MEDpress-inform; 2017. 256 p.
26. Grogan J, Nowicki BH, Schmidt TA, Houghton VM. Lumbar facet joint tropism does not accelerate degeneration of the facet joints. *American journal of neuroradiology*. 1997;18(7):1325–1329.
27. Newbould RD, Miller SR, Toms LD, et al. T2* measurement of the knee articular cartilage in osteoarthritis at 3T. *J Magn Reson Imaging*. 2012;35(6):1422–1429. doi: 10.1002/jmri.23598
28. Tsykunov MB. The use of categories of the International classification of functioning for the assessment of disorders in the pathology of the musculoskeletal system. Part 1. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2019;(1):58–66. doi: 10.17116/vto201901158
29. Heckerman D. A tutorial on learning with Bayesian networks. *Innovations in Bayesian networks: Theory and applications*. 2008. P. 33–82.

30. Aven T, Eidesen K. A predictive Bayesian approach to risk analysis in health care. *BMC Med Res Methodol*. 2007;7:38. doi: 10.1186/1471-2288-7-38
31. Popelyansky YaYu. *Orthopedic neurology (vertebroneurology)*. Moscow: MEDpress-inform; 2003. 670 p.
32. Gade F. Segmental innervation: graphical synthesis of correspondences between dermatomes, myotomes, sclerotomes

and viscerotomes. A systematic review of scientific papers and publications on dermatomas, myotomas, sclerotomas and viscerotomas for the development of graphic synthesis of somatovisceral correspondences. *Russian Osteopathic Journal*. 2019;(3–4):150–163. doi: 10.32885/2220-0975-2019-3-4-150-163

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Davis M.A., Onega T., Weeks W.B., Lurie J.D. Where the United States Spends Its Spine Dollars: Expenditures on Different Ambulatory Services for the Management of Back and Neck Conditions // *Spine (Phila Pa 1976)*. 2012. Vol. 37, № 19. P. 1693–1701. doi: 10.1097/BRS.0b013e3182541f45
2. Haldeman S., Dagenais S. A supermarket approach to the evidence-informed management of chronic low back pain // *Spine J*. 2008. Vol. 8, № 1. P. 1–7. doi: 10.1016/j.spinee.2007.10.009
3. Juniper M., Le T., Mladi D. The epidemiology, economic burden, and pharmacological treatment of chronic low back pain in France, Germany, Italy, Spain and the UK: a literature-based review // *Expert Opin Pharmacother*. 2009. Vol. 10, № 16. P. 2581–92. doi: 10.1517/14656560903304063
4. Zhang Y., Jordan J. Epidemiology of osteoarthritis // *Clin Geriatr Med*. 2010. Vol. 26, № 3. P. 355–69. doi: 10.1016/j.cger.2010.03.001
5. Крутько А.В., Васильев А.И., Карева Н.П. Спондилоартроз: Клинические рекомендации. Новосибирск: ГКТ ФГБУ «ННИИТО им. Я.Л. Цивьяна» Минздрава России, 2016. 45 с. EDN: YMGEMP
6. Макушин В.Д., Чегуров О.К. Гонартроз (вопросы патогенеза и классификации) // *Гений ортопедии*. 2005. № 2. С. 19–22. EDN: LDFLOF
7. Насонов Е.Л., Яхно Н.Н., Каратеев А.Е., и др. Общие принципы лечения скелетно-мышечной боли: междисциплинарный консенсус // *Научно-практическая ревматология*. 2016. Т. 54, № 3. С. 247–265. doi: 10.14412/1995-4484-2016-247-265
8. Perolat R., Kastler A., Nicot B., et al. Facet joint syndrome: from diagnosis to interventional management // *Insights Imaging*. 2018. Vol. 9, № 5. P. 773–789. doi: 10.1007/s13244-018-0638-x
9. Oichi T., Taniguchi Y., Oshima Y., Tanaka S., Saito T. Pathomechanism of intervertebral disc degeneration // *JOR Spine*. 2020. Vol. 3, № 1. P. e1076. doi: 10.1002/jsp2.1076
10. Ревматология: национальное руководство / Под ред. Е.Л. Насонова. Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2020. 448 с.
11. Досин Ю.М., Ягур В.Е., Мартусевич Н.А., и др. Первичный гонартроз: состояние проблемы. Лечебное дело: научно-практический терапевтический журнал. 2013. № 2(30). С. 74–78. EDN: UCNTLJ
12. Новиков Ю.О. Роль неблагоприятных производственных факторов в формировании дорсалгий // *Здравоохранение Башкортостана*. 2000. № S4. С. 139–140. EDN: TVLFFD
13. Аль-Бшени Ф.А. Роль факторов травмы в развитии вторичного гонартроза. В кн.: Здоровье для всех. Материалы 4-й Международной научно-практической конференции. Пинск: Полесский государственный университет, 2012. С. 26–27. EDN: GXAUAE
14. Веселовский В.П. Практическая вертеброневрология и мануальная терапия. Рига, 1991. 344 с.
15. Кузнецов В.Ф. Справочник по вертеброневрологии: клиника, диагностика. Минск: Беларусь, 2000. 351 с.
16. Хабиров Ф.А. Руководство по клинической неврологии позвоночника. Казань: Казанская государственная медицинская академия, 2006. 520 с. EDN: VSHFBR
17. Pathria M., Sartoris D.J., Resnick D. Osteoarthritis of the facet joints: accuracy of oblique radiographic assessment // *Radiology*. 1987. Vol. 164, № 1. P. 227–230. doi: 10.1148/radiology.164.1.3588910
18. Kellgren J.H., Lawrence J.S. Radiological assessment of osteo-arthritis // *Ann Rheum Dis*. 1957. Vol. 16. P. 494–502. doi: 10.1136/ard.16.4.494
19. Hannan M.T., Felson D.T., Pincus T. Analysis of the discordance between radiographic changes and knee pain in osteoarthritis of the knee // *The Journal of rheumatology*. 2000. Vol. 27, № 6. P. 1513–1517.
20. Zhou X., Liu Y., Zhou S., et al. The correlation between radiographic and pathologic grading of lumbar facet joint degeneration // *BMC Med Imaging*. 2016. Vol. 16, № 1. P. 1–8. doi: 10.1186/s12880-016-0129-9
21. Kalichman L., Li L., Kim D.H., et al. Facet joint osteoarthritis and low back pain in the community-based population // *Spine (Phila Pa 1976)*. 2008. Vol. 33, № 23. P. 2560–2565. doi: 10.1097/BRS.0b013e318184ef95
22. Зайцева Е.М., Алексеева Л.И., Смирнов А.В., Насонов Е.Л. Магнитно-резонансная томография при остеоартрозе // *Научно-практическая ревматология*. 2006. Т. 44, № 5. С. 59–75. EDN: HZSMTN
23. Bedson J., Croft P.R. The discordance between clinical and radiographic knee osteoarthritis: a systematic search and summary of the literature // *BMC Musculoskeletal Disorders*. 2008. Vol. 9, № 1. P. 1–11. doi: 10.1186/1471-2474-9-116
24. Сумин Д.Ю., Галашина Е.А. Возможности магнитно-резонансной томографии в выявлении ранних проявлений гонартроза. В кн.: Технологические инновации в травматологии, ортопедии и нейрохирургии: интеграция науки и практики: К 75-летию Саратовского научно-исследовательского института травматологии, ортопедии и нейрохирургии. Саратов: Общество с ограниченной ответственностью «Амирит», 2020. С. 86–89. EDN: DXFWRY
25. Холин А.В. Магнитно-резонансная томография при заболеваниях и травмах центральной нервной системы. Москва: МЕДпресс-информ, 2017. 256 с.
26. Grogan J., Nowicki B.H., Schmidt T.A., Haughton V.M. Lumbar facet joint tropism does not accelerate degeneration of the facet joints // *American journal of neuroradiology*. 1997. Vol. 18, № 7. P. 1325–1329.
27. Newbould R.D., Miller S.R., Toms L.D., et al. T2* measurement of the knee articular cartilage in osteoarthritis at 3T // *J Magn Reson Imaging*. 2012. Vol. 35, № 6. P. 1422–1429. doi: 10.1002/jmri.23598

28. Цыкунов М.Б. Использование категорий Международной классификации функционирования для оценки нарушений при патологии опорно-двигательной системы. Часть 1 // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2019. № 1. С. 58–66. doi: 10.17116/vto201901158

29. Heckerman D. A tutorial on learning with Bayesian networks // Innovations in Bayesian networks: Theory and applications. 2008. P. 33–82.

30. Aven T., Eidesen K. A predictive Bayesian approach to risk analysis in health care // BMC Med Res Methodol. 2007. Vol. 7. P. 38. doi: 10.1186/1471-2288-7-38

31. Попелянский Я.Ю. Ортопедическая неврология (вертебро-неврология). Москва: МЕДпресс-информ, 2003. 670 с.

32. Гаде Ф. Сегментарная иннервация: графический синтез соответствий между дерматомами, миотомами, склеротомами и висцеротомами. Систематический обзор научных работ и публикаций о дерматомах, миотомах, склеротомах и висцеротомах для разработки графического синтеза соматовисцеральных соответствий // Российский остеопатический журнал. 2019. № 3–4 (46–47). С. 150–163. doi: 10.32885/2220-0975-2019-3-4-150-163

AUTHORS' INFO

Yuriy O. Novikov, MD, Dr. Sci. (Medicine), professor,
ORCID: 0000-0002-6282-7658;
eLibrary SPIN: 3412-6610;
e-mail: profnovikov@yandex.ru

*** Artem A. Bogachev**;
address: 70 Nizhnaya Pervomayskaya str., 105203 Moscow,
Russia;
ORCID: 0000-0001-7507-4416;
eLibrary SPIN: 2659-3172;
e-mail: doctorartemis@gmail.com

Mikhail B. Tsykunov, MD, Dr. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0002-0994-8602;
eLibrary SPIN: 8298-8338;
e-mail: rehcito@mail.ru

ОБ АВТОРАХ

Новиков Юрий Олегович, д-р мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0002-6282-7658;
eLibrary SPIN: 3412-6610;
e-mail: profnovikov@yandex.ru

*** Богачёв Артём Андреевич**;
адрес: Россия, 105203, Москва,
ул. Нижняя Первомайская, 70;
ORCID: 0000-0001-7507-4416;
eLibrary SPIN: 2659-3172;
e-mail: doctorartemis@gmail.com

Цыкунов Михаил Борисович, д-р мед. наук;
ORCID: 0000-0002-0994-8602;
eLibrary SPIN: 8298-8338;
e-mail: rehcito@mail.ru

* Corresponding author / Автор, ответственный за переписку

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto626361>

Neural network model development for detecting atypical mitoses in histological slides

Gennadiy N. Berchenko, Nina V. Fedosova, Mikhail G. Kochan, Dmitriy V. Mashoshin

N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Modern computer systems allow digitizing and examining images of histological preparations, which led the authors to the idea of using Machine Learning (hereafter — ML) tools usage in digital pathohistology. The ability of neural networks to find sub-visual image features in digitized histological preparations provides the basis for better qualitative and quantitative image analysis. Existing machine learning methods provide good accuracy and speed in recognizing various images, which gives hope for their wide application, including in oncologic diagnostics.

AIM: Use methods of mathematical modeling to identify pathological mitoses in histological preparations as the main sign of the difference between malignant and benign tumor growth.

MATERIALS AND METHODS: Histological images of the N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics were used as a data set for the neural network model. The model was tested using 188 histologic slides from 67 patients treated at the institute. Histological preparations were scanned on a Leica Aperio CS2 microscope with a $\times 400$ resolution and converted into JPEG format with further processing. Next, the test images were analyzed in streaming mode using the created neural network model in order to obtain the coordinates of the desired diagnostic object — pathological mitosis and the probability with which the model found the object of this category. The obtained images were analyzed by a pathologist to determine whether the detected object corresponded to pathological mitosis.

RESULTS: The authors have chosen an architecture, developed a methodology for training a neural network, and created a model that can be used to detect pathologic mitoses in histologic preparations. The authors do not attempt to replace the physician, but show the possibility of an integrated approach to data analysis by a computer system and a pathologist.

CONCLUSIONS: The developed mathematical model of neural network used as a part of technological solution for recognizing pathological mitoses in scanned histological preparations can be used as a tool to reduce the time of research and increase the accuracy of diagnosis by a pathologist.

Keywords: neural network; mathematical model; artificial intelligence; tumor; pathological mitosis; machine learning; bone pathology.

To cite this article:

Berchenko GN, Fedosova NV, Kochan MG, Mashoshin DV. Neural network model development for detecting atypical mitoses in histological slides. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2024;31(3):337–349. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto626361>

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto626361>

Разработка модели нейронной сети для выявления патологических митозов в гистологических препаратах

Г.Н. Берченко, Н.В. Федосова, М.Г. Кочан, Д.В. Машошин

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

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Современные компьютерные системы позволяют оцифровывать и исследовать изображения гистологических препаратов, что натолкнуло авторов на идею использования инструментов машинного обучения в цифровой патогистологии. Возможности нейронных сетей находить субвизуальные особенности изображения на оцифрованных гистологических препаратах создают основу для лучшего качественного и количественного анализа изображений. Существующие методы машинного обучения дают хорошие показатели по точности и скорости при распознавании различных изображений, что позволяет надеяться на их широкое применение, в том числе и в онкологической диагностике.

Цель. Использовать методы математического моделирования для выявления патологических митозов в гистологических препаратах как основного признака различия злокачественного и доброкачественного опухолевого процесса.

Материалы и методы. В качестве набора данных для модели нейронной сети применялись гистологические изображения НМИЦ травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. Тестирование модели выполнено с помощью 188 гистологических стёкол 67 пациентов, проходивших лечение в институте. Гистологические препараты были отсканированы на микроскопе Leica Aperio CS2 с разрешением $\times 400$ и преобразованы в формат JPEG с последующей обработкой. Далее в потоковом режиме был выполнен анализ тестовых изображений с использованием созданной модели нейронной сети с целью получения координат искомого объекта диагностики — патологического митоза и вероятности, с которой модель находила объект данной категории. Полученные изображения были проанализированы врачом-патологоанатомом на предмет соответствия выявленного объекта патологическому митозу.

Результаты. Авторы выбрали архитектуру, разработали методологию обучения нейронной сети и создали модель, которую можно использовать для обнаружения патологических митозов в гистологических препаратах. Авторы не пытаются заменить врача, а показывают возможность комплексного подхода к анализу данных компьютерной системой и врачом-патологоанатомом.

Заключение. Разработанная математическая модель нейронной сети, используемая в составе технологического решения для распознавания патологических митозов в отсканированных гистологических препаратах, может применяться как инструмент для сокращения времени исследования и повышения точности диагностики врача-патологоанатома.

Ключевые слова: нейронная сеть; математическая модель; искусственный интеллект; опухоль; патологический митоз; машинное обучение; костная патология.

Как цитировать:

Берченко Г.Н., Федосова Н.В., Кочан М.Г., Машошин Д.В. Разработка модели нейронной сети для выявления патологических митозов в гистологических препаратах // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2024. Т. 31, № 3. С. 337–349. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto626361>

BACKGROUND

The morphological research method has significantly expanded the diagnostic capabilities of clinicians, making the pathologist an integral participant in the diagnostic process. The volume of work involving biopsy studies is continuously growing, reflecting the increasing importance of analyzing biopsy materials in diagnostics and treatment. In modern pathological anatomy, clinical pathology is becoming increasingly significant; this concept is closely related to surgical pathology in English-language literature, denoting a branch of science that deals with intravital diagnostics based on the results of studying the material obtained from biopsies.

The specific aims of pathomorphological studies include clarification of clinical diagnoses or their establishment in unclear cases; identification of the initial stages of the disease; recognition of inflammatory, hyperplastic, and tumor processes; determination of the degree of malignancy of neoplasms; and the dynamics of changes under the influence of the treatment. Together with clinicians, pathologists participate in determining the scope of surgical intervention, establishing the activity of the process and the severity of the lesion, assessing the effectiveness of treatment, and so on.

Morphological examination is mandatory for diagnosing tumors and tumor-like diseases of the musculoskeletal system. Bone tumor diagnostics is one of the most complex areas in clinical oncology, which can be explained by the rarity of such tumors, their diversity, and the pronounced heterogeneity of individual nosological forms. Thus, it is necessary to adhere to a certain algorithm in conducting a pathological anatomical study, which implies a sequence of certain actions to make a diagnosis.

In the pathomorphological differential diagnostics of benign processes of the musculoskeletal system (i.e., benign tumors and tumor-like diseases) and malignant tumors, one of the most objective criteria for their distinction is the determination of pathological mitoses [1]. It is particularly difficult to differentiate benign processes from low-grade sarcomas, such as osteosarcoma, chondrosarcoma, fibrosarcoma, and angiosarcoma. Based on morphological features, mitoses are conventionally classified into normal (i.e., typical) and atypical (i.e., pathological). The biological significance of typical mitosis consists in a strictly identical distribution of chromosomes between the daughter nuclei of a dividing cell, which ensures the formation of genetically identical daughter cells and maintains continuity in a series of cellular generations. Mitotic division ensures the growth of multicellular eukaryotes by increasing the population of tissue cells. The presence of pathological mitoses indicates a disruption in the normal course of mitotic division and often leads to the emergence of cells with unbalanced karyotypes, which leads to the development of mutations and aneuploidy. Pathological mitoses are often registered in carcinogenesis, radiation disease, cancer, and precancerous hyperplasia.

In today's world, neural networks are widely used in image recognition tasks. However, there is currently no single industrial solution for recognizing morphological or histological images. The use of neural networks and machine learning, which allow automating the process of recognizing characteristic patterns of cells and the intercellular matrix, as well as providing a specialist with the analysis results as auxiliary information for making an informed decision when making a diagnosis, will significantly reduce the time for data processing, improve the quality of diagnostics, and reduce the physical and mental load on the pathologist-expert.

The problems of this study are associated with the following difficulties:

1. First, there is no methodology for selecting and refining the architecture of a neural network for analyzing histological images, and as a result, there are no pretrained models created on data sets from histological images, which slows down research.

2. Second, there are no high-quality prepared data sets from histological images in the public domain.

3. Third, the development of artificial intelligence (AI) models for the pathohistological diagnostics of tumors, if they exist, is not presented in a sufficient number of publications from both a medical and technical point of view, which was the reason for using trial and error in this study.

In addition, the size of atypical mitoses is very small, and the forms are diverse. All these points are aggravated by disagreements among experts in recognizing atypical mitoses.

In this paper, we demonstrate a new approach and methodology for developing a mathematical AI model for detecting specific objects in histological images characteristic of oncological diseases of the musculoskeletal system. This study is based on the idea of the presence of pathological mitoses as one of the main criteria for the malignancy of a tumor process in bone tissue.

This research aims to evaluate the possibility of searching for pathological mitoses using an artificial neural network and to create a prototype of a software solution to assist a doctor in the differential diagnostics of benign processes (i.e., benign tumors and tumor-like diseases) and malignant tumors of the musculoskeletal system.

The following problems were solved within the research and development work:

- assistance to a pathologist in the pathomorphological diagnostics of oncological diseases;
- additional training of the AI model to minimize the number of false responses;
- automated stream processing of an array of histological images.

The study objectives were the following:

- selection of the neural network architecture;
- formulation of nonfunctional requirements for the data set and its creation in accordance with these requirements;

- development of a mathematical model for the analysis of images of digitized histological preparations of patients with tumors and tumor-like diseases of the musculoskeletal system in streaming mode without the participation of a pathologist.

Based on the results of this work, we can state the development of an AI model, as well as software, for stream processing of digitized histological preparations using this model. Despite the successful and promising initial results, further testing and refinement of this tool in an oncology institution is required, which will allow its use in everyday clinical practice.

MATERIALS AND METHODS

A collection of histological images, collected by Professor G.N. Berchenko for over more than 30 years of his work as the head of the pathological anatomy department of the N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, was used as a data set for training the neural network model.

Model creation and training

The first rather serious problem that we faced was the determination of neural network architecture for creating the model. Therefore, existing reviews were used to select a suitable architecture [2–4].

We analyzed the architecture of the Faster R-CNN neural network [2–4] for object detection [5–8] as having the best indicators of precision and recall, according to the results of tests conducted at the beginning of the study (May 2018).

Initially, only images taken with a photo attachment to an Olympus BX51 microscope under immersion at a magnification of $\times 1000$ were used to train the model. This

approach enabled the creation of a model that, starting with 300 images in the training data set, could identify the desired objects with high accuracy. However, attempts to search for objects in images taken at a magnification of $\times 400$ were unsuccessful. This fact made it impossible to use the model to recognize scanned histological preparations on a Leica SC2 scanning microscope, which has a maximum magnification of $\times 400$, and to perform stream processing of histological preparations. We were compelled to search for ways to solve this problem. After several unsuccessful attempts to refine the model, We empirically came to the solution to select images taken with an attachment to an Olympus BX51 microscope in the amount of 1,200 pieces (i.e., 600 pairs) of photographs of the same pathological mitosis at a magnification of $\times 1000$ and $\times 400$.

A separate task was the formulation of nonfunctional requirements for images. We had to determine what image size was required to train the model. On the one hand, the image size should be comparable to the microscope's field of view; on the other hand, it is necessary to calculate the minimum number of image pixels sufficient to create the model. If, at a magnification of $\times 1000$, the image had a size of 1632×1229 pixels (Fig. 1), the size of the selected element was 90×87 pixels (Fig. 2). At a magnification of $\times 400$ (Fig. 3), the size of the selected fragment was only 30×40 pixels (Fig. 4). Therefore, first, it was necessary to determine the requirements for the image size that should be used in this model.

In addition, it was necessary to change the neural network architecture to create the model. Initially, the Faster R-CNN architecture was used. However, the created model showed the following results based on functional testing. The original files with histological images were "cut" into sections of 1024×1024 pixels and streamed through the model. We

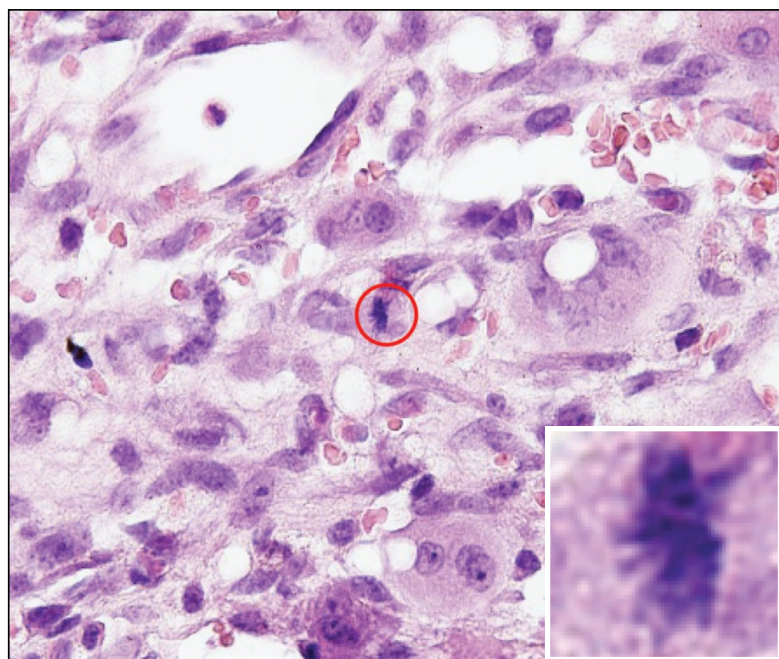


Fig. 1. Photograph of a histological image of a fragment of a malignant tumor with the presence of pathological mitosis, taken at a magnification of $\times 1000$, resolution 1632×1229 pixels.

Fig. 2. A fragment of the image "pathological mitosis", selected for recognition by the model at a magnification of $\times 1000$, resolution 90×87 pixels.

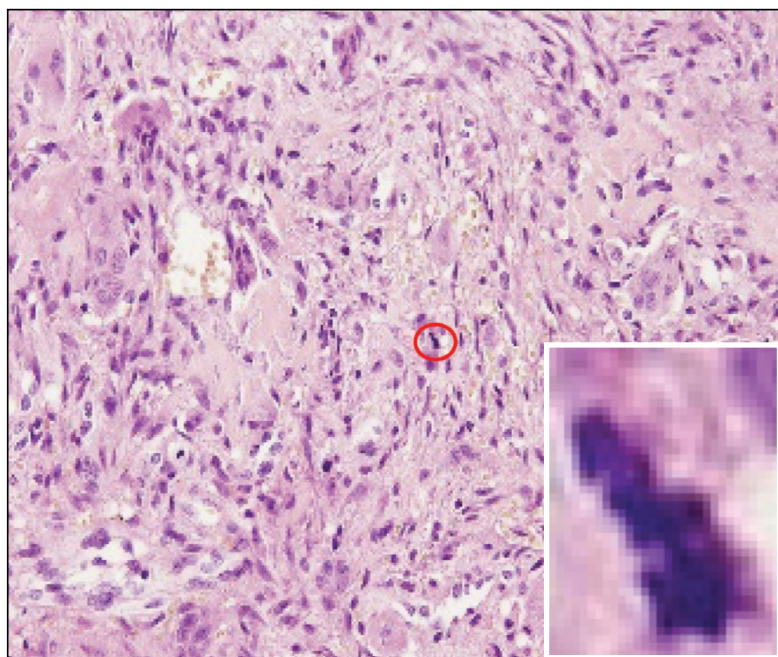


Fig. 3. Photograph of pathological mitosis at a magnification of $\times 400$, resolution 1632×1229 pixels.

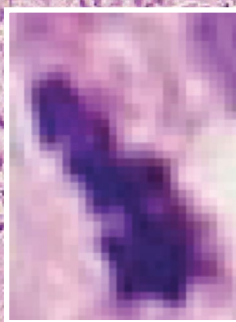


Fig. 4. A fragment of the image “pathological mitosis”, selected for recognition by the model at a magnification of $\times 1000$, resolution 30×40 pixels.

obtained 3,000 to 10,000 files with a file size of 600 to 1500 MB from just one digitized image. Even with 1% of false responses, they obtained up to 100 false positive images that needed to be rechecked by a pathologist, which did not correspond to the aim of this study, which was to simplify and speed up the doctor's work during the primary processing of histological images. Increasing the number of images that were used to create the model also did not help to reduce the percentage of false responses. Therefore, it was decided to change the architecture of the neural network..

We considered a neural network with the Mask R-CNN architecture developed by Facebook Research. One of the features of the network with the Mask R-CNN architecture is its ability to highlight the contours (or “masks”) of instances of different objects in photographs, even if there are several such instances and they have different sizes and partially overlap. Since the key problem for this study was the ability to train the model to recognize images that have different sizes (i.e., magnification), we hoped that this architecture would help solve this problem.

In addition, the Mask R-CNN architecture was open source [9], which was important for this study. The model was retrained using the open-source Detectron architecture (Mask R-CNN) [10]. Detectron2 enables working with both Model Zoo (i.e., a set of pretrained models) and CNN-Zoo (i.e., the most famous neural network architectures, including Faster R-CNN, Mask R-CNN, RetinaNet, DensePose, Cascade R-CNN, Panoptic Feature Pyramid Network [FPN], and TensorMask). This architecture enables using synchronous batch normalization and new data sets for object recognition. It has integrated modules that enable modifying the model architecture. In addition, Detectron2 enables using various data set formats, which makes it easy to train the models additionally using the automatic labeling function.

Pretrained models usage significantly reduces the additional training time for the model, since the main weights of the model have already been calculated. The additional training time is reduced from several months to several hours, and the computer power required for additional training can be an Nvidia video card that supports CUDA software. All these conditions were critical in this study, since technical resources are very expensive, and their use would significantly increase the cost of the study.

In this study, we used the Nvidia RTX1070 video display card and the CUDA 11.3 software package. All the Detectron2 capabilities, as well as the open-source code, enabled using it as the main tool in this study.

One of the main quality criteria for the created mathematical model is the minimum number of false responses. However, in many cases, for diagnostics, a pathologist needs to see not only pathological mitoses, of which the number can be very small, but also all sorts of premitosis. Therefore, an expert physician studied all false responses of the model to determine whether a certain finding of the model can be considered false (therefore, the model needs to be further trained) or this identified object should be left in the resulting sample, and only the physician can decide whether this finding is evidence of malignancy or not. For this purpose, based on the results of the initial testing of the model on histological preparations, an expert pathologist analyzed the false positive findings of the mathematical model. Based on the conclusion, further additional training of the model was performed.

For this purpose, individual categories of similar images, from the model's point of view, were allocated to separate subcategories, and additional images of these subcategories were added to the data set so that each subcategory had an equal number of images.

```
{
  "webAPIId": "fb765913-6cfb-4fac-91ca-d48319aba49c",
  "imageUrl": "http://mitoz:9080/mitoz-api/fb765913-6cfb-4fac-91ca-d48319aba49c/2e70df53-7084-4c3a-b981-5801382ac890.jpg",
  "imageMd5": "b879472e619e839b6d2e0df8d5335b4b",
  "classified": {
    "confidence": 0.974871015548706,
    "ymax": 2121,
    "label": "mitoz",
    "xmax": 1875,
    "xmin": 1673,
    "ymin": 1929,
    "polygons": [[[1673, 1929], [1673, 2119], [1695, 2143], [1860, 2143], [1875, 2127], [1875, 1929]]]],
    "result": "success"
  }
}
```

Fig. 5. The model returned a response indicating that it successfully found the “mitosis” object.

Model testing

The model was tested in several stages. Initially, testing was conducted on new images taken at $\times 400$ and $\times 1000$ magnification using a photo attachment to the Olympus BX51 microscope. The completed control testing of the mathematical model of the neural network showed its high accuracy and the possibility of obtaining good results.

Functional testing of the model was performed using 188 histological slides of 67 patients who sought consultation at the N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics. Histological preparations were scanned on a Leica Aperio CS2 scanning microscope with a resolution of $\times 400$ and converted to JPEG format. Then, the JPEG image was “cut” using a computer program into square sections comparable to the field of view of a microscope of 1024×1024 pixels. Then, all the obtained squares of the scanned images were analyzed in streaming mode using the developed neural network model. The neural network model presented the result of the image analysis as a JSON file containing the coordinates of the identified diagnostic object (i.e., mitosis) and the probability with which the model classified this object in this category (Fig. 5).

After that, the identified “mitosis” object was outlined in the image with a square with a diagonal of $x_{\min}, y_{\min} / x_{\max}, y_{\max}$ using a script, where $x_{\min}, y_{\min}$ are the minimum coordinates of the object, and $x_{\max}, y_{\max}$ are the maximum coordinates of the object. In addition, the probability of the object belonging to this category was revealed (Fig. 6). The resulting images were analyzed by a pathologist to confirm or refute the resemblance of the identified object to pathological mitosis.

In addition to searching, the program counted the number of objects detected. If the sides of the squares that outlined the images intersected (Fig. 7), the objects were considered identical, and the total number of pathological mitoses revealed did not increase.

RESULTS

Clinical testing of the neural network model that determines the search object “pathological mitosis” in scanned images of histological preparations is illustrated by the following clinical examples.

During the study, 188 histological slides of 67 patients with both benign tumors and tumor-like processes and

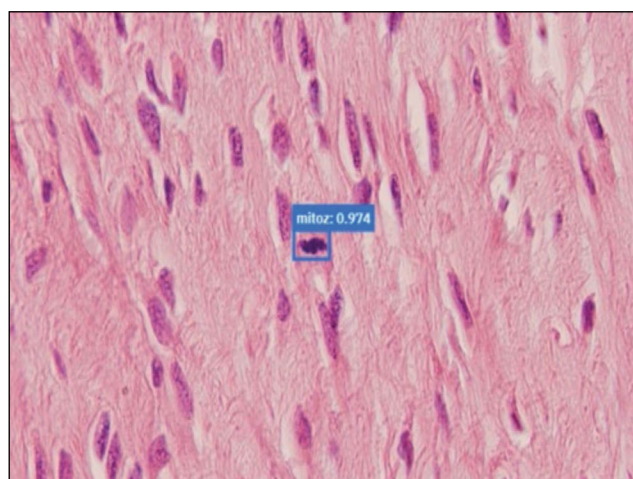


Fig. 6. The result of a program for drawing an object on an image. The model detected pathological mitosis with a probability of 97.4%.

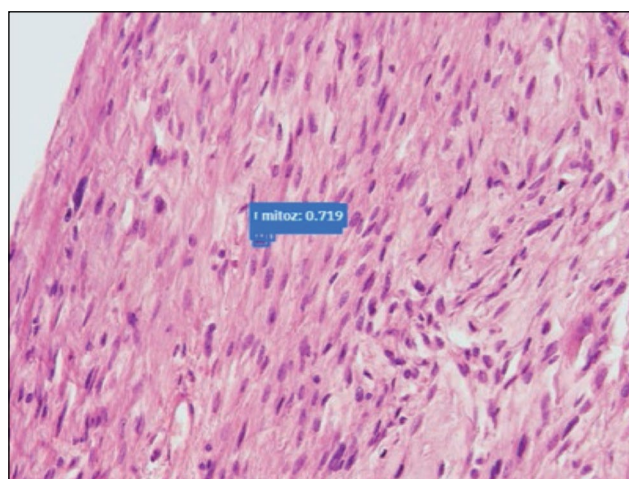


Fig. 7. The model defined one object as several.

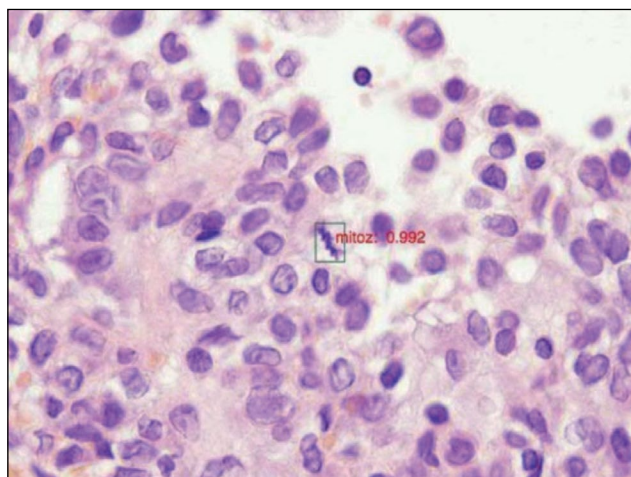


Fig. 8. The model found the object “pathological mitosis” with a probability of 99.2%.

malignant tumors of the musculoskeletal system were scanned and processed using a neural network model. The results of the morphological analysis were presented as a set of images, in which the sought-after objects (i.e., pathological mitoses) and the probability with which the model classified the revealed object into this category were highlighted in a square frame (Fig. 8).

The images in which the model found the “pathological mitosis” objects were presented to an expert pathologist. After analyzing all the images, the expert confirmed that the pathological mitoses revealed on the histological preparations of patients with a probability higher than 70% (Fig. 8) indicated the presence of a malignant tumor of the musculoskeletal system. The “pathological mitosis” objects, detected by the model with a probability lower than 60%, were not pathological mitoses. The expert also confirmed that histological preparations on which the model did not reveal “pathological mitosis” objects with a probability of 70% or higher can be diagnosed as a benign tumor or tumor-like process.

Metrics and characteristics of the created model

Having received a histological image, the model can give two responses:

- Positive indicates the presence of the “pathological mitosis” object in the image;
- Negative indicates the absence of the “pathological mitosis” object in the image.

In this case, during the training process, intermediate control testing of the trained mathematical model of the neural network is performed with the calculation of the following parameters:

- True Positive (TP) indicates the number of correct responses about the presence of pathological mitosis;
- False Positive (FP) indicates the number of false responses about the presence of pathological mitosis;
- True Negative (TN) indicates the number of correct responses about the absence of pathological mitosis;

- False Negative (FN) indicates the number of false responses about the absence of pathological mitosis.

The main metric of the model is the accuracy parameter. It indicates the proportion of correct responses of the algorithm. This parameter measures the percentage of correctly classified images and is calculated by the equation $(TP+TN)/(TP+TN+FP+FN)$. It is noteworthy that this metric is useless in problems with unequal classes, so it is necessary to ensure that the same number of objects is maintained in each category.

For additional assessment of the algorithm quality, the precision and recall metrics are introduced. Precision determines the extent that one can trust the model. It shows the percentage of images that are identified correctly. In other words, when the model searches for an object, precision indicates the frequency it does so correctly, which is calculated as $TP/(TP+FP)$.

Recall determines the number of violations that the model finds. It shows the proportion of objects out of all objects of a given class found by the algorithm, that is, how often it is identified when an image is assigned to a given category. Recall is calculated as $TP/(TP+FN)$.

At the same time, both metrics characterize different aspects of the quality of the trained mathematical model, namely, the higher the precision, the fewer false responses, the higher the recall, the fewer false omissions. Precision and recall, unlike accuracy, do not depend on the ratio of classes and are therefore applicable in conditions of unbalanced samples.

The harmonic mean (or F-measure) was used as the final measure of quality assessment:

$$F=2 \times \text{precision} \times \text{recall} / (\text{precision} + \text{recall}).$$

The F-measure is the standard in machine learning for obtaining the average accuracy. It reaches its maximum when recall and precision are equal to one and is close to zero if one of the arguments is close to zero.

Characteristics of the obtained model:

- precision = 0.99834;
- recall = 1;
- accuracy = 0.958.

We calculate the F-measure as $F = (2 \times 0.99834 \times 1) / (0.99834 + 1) = 0.99917$.

Similarly, from the equation $\text{recall} = TP/(TP+FN)$ we obtain:

$$TP/(TP+FN) = 1 \Rightarrow TP = (TP+FN) \Rightarrow FN = 0; TP = 1.$$

Substituting the value revealed into the equation, we obtain:

$$\text{Precision} = TP/(TP+FP) = 0.99834 \Rightarrow FP = 0.0016.$$

Thus, the probability of obtaining false positives, according to the internal characteristics of the model, is less than two tenths of a percent (i.e., from 4 to 10 false responses per histological slide). This paper provides the following case as a clinical example.

Patient E, born in 1996, at the age of 17 noted the appearance of a tumor-like formation in the distal part of the right femur. In 2016, surgery to remove the neoplasm was performed at the healthcare facility at the place of residence; the histological conclusion was osteochondral exostosis. Subsequently, the patient noted a relapse of the neoplasm. In 2019–2022, she was examined at the healthcare facility at the place of residence; continued growth and deterioration were detected, and therefore, it was recommended to contact a federal center. The patient contacted the N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics. The presented CT scans from 2019 to 2022 and magnetic resonance imaging from 2022 revealed a massive parosteal neoplasm that had spread into the soft tissues of the thigh and lower leg, with involvement of the femoral vascular bundle, sciatic nerve, and popliteal vascular-nerve bundle in the tumor process. When reviewing histological preparations from 2016, a bone neoplasm was detected, which was represented by bundles of fibroblasts and osteoblast-like cells randomly located in the collagen stroma with mild nuclear atypia, single pathological mitoses, signs of atypical osteogenesis, namely, afunctionally located bone trabeculae of varying degrees of maturity, and infiltrative tumor growth into the adjacent striated muscle fibers. Histological conclusion included the histological presentation, taking into account the data of radiation diagnostic methods, corresponding to parosteal osteosarcoma of the GI of the distal right femur.

Within the software testing, histological preparations were scanned and examined using the developed software. Single figures of pathological mitoses were revealed in the histological preparations, which is consistent with the histological conclusion of this study.

DISCUSSION

In most of the analyzed studies, the pathologist's responses are compared with the result of the mathematical model, which, in our opinion, is a conceptual error, since pathologists themselves do not always agree on the diagnosis, and the diagnosis made by the majority of votes is not always correct. From the standpoint of this study, it is advisable to use AI models as a tool for the primary processing of the incoming flow of graphic information received during scanning of histological preparations.

In addition, in the process of analyzing publications on similar topics, we noticed that scientific studies in the field of pathohistological diagnostics use neural networks not to detect specific histological patterns, but to classify or, at best, segment histological images, which significantly reduces the accuracy of the work and, as a result, the reliability of the study. In addition, such an approach is impossible in streaming mode and requires additional time and knowledge in the field of computer technology from the doctor, which can complicate the work of the pathologist. Therefore, we

believe such tools most probably will not be in demand among specialists.

We are aware of the study by Pantanowitz et al. [11], which reported the implementation of an AI-based algorithm for the automatic detection of prostate cancer, but the magnification of $\times 6$ and $\times 200$ used by that study on histological preparations when training the model casts doubt on the possibility of using this model in clinical practice. The image classification method used in that article [11] does not search for objects in the images, as shown by the illustrations. Using the classification method, it is possible only to determine the category to which the image belongs, the probability with which the model assigns the image to this category, and a heat map. Due to the low accuracy of the classification method, high requirements are imposed on the images, in terms of size, magnification, and preprocessing. All image fragments, both used to create the model and processed by the model, must be of the same size and be performed at the same magnification. The classification method cannot process all histological slides and identify fragments on them that belong to a particular category. In addition, the work under consideration does not present either the issues of choosing the neural network architecture for creating the model, or the requirements for the images.

The main problem with using the classification method is the need to use a large number of prepared images to create the model. The study by Pantanowitz et al. reported 1,357,480 labeled image areas [11]. However, as it is known, models constructed using the classification method require preliminary preparation of the image data set, while the topic of image preprocessing is not mentioned in this article.

The study by Pantanowitz et al. [11] focused on the development of a deep learning algorithm to improve the assessment of prostate cancer according to the Gleason scale. However, the article did not present the most important aspect, namely, what pathohistological features were trained in the "machine vision," on the basis of which differential diagnostics was performed between adenocarcinomas with different degrees of malignancy. In addition, the classification method was also used in that study. If the images in the data set used to train and test the AI model have significant differences, a large number of omissions and false responses can occur, which makes it impossible to use the model in clinical practice. Therefore, we question both the possibility of using the classification method for histological diagnostics in clinical practice and the practical value of the AI model created in the said study [11].

The first rather serious problem that we faced was the choice of the neural network architecture. Theoretically, the more layers a neural network has, the better the result it can show. However, as the layers of a neural network increase, its accuracy sharply decreases, which is caused by the disappearance of the gradient (i.e., backpropagations). This happens because the backpropagation process finds the derivatives of the entire network, moving from the last layer

to the first layer. According to the chain rule for calculating derivatives, the derivatives of each layer are multiplied by each other to calculate the derivatives of the input layers. The repeated multiplication process makes the derivatives and, therefore, the weights infinitely small. Therefore, the thresholds of the input layers are not updated during the training process. Since these input layers are critical for recognizing key elements of the input data, this results in inaccuracy of the entire network and slow learning speed.

Therefore, we analyzed the architecture of the neural ResNet, which uses residual blocks that bypass one or more layers. The residual block trains the residual function, and adding residual blocks allowed preserving large gradients to the original layers, mitigating the vanishing gradient problem.

To create a neural network model, we used the open-source framework Detectron2, released by Facebook AI Research. Detectron2 enabled working with both Model Zoo (a set of pretrained models) and CNN-Zoo (the most famous neural network architectures). In addition, Detectron2 enabled using various data set formats, which made it easy to train the models additionally using the automatic labeling function.

Knowing the specifics of the problem being solved, namely, searching for objects measuring 30×40 pixels in an image measuring 4K pixels, it was necessary to take these features into account when choosing the architecture implementation.

We compared the architectures of the ResNet network with a depth of 50 layers. ResNet extracted the signs from the last convolutional layer of the stage 4, which is called C4. In Detectron2, the architecture of this network was presented as ResNet-50-C4.

We tested another version of the architecture using the FPN technology, which uses a descending architecture with lateral connections to construct a pyramid of functions in the network from single-scale input data. Despite the relevance of the problem, the we were able to find only a few scientific studies on the creation of a mathematical AI model for detecting pathological mitoses, cells, and elements of the intercellular matrix, presented in Russian or international publications. We compared their results with existing scientific publications [12]. Similar to other studies mentioned, they tested the model on image fragments, as well as data sets in the public domain (MITOS2012), and compared the results with that of the developed model.

The ResNet-101 architecture, which has 101 layers, was not previously tested due to the large number of layers and, as a result, the high probability of a large number of false responses. Using the pretrained model from Model Zoo Detectron2, we additionally trained the model using the aforementioned architecture. However, the testing results were unsatisfactory. The model metrics became worse, and functional testing showed poor results.

Another serious problem that we had to solve was the processing of large-sized images. The size of a scanned

histological image ranges from 600 MB to 1.5 GB, whereas the image of pathological mitosis, which the model must find, does not exceed approximately 400 bytes (i.e., 30×40 pixels). In the process of creating and training the model, we faced the problem of detecting small objects in large areas, which is discussed in the article [13]. Due to the high quality of the original images, we were able to divide the image into segments of approximately 400 KB. The algorithm for constructing the model is similar to that proposed in the work of Simonyan and Zisserman [14]. Images taken at different magnifications were used to train the model.

As noted earlier, despite the relevance of the problem, we were unable to find scientific studies on the creation of a mathematical AI model for detecting pathological mitoses, cells, and elements of the intercellular matrix, presented in Russian or international publications. Most of the studies found were of a review or descriptive nature [15–17].

As far as we know, this is the first report on the creation of an AI-based algorithm that allows for the streaming detection of pathological mitoses characteristic of malignant bone tumors in digitized histological preparations, as well as the first example of the clinical use of an AI-based algorithm in bone and joint pathology.

We also reviewed other studies on the use of mathematical models for cancer diagnostics. In studies on the development of a deep learning algorithm to improve prostate cancer Gleason grading [11, 12], they were unable to find out what pathohistological signs the mathematical model was trained on. In addition, these studies did not indicate anything about the architecture used and the creation of the data set, and the choice of model architecture took up a significant part of this study. The quality and size of images that were used to train and test the AI model affected its metrics and the possibilities of using it in diagnostics. We question the applicability of the classification method for histological diagnostics due to its inaccuracy, as well as the practical value of the AI models created in such studies [11, 12, 17, 18] due to the lack of information about the neural network architectures used. In addition, we [11, 12, 17, 18] did not mention the problems we encountered in the process of creating the model, for example, increasing the accuracy of the model and eliminating false responses.

According to this paper, the main problem that still prevents the use of AI models in clinical practice is the lack or insufficient understanding of the basics of pathomorphology on the part of specialists who create AI models, which, as a result, ignores the experience of a pathologist. Mathematicians engaged in data analysis are too keen on comparing neural network architectures and do not try to find practical applications for them. We did not find a single work where histological image data sets were used to test the MASK R-CNN architecture. Studies containing information on testing and comparing neural

network architectures were performed using the Pascal VOC or COCO data sets [6–13].

In addition, specialists who create terabyte databases of digital images often have neither basic knowledge nor experience in creating neural networks and, as a result, do not understand at which magnification these images should be taken and what quality of digitalized histological preparations are suitable for creating AI models. At the same time, expert pathologists are skeptical about new technologies and are in no hurry to share either their accumulated experience and knowledge, or their own data sets of histological images captured over many years of work.

Therefore, in existing approaches to the use of AI in histological diagnostics, there is a significant gap between the mathematical and medical components of this study. All the articles that were studied had a clear bias in one direction or the other, missing the very idea of creating an approach to diagnostics that is understandable to both a doctor and a mathematician, namely, the “task–tool” link.

This paper reports on the development of an AI model for stream processing of digitalized histological preparations and the introduction of this tool into everyday clinical practice. The mathematical model was developed by a team of mathematicians and programmers using the object detection method and the open architecture of the Detectron neural network (Mask R-NN). The created model was tested on an external data set by an expert pathologist with over 30 years of experience in this field to identify pathological mitoses in malignant tumors of both low and high grades of malignancy of the bone and joint system.

As a result of the conducted research, we recommend adhering to certain rules when setting a problem, which should be formulated by specialized medical personnel, as well as when constructing a mathematical model. The basic rules for constructing a model are presented as follows:

- selection of neural network architecture based on the analysis of work on testing this architecture and its suitability for the task;
- formulation of nonfunctional requirements for data set images for both creating and using the model;
- creation of a data set in accordance with the nonfunctional requirements for the architecture selected;
- labeling the data set in accordance with the criteria of expert pathologists;
- use of more than a thousand image fragments for training one category;
- use of three or more categories for recognition;
- absence of jumps or attenuation of metrics during training;
- repeated functional testing on a data set of more than 100 images.

CONCLUSION

This paper has developed a mathematical model of the neural network, used as part of the hardware and software complex for the continuous recognition of pathological mitoses in scanned histological preparations, which can be used as a tool to help a pathologist conduct diagnostics. According to this paper, further elaboration of the model by adding modern research in the field of mathematical methods to the CUDA library of mathematical functions, as well as the development and implementation of data set optimization methods when training the model, are the most promising areas of AI development that must be used for processing and analyzing histological images. This technology will reduce the time and improve the quality of the study, thereby increasing the chances of early diagnostics of the disease and, as a result, the success of patient treatment.

ADDITIONAL INFO

Author contribution. All authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Funding source. The work was carried out within the framework of realization of the research work under the state assignment “Development of a mathematical model of neural network for the system of support of decision making by a pathologist in the diagnosis of diseases of the musculoskeletal system” (RK № 124040100041-5).

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Consent for publication. Written consent was obtained from the patient for publication of relevant medical information and all of accompanying images within the manuscript.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации научно-исследовательской работы по государственному заданию, РК № 124040100041-5, «Разработка математической модели нейронной сети для системы поддержки принятия решения врачом-патологоанатомом в диагностике заболеваний опорно-двигательного аппарата».

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

Информированное согласие на публикацию. Авторы получили письменное согласие законных представителей пациента на публикацию медицинских данных и фотографий.

REFERENCES

1. Dorfman HD, Czerniak B. *Bone tumors*. 2nd edition. St. Louis: Mosby; 2015. 1261 p.
2. Girshick R. Fast R-CNN. In: *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*; 2015.
3. Ren S, He K, Girshick R, Sun J. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*. 2017;9(6):1137–1149. doi: 10.1109/TPAMI.2016.2577031
4. Ren S, He K, Girshick R, Zhang X, Sun J. Object Detection Networks on Convolutional Feature Maps. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*. 2017;39(7):1476–1481. doi: 10.1109/TPAMI.2016.2601099
5. Lin T-Y, Dollár P, Girshick R, He K, Hariharan B, Belongie S. *Feature Pyramid Networks for Object Detection*, Computer Science > Computer Vision and Pattern Recognition [Submitted on 9 Dec 2016 (v1), last revised 19 Apr 2017 (this version, v2)]. Available from: <https://arxiv.org/abs/1612.03144>
6. Girshick R, Donahue J, Darrell T, Malik J. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. In: *CVPR*; 2014. arXiv: 1311.2524.
7. Girshick R, Donahue J, Darrell T, Malik J. Region-Based Convolutional Networks for Accurate Object Detection and Segmentation. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*. 2016;38(1):142–58. doi: 10.1109/TPAMI.2015.2437384
8. Uijlings J, van de Sande K, Gevers T, Smeulders A. Selective search for object recognition. *International Journal of Computer Vision*. 2013;104(2):154–171. doi: 10.1007/s11263-013-0620-5
9. He K, Gkioxari G, Dollár P, Girshick R. Mask R-CNN. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*. 2020;42(2):386–397. doi: 10.1109/TPAMI.2018.2844175
10. Detectron [Internet]. Available from: <https://github.com/facebookresearch/Detectron>
11. Pantanowitz L, Quiroga-Garza GM, BienRonen L, et al. An artificial intelligence algorithm for prostate cancer diagnosis in whole slide images of core needle biopsies: a blinded clinical validation and deployment study. *Lancet Digital Health*. 2020;2(8):e407–e416. doi: 10.1016/S2589-7500(20)30159-X
12. Pantanowitz L, Hartman D, Yan Qi, Eun Yoon Cho, et al. Accuracy and efficiency of an artificial intelligence tool when counting breast mitoses. *Diagn Pathol*. 2020;15(1):80. doi: 10.1186/s13000-020-00995-z
13. Van EttenIn A. *Satellite Imagery Multiscale Rapid Detection with Windowed Networks*. arXiv: 1809.09978v1. Available from: <https://arxiv.org/pdf/1809.09978.pdf>
14. Simonyan K, Zisserman A. *Very deep convolutional networks for large-scale image recognition*. 10 Apr 2015. arXiv: 1409.1556. Available from: <https://arxiv.org/pdf/1409.1556.pdf>
15. Barisonia L, Hodgins JB. Digital pathology in nephrology clinical trials, research, and pathology practice. *Curr Opin Nephrol Hypertens*. 2017;26(6):450–459. doi: 10.1097/MNH.0000000000000360
16. Burt JR, Torosdagli N, Khosravan N, et al. Deep learning beyond cats and dogs: recent advances in diagnosing breast cancer with deep neural networks. *Br J Radiol*. 2018;91(1089):20170545. doi: 10.1259/bjr.20170545
17. Mermel C, Kunal Nagpal MS. Using AI to identify the aggressiveness of prostate cancer. *Google Health*. 2020. Available from: <https://blog.google/technology/health/using-ai-identify-aggressiveness-prostate-cancer>
18. Nagpal K, Foote D, Tan F, et al. Development and Validation of a Deep Learning Algorithm for Gleason Grading of Prostate Cancer from Biopsy Specimens. *JAMA Oncol*. 2020;6(9):1–9. doi: 10.1001/jamaoncol.2020.2485

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dorfman H.D., Czerniak B. *Bone tumors*. 2nd edition. St. Louis: Mosby, 2015. 1261 p.
2. Girshick R. Fast R-CNN. In: *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2015.
3. Ren S., He K., Girshick R., Sun J. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks // *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*. 2017. Vol. 39, № 6. P. 1137–1149. doi: 10.1109/TPAMI.2016.2577031
4. Ren S., He K., Girshick R., Zhang X., Sun J. Object Detection Networks on Convolutional Feature Maps // *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*. 2017. Vol. 39, № 7. P. 1476–1481. doi: 10.1109/TPAMI.2016.2601099
5. Lin T-Y., Dollár P., Girshick R., He K., Hariharan B., Belongie S. *Feature Pyramid Networks for Object Detection*, Computer Science > Computer Vision and Pattern Recognition [Submitted on 9 Dec 2016 (v1), last revised 19 Apr 2017 (this version, v2)]. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/1612.03144>
6. Girshick R., Donahue J., Darrell T., Malik J. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. In: *CVPR*, 2014. arXiv: 1311.2524.
7. Girshick R., Donahue J., Darrell T., Malik J. Region-Based Convolutional Networks for Accurate Object Detection and Segmentation // *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*. 2016. Vol. 38, № 1. P. 142–58. doi: 10.1109/TPAMI.2015.2437384
8. Uijlings J., van de Sande K., Gevers T., Smeulders A. Selective search for object recognition // *International Journal of Computer Vision*. 2013. Vol. 104, № 2. P. 154–171. doi: 10.1007/s11263-013-0620-5
9. He K., Gkioxari G., Dollár P., Girshick R., Mask R-CNN // *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*. 2020. Vol. 42, № 2. P. 386–397. doi: 10.1109/TPAMI.2018.2844175
10. Detectron [Интернет]. Режим доступа: <https://github.com/facebookresearch/Detectron>
11. Pantanowitz L., Quiroga-Garza G.M., BienRonen L., et al. An artificial intelligence algorithm for prostate cancer diagnosis in whole slide images of core needle biopsies: a blinded clinical validation and deployment study // *Lancet Digital Health*. 2020. Vol. 2, № 8. P. e407–e416. doi: 10.1016/S2589-7500(20)30159-X
12. Pantanowitz L., Hartman D., Yan Qi, Eun Yoon Cho, et al. Accuracy and efficiency of an artificial intelligence tool when counting breast mitoses // *Diagn Pathol*. 2020. Vol. 15, № 1. P. 80. doi: 10.1186/s13000-020-00995-z
13. Van EttenIn A. *Satellite Imagery Multiscale Rapid Detection with Windowed Networks*. arXiv: 1809.09978v1. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1809.09978.pdf>
14. Simonyan K., Zisserman A. *Very deep convolutional networks for large-scale image recognition*. 10 Apr 2015. arXiv: 1409.1556. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1409.1556.pdf>

15. Barisonia L., Hodgins J.B. Digital pathology in nephrology clinical trials, research, and pathology practice // *Curr Opin Nephrol Hypertens*. 2017. Vol. 26, № 6. P. 450–459. doi: 10.1097/MNH.0000000000000360

16. Burt J.R., Torosdagli N., Khosravan N., et al. Deep learning beyond cats and dogs: recent advances in diagnosing breast cancer with deep neural networks // *Br J Radiol*. 2018. Vol. 91, № 1089. P. 20170545. doi: 10.1259/bjr.20170545

17. Mermel C., Kunal Nagpal M.S. Using AI to identify the aggressiveness of prostate cancer // *Google Health*. 2020. Режим доступа: <https://blog.google/technology/health/using-ai-identify-aggressiveness-prostate-cancer>

18. Nagpal K., Foote D., Tan F., et al. Development and Validation of a Deep Learning Algorithm for Gleason Grading of Prostate Cancer from Biopsy Specimens // *JAMA Oncol*. 2020. Vol. 6, № 9. P. 1–9. doi: 10.1001/jamaoncol.2020.2485

AUTHORS' INFO

* **Gennadiy N. Berchenko**, MD, Dr. Sci. (Medicine), professor;
address: 10 Priorova str., 127299 Moscow, Russia;
ORCID: 0000-0002-7920-0552;
eLibrary SPIN: 3367-2493;
e-mail: berchenko@cito-bone.ru

Nina V. Fedosova, MS;
ORCID: 0000-0002-0829-9188;
eLibrary SPIN: 5380-3194;
e-mail: hard_sign@mail.ru

Mikhail G. Kochan;
ORCID: 0009-0002-0699-1370;
e-mail: mk_system@mail.ru

Dmitriy V. Mashoshin;
ORCID: 0009-0003-5442-5055;
eLibrary SPIN: 5981-4084;
e-mail: dima_mash@mail.ru

ОБ АВТОРАХ

* **Берченко Геннадий Николаевич**, д-р мед. наук, профессор;
адрес: Россия, 127299, Москва, ул. Приорова, 10;
ORCID: 0000-0002-7920-0552;
eLibrary SPIN: 3367-2493;
e-mail: berchenko@cito-bone.ru

Федосова Нина Вениаминовна;
ORCID: 0000-0002-0829-9188;
eLibrary SPIN: 5380-3194;
e-mail: hard_sign@mail.ru

Кочан Михаил Геннадьевич;
ORCID: 0009-0002-0699-1370;
e-mail: mk_system@mail.ru

Машошин Дмитрий Викторович;
ORCID: 0009-0003-5442-5055;
eLibrary SPIN: 5981-4084;
e-mail: dima_mash@mail.ru

* Corresponding author / Автор, ответственный за переписку

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto624522>

Evaluation of the elemental composition and radiological density of bone tissue when replacing a metaphyseal defect with bioceramic phosphate-silicate granules (experimental study)

Andrey A. Rozhdestvenskiy¹, German G. Dzuba¹, Denis A. Polonyankin²

¹ Omsk State Medical University, Omsk, Russia;

² Omsk State Technical University, Omsk, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: It is known that bioceramic implants containing various calcium or silicon compounds in isolation demonstrate osteoconductive effect in the replacement of post-traumatic bone defects. The combined use of these elements in single material should potentiate the organotypic filling of the bone cavity by creating favorable ion microenvironment and staged biodegradation.

AIM: To identify the correlation of radiological indicators of the density of newly formed bone tissue and content of micro- and macronutrients in a bone defect when it is replaced by bioceramics with various mass ratio of calcium phosphate and silicate.

MATERIALS AND METHODS: The study was performed on male rabbits of the "white giant" breed, which, after receiving a standardized delimited metaphyseal bone defect, implants with variable ratio of calcium phosphate and calcium silicate (in proportions of 40/60, 50/50 and 60/40 wt. %) were used to replace it. The results were evaluated using multispiral computed tomography and scanning electron microscopy energy dispersive analysis with detection by the method of correlation analysis of possible connections between the obtained data.

RESULTS: Quantitative indicators of calcium and phosphorus content in bone regenerate in all groups increased mainly in the period from 30 to 60 days, and silicon content, reaching maximum amounts by the 30th day of the experiment, subsequently decreased monotonously, which showed participation of this element in the starting regenerative processes, and its decrease served as a marker of organotypic restructuring. In the elemental analysis of newly formed bone tissue during implantation of bioceramics containing phosphate and calcium silicate in the proportion of 60/40 wt. %. The highest amounts of calcium, phosphorus and silicon and the highest density of newly formed bone tissue were noted, which had direct correlation, and this pattern was observed both in the early stages (30 days) and throughout the experimental study.

CONCLUSION: Analyzing the data obtained, it can be concluded that it is advisable to study the features of the course of reparative osteogenesis depending on the ionic environment, as well as the high potential of using synthetic bioceramics in general and the prospects of using implants on the basis of phosphate-silicate composites for bone defects replacement.

Keywords: osteogenesis; experiment; implant; calcium phosphate; calcium silicate; multispiral computed tomography; scanning electron microscopy; energy dispersive analysis.

To cite this article:

Rozhdestvenskiy AA, Dzuba GG, Polonyankin DA. Evaluation of the elemental composition and radiological density of bone tissue when replacing a metaphyseal defect with bioceramic phosphate-silicate granules (experimental study). *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2024;31(3):351–366.

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto624522>

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto624522>

Оценка элементного состава и рентгенологической плотности костной ткани при замещении метафизарного дефекта биокерамическими фосфат-силикатными гранулами (экспериментальное исследование)

А.А. Рождественский¹, Г.Г. Дзюба¹, Д.А. Полонянкин²¹ Омский государственный медицинский университет, Омск, Россия;² Омский государственный технический университет, Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Известно, что биокерамические имплантаты, изолированно содержащие различные соединения кальция или кремния, демонстрируют остеокондуктивный эффект при замещении посттравматических дефектов костной ткани. Совместное использование этих элементов в едином материале должно потенцировать органотипическое заполнение костной полости путём создания благоприятного ионного микроокружения и стадийной биодеградации.

Цель. Выявить корреляцию рентгенологических показателей плотности новообразованной ткани и содержания микро- и макроэлементов в костном дефекте при его замещении биокерамикой с различным массовым соотношением фосфата и силиката кальция.

Материалы и методы. Исследование выполнялось на кроликах-самцах породы белый великан, у которых после получения стандартизированного отграниченного метафизарного костного дефекта для его замещения использовали имплантаты с варьируемым соотношением фосфата кальция и силиката кальция (в пропорциях 40/60, 50/50 и 60/40 масс.%). Оценка результатов проводилась методами мультиспиральной компьютерной томографии и растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа с выявлением методом корреляционного анализа возможных связей между полученными данными.

Результаты. Количественные показатели содержания кальция и фосфора в костном регенерате во всех группах нарастали преимущественно в сроки от 30 до 60 суток, а показатели кремния, достигая максимума к 30-м суткам эксперимента, в дальнейшем монотонно снижались, что свидетельствовало об участии этого микроэлемента в пусковых регенераторных процессах, а его снижение служило маркером органотипической перестройки. В ходе элементного анализа новообразованной костной ткани при имплантации биокерамики, содержащей фосфат и силикат кальция в пропорции 60/40 масс.%, были отмечены наибольшее количество кальция, фосфора и кремния и наибольшая плотность новообразованной костной ткани, что имело прямую корреляционную связь, причём эта закономерность наблюдалась как в ранние сроки (30 суток), так и на протяжении всего экспериментального исследования.

Заключение. Анализируя полученные данные, можно сделать вывод о целесообразности изучения особенностей течения репаративного остеогенеза в зависимости от ионного окружения, а также высоком потенциале использования синтетической биокерамики в целом и перспективности применения имплантатов на основе фосфатно-силикатных композитов для замещения костных дефектов.

Ключевые слова: остеогенез; эксперимент; имплантат; фосфат кальция; силикат кальция; мультиспиральная компьютерная томография; растровая электронная микроскопия; энергодисперсионный анализ.

Как цитировать:

Рождественский А.А., Дзюба Г.Г., Полонянкин Д.А. Оценка элементного состава и рентгенологической плотности костной ткани при замещении метафизарного дефекта биокерамическими фосфатно-силикатными гранулами (экспериментальное исследование) // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2024. Т. 31, № 3. С. 351–366. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto624522>

BACKGROUND

Bone tissue deficiency resulting from osteodestructive processes requires organotypic replenishment. In addition to posttraumatic osteogenesis [1] and Ilizarov bone transport methods [2], free bone autograft implantation is an ideal method for bone tissue restoration, which has been recognized in orthopedics in recent decades [3]. With the development of medical technologies and a detailed study of the patterns of bone tissue reparation, the optimal range of materials used increasingly includes bioceramic implants that have undergone a transformation from bioinert and biotolerant to those that optimize and potentiate reparative regeneration at cellular and molecular levels [4]. Owing to its biochemical composition, the implant induces a favorable microenvironment, affecting the elemental composition of the bone, which has an activating effect on osteogenic differentiation of cells, and its staged degradation contributes to the organotypic replacement of the bone defect [5]. Hence, researchers are particularly interested in studying essential (magnesium, copper, zinc, manganese, and iron) and conditionally essential (boron and silicon) microelements of bone tissue, which have varying mechanisms of action in reparative regeneration and can therefore be differentially used in implantable materials. For example, it was revealed that copper, manganese, and zinc are cofactors of enzymes responsible for the synthesis of collagen and glycosaminoglycans, which in turn serve as the basis for bone matrix restoration [6], and their combined deficiency leads to a significant decrease in the calcium level in skeletal tissues [7]. Boron has a dose-dependent effect on the differentiation of bone marrow stromal cells. At a concentration of up to 100 ng/ml, it induces a positive effect, which is confirmed by an increase in levels of osteocalcin; type I collagen; bone morphogenesis proteins 4, 6, and 7; osteopontin, bone sialoprotein, and Runx2; however, at a level >1000 ng/ml, boron inhibits histogenesis [8, 9]. Silicon is crucial in the synthesis of sialoproteins and type I collagen [10] and activates the differentiation of osteoblasts, thereby increasing the osteogenic cellular potential [11]. Several studies have shown that at the initial stages of reparation, the contents of phosphorus and calcium in the intercellular fluid relatively increase, and the concentration of silicon significantly increases by 150–200 times [12]. In the future, as the bone regenerate matures, a reverse trend is expected, including a decrease in the silicon content and an increase in phosphorus and calcium levels [13]. Such a pattern can serve as a marker of an adequate course of the reparative process.

Thus, data on the active participation of silicon in osteogenesis indicate the possibility of developing artificial implantable materials used to replace bone defects, containing silicon along with calcium and phosphorus. Testing of such composites and studying the dynamics of changes in the content of these elements in reparative regeneration of bone tissue are relevant.

This study aimed to identify the correlation between radiographic indicators of the density of newly formed bone tissue and the content of micro- and macroelements in a bone defect when it is replaced with bioceramics with different mass ratios of phosphate and calcium silicate.

MATERIALS AND METHODS

RESEARCH DESIGN

An experimental, single-center, prospective, blind, continuous, controlled study was conducted.

ELIGIBILITY CRITERIA

The study was performed on 3-month-old male white giant rabbits weighing 4000 ± 200 grams.

STUDY CONDITIONS

The study was conducted at the Omsk State Medical University (OmSMU) of the Ministry of Health of Russia.

METHOD OF MEDICAL INTERVENTION

An implant with a variable ratio of calcium phosphate (hydroxyapatite, HA, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) and calcium silicate (wollastonite [WT] and $\beta\text{-CaSiO}_3$) containing gelatin as a binding component (RU patent no. 2785143, dated 12/05/2022) was developed and manufactured at OmSMU. Macroscopically, the implant represented a set of spherical granules ranging in size from 0.2 mm to 1.0 mm in diameter, containing HA/WT in a proportion of 60/40 wt.%, 50/50 wt.%, and 40/60 wt.%. The use of these ratios was explained by the choice of the starting point of the study, which was determined at equilibrium amounts of the components, and by identifying the potential for improving regeneration with an increase in the proportion of calcium phosphate or silicate.

Table 1 presents the elemental composition of the initial powders from which the implantable granules were made.

No significant differences were found in the mass fractions of calcium and gelatin in the initial powders in all groups. The highest amount of phosphorus was noted in the 60/40 group, which had a significant difference with the 40/60 group, and that of silicon was observed in the 40/60 group, which was significantly different from the 60/40 group.

Table 2 shows some physical characteristics of the implantable granules.

The physical properties of the granules at any ratios of the initial elements did not differ, and the specified parameters of the proposed implantable material seemed comparable and optimal in terms of physicochemical characteristics for its use in replacing bone defects.

The animals were randomly divided into four groups (24 animals in each group): the control group (group 1), wherein the defect was not filled, and three main study groups, wherein the animals were implanted with a material with different ratios of calcium phosphates and silicates into the formed bone defect (group 2 with HA/WT ratio 60/40

Table 1. The composition of composite powders used to produce granules and the proportion of gelatin in granules, wt. %

HA / WO	Mass fractions of elements in powders			Proportion of gelatine
	calcium	phosphorus	silicon	
60/40	35.3±0.2	9.9±0.1*	8.8±0.2*	18.7±0.5
50/50	33.9±0.6	8.5±0.2	10.7±0.7	18.4±0.7
40/60	33.6±0.7	6.8±0.1*	12.7±0.4*	20.4±0.3

Note. * — differences between groups are statistically significant, HA — hydroxyapatite, WO — wollastonite.

Table 2. Physical characteristics of granules

HA / WO, weight. %	HV _{0.02} , Mpa	ρ _{av} , g/cm ³	ρ _{true} , g/cm ³	P, %
60/40	22.2±0.4	1.09±0.03	2.35±0.07	52.2±2.1
50/50	26.7±0.4	1.07±0.03	2.61±0.12	59.6±2.2
40/60	24.1±0.3	1.01±0.04	2.27±0.14	55.4±3.0

Note. HV_{0.02} — Vickers microhardness, ρ_{av}, ρ_{true} — average and true density of granules, P — granule porosity, HA — hydroxyapatite, WO — wollastonite.

wt.%, group 3 with HA/WT ratio 50/50 wt.%, and group 4 with HA/WT ratio 40/60 wt.%). Subsequently, at days 30, 60, and 90, eight animals of each group were withdrawn to analyze the results of the experimental study.

All animals underwent a standardized compression defect of the metaepiphyseal part of the femur under intramuscular sedation with a solution of tiletamine hydrochloride and zolazepam hydrochloride (with the dosage calculated based on body weight), which was filled with the test material in the experimental groups, whereas in the control group, plastic replacement of the defect was not performed. Surgery involved the formation of a full-layer fragment of the cortical plate measuring 10 × 5 mm along the anterior–outer surface of the distal metaepiphysis using a milling saw, followed by its impression to a depth of 8 mm. Moreover, the volume

of the formed defect cavity was identical in all series of the experiment and amounted to 400±20 mm³ (RU patent no. 20802431, dated August 28, 2023). After elevation of the osteotomized fragment, the formed post-compression bone cavity remained intact (Fig. 1a), or 0.4 cm³ of synthetic material was placed in the defect site (Fig. 1b). The cortical plate was fixed in the maternal bed, and the soft tissues were sutured layer by layer.

OUTCOME RECORDING METHODS

Bone tissue response to implantation and the dynamics of reparative processes were monitored by X-ray examination (Toshiba Radrex digital X-ray diagnostic complex) and multispiral computed tomography (MSCT, Toshiba Aquilion CXL 128 X-ray computed tomograph) at the

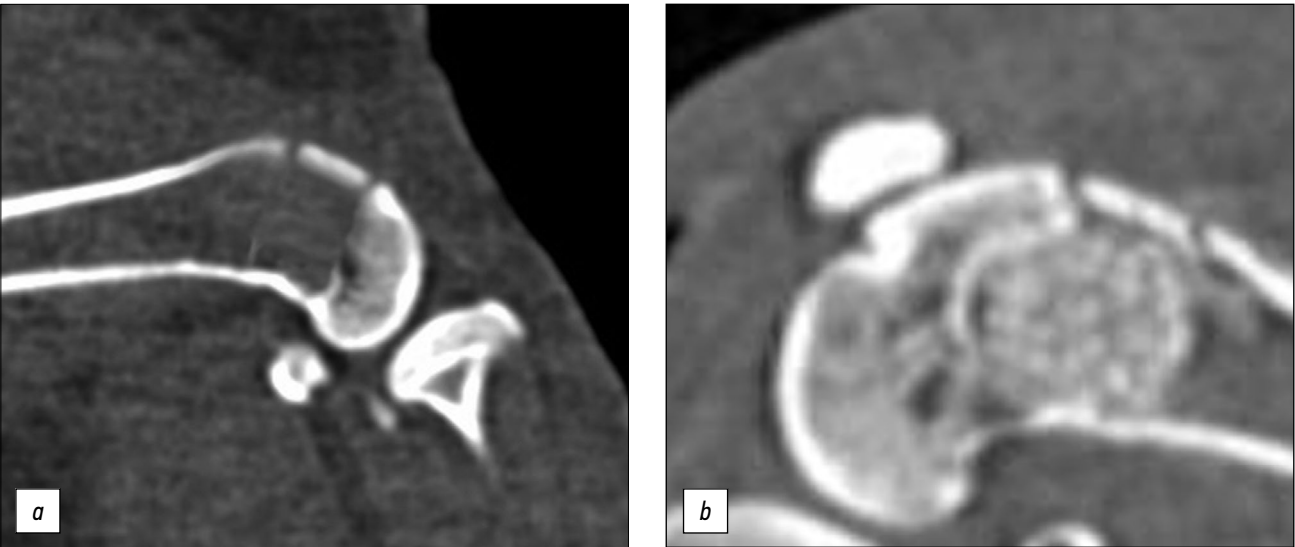


Fig. 1. CT of the metaphyseal defect area: *a* — the zone of compression defect of the distal metaphysis of the femur of a laboratory animal, group 1 (CT-scan), *b* — the zone of compression defect of the distal metaphysis of the femur of a laboratory animal, group 3 (CT-scan).

initial stages of follow-up (on day 7 after surgery), and on days 30, 60, and 90 after implantation. The density of newly formed bone tissue was measured using MSCT scans in the sagittal projection in standardized indices, Hounsfield units (HU) in five selected identical points located in the area of the proximal, distal sections and the geometric center of the bone cavity, subcortical zones under the resected part, and the contralateral cortical plates. When compared in groups, the indices were summed up and subjected to statistical analysis according to the Misch scale [14], proposed for assessing newly formed bone tissue with the allocation of four variants of regenerate density indices depending on the measurement results. In variant 1, the density exceeding 1250 HU corresponded to an isolated initial layer of compact bone; that from 850 to 1250 HU corresponded to bone with uniform expression of compact and spongy substance, that from 350 to 850 HU corresponded to bone with a porous compact plate and loose spongy substance, and that less than 350 HU corresponded to an almost complete absence of a compact layer and unformed trabecular spongy bone.

The elemental composition of the tissue in the area of the bone defect being replaced was analyzed with scanning electron microscopy and energy-dispersive analysis (SEM-EDA) using a JCM-5700 scanning electron microscope equipped with a JED-2300 (JEOL) X-ray energy-dispersive spectrometer. The average longitudinal section 2 mm thick of the metaphyseal femur in the defect area was assessed in animals withdrawn from the experiment on days 30, 60, and 90. Before the analysis, soft tissues, including the periosteum, were carefully removed from the surface of the bone fragment, and then the bone was dried at 38°C for 4 weeks. To orient the structure of the defect, milling grooves were applied to the macropreparation, limiting the defect area. The study field was lowered by 4 mm from the center of the resected cortical plate, thereby reaching the center of the defect. Using the SEM-EDA method, micrographs and data on the content of calcium, phosphorus, and silicon in the samples and maps of their distribution in the structure of the near-surface layer of the studied bone tissue fragment were obtained.

STATISTICAL ANALYSIS

Statistical processing of the results was performed on a personal computer using statistical functions in Microsoft Excel 2020 and the Statistica 10.0 application package. As part of descriptive statistics, the indicators of the median, lower, and upper quartiles were calculated. To test the hypothesis of normal data distribution, a Gaussian curve was used. The hypothesis of normality was rejected in most samples; thus, the significance of differences was determined using nonparametric statistics. To compare two independent groups, the Mann–Whitney *U*-test was used. The critical level of significance when testing statistical hypotheses was

0.05. To identify possible relationships between the signs, a correlation analysis was performed using the Spearman rank correlation method. As a result, a number of correlation coefficients (r_s) were obtained for the number of variables selected for analysis.

ETHICAL CONSIDERATIONS

The study was performed in compliance with the principles of humanity set out in the directives of the European Community (86/609 / EEC) and the Helsinki Declaration, based on the approval of the Ethics Committee of OmSMU (no. 128, dated 02/03/2021).

RESULTS

In the postoperative period, the experimental animals were under daily follow-up with control and assessment of vital and laboratory parameters. In days 1–6, changes in the clinical status and behavior of rabbits were observed. In the first 24 hours, the study animals were apathetic, adynamic, did not lean on the operated limb, and refused food. By the end of day 6, the animals had fully restored mobility, appetite, and support ability of the operated limb. In the early postoperative period (day 12), one of the rabbits in the control group had a femur fracture in the area of the formed defect; a slight displacement of the fragments allowed it not to be excluded from the study. In the remaining animals, no traumatic or bacterial complications were detected, which allowed the study to be completed to the final point of withdrawal from the experiment [15].

Control MSCT study performed on day 7 after surgery showed that in all the main groups, the granules completely filled the formed defect, whereas no signs of their migration and pathological periosteal or endosteal reaction were noted. The median density on day 7 after implantation in all experimental groups of animals were very close and ranged from 290 to 305 HU ($p > 0.05$). The median tissue density in the defect area in the control group without implantation of the material at the same time was 108 HU, which was significantly lower than those in the experimental groups.

Subsequently, the MSCT presentation in the control group and in the groups with implantation of materials with different ratios of calcium phosphate and silicate was heterogeneous; however, in all groups, the bone tissue density indicators significantly increased by week 12 of the study (Fig. 2). Thus, in group 1 (Fig. 2a), the average tissue density in the area of the formed defect by the end of the first 4 weeks was 189.1 [175.0; 198.5] HU, and by week 12, demonstrating consistent positive dynamics, it reached 287.1 [276.0; 296.5] HU. Such relatively high average data did not fully correspond to the MSCT presentation, wherein convincing signs of bone regeneration were revealed only in the area of the osteotomized cortical layer and the adjacent endosteal zone. In the central parts of the metaphyseal defect, the parameters of the tissue filling the defect were

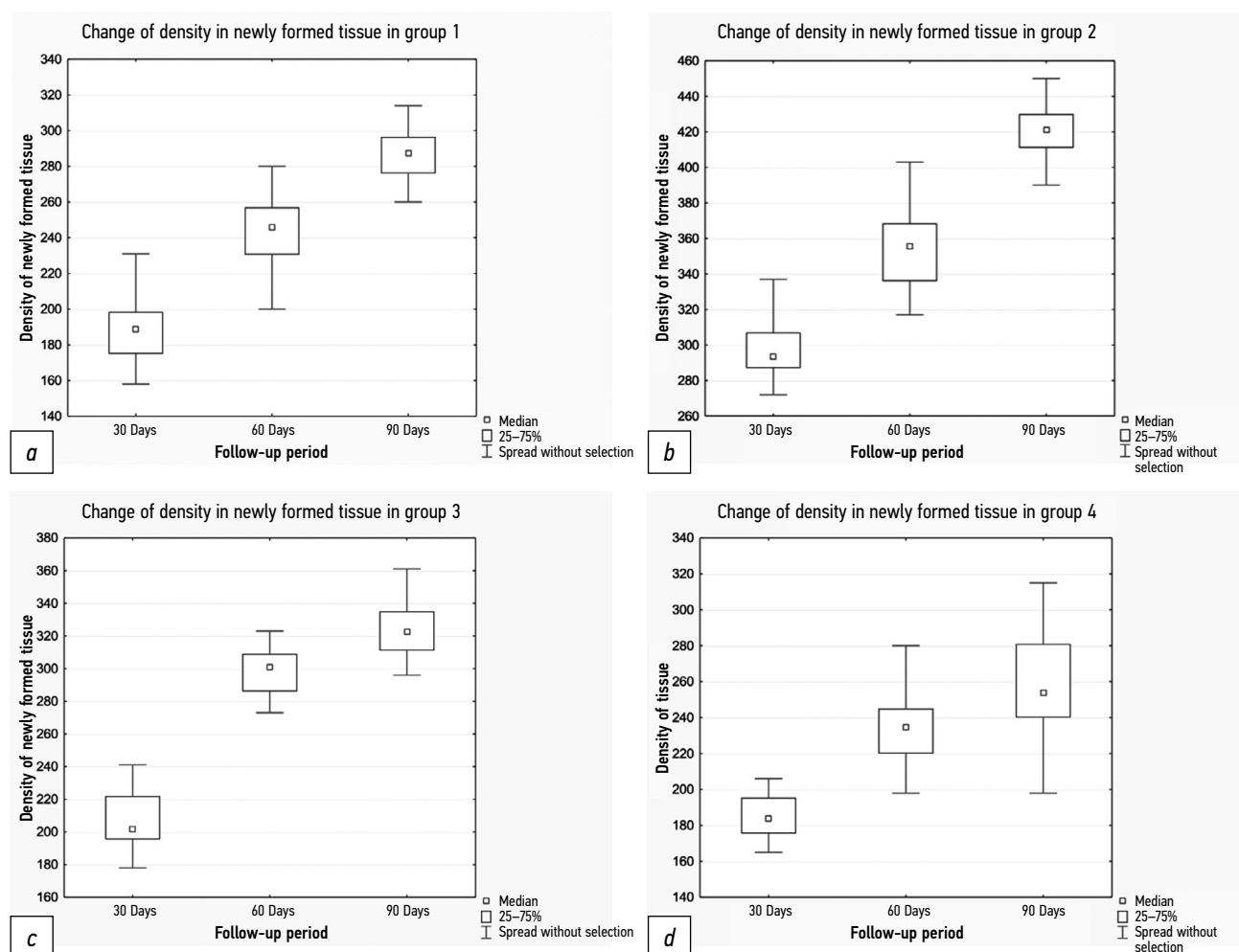


Fig. 2. Density indicators of newly formed bone tissue in the implantation zone of the material in groups: *a* — group 1, *b* — group 2, *c* — group 3, *d* — group 4.

significantly lower than the density indicators characteristic of unformed spongy bone, which determined the minimum level of the integrative result, which did not correspond to type 4 according to the Misch classification.

In group 2 (Fig. 2b), according to the MSCT study results, after 30 days of follow-up, the newly formed tissue with inadequate homogeneity occupied almost the entire volume of the bone defect and reached the minimum values of intact bone in density, corresponding to type 4 according to the Misch classification. Subsequently, throughout the entire follow-up period, a stable tendency toward compaction and restructuring of the bone regenerate was noted, as expressed in achieving an average density of 421.0 [411.0; 430.0] HU by day 90 (type 3 according to the Misch classification), and the dispersion of indicators in different studied areas became minimal.

In group 3 (Fig. 2c), according to the MSCT study, on day 30 after surgery, the average value of the density of newly formed tissue was 202.0 [195.5; 222.0] HU, which was significantly lower than the standard density values of bone tissue according to Misch. The density that determines unformed bone was not achieved by day 90 of the study (322.5

[311.0; 335.1] HU), with a non-critical spread of maximum and minimum values.

Moreover, less positive dynamics of osteogenesis was recorded in group 4 (Fig. 2d) according to MSCT data. On day 30 of follow-up, the average value of the density of newly formed tissue was almost two times lower than the density of unformed spongy bone and amounted to 184.0 [175.5; 195.5] HU. An 18% increase by day 60 and a less obvious 7% improvement by day 90 allowed this indicator to approach only a little closer; however, it still did not correspond to the bone density of type 4 according to the classification of S. Misch.

In assessing the dynamics of the studied indicators in different groups, it should be noted that by day 30 of the experiment, the average value of bone density in group 2 significantly exceeded the similar result in other groups ($p < 0.01$); however, the growth of the parameter in question in days 30–60 was most pronounced in group 3 ($p = 0.0474$), milder in groups 1 and 4 ($p = 0.0481$), and weaker in group 2 ($p = 0.0491$). In days 60–90, the greatest increase in bone density was registered in group 2 ($p = 0.042$), and less intense and almost identical dynamics were revealed in the other

experimental groups ($p=0.046$). Moreover, the final integrative indicators in days 60 and 90 indicated complete replacement of the defect with newly formed bone tissue with obvious signs of the beginning of organotypic restructuring in group 2 ($p < 0.01$). The studied indicators in groups 1 and 4 demonstrated similar dynamics and very close values at the control points of the study, confirming the slow, incomplete, and uneven replacement of the defect with unformed spongy bone ($p=0.048$). In group 3, despite a significant increase in bone density in days 30–60 of follow-up, which reached 63.8%, the final result by day 90 (with an increase dynamics

of 22.2% from days 60–90) did not reach the reference values characteristic of unformed spongy bone ($p=0.046$) (Fig. 3). At the next stage of the study, the bone samples were analyzed using the EDA method. In assessing the amount of calcium, phosphorus, and silicon in the bone tissue of the area of the repaired defect, similar dynamics of the ratio of elements in the study area were recorded in all groups, and the dynamics of changes in absolute quantitative values were the same ($p=0.041$). However, calcium, phosphorus, and silicon content significantly differed between the groups at different times of the

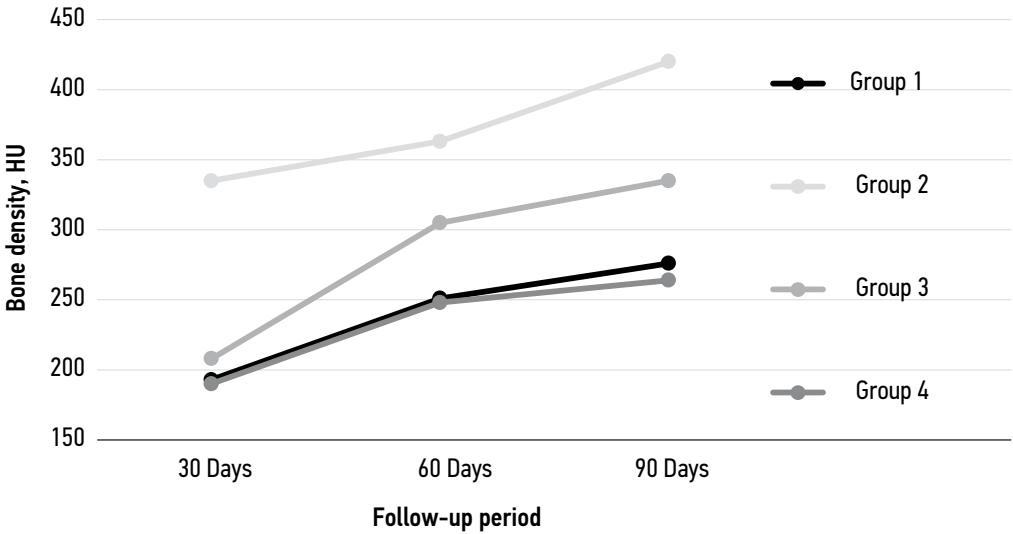


Fig. 3. Diagram of the average density of newly formed bone tissue in the groups during the entire follow-up period.

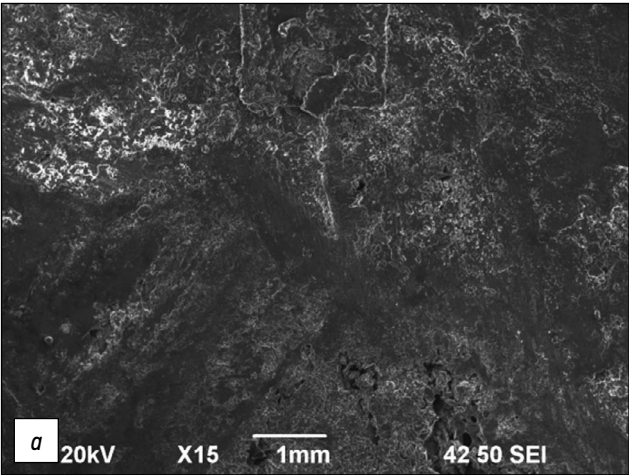
Table 3. Changes in the content of calcium, phosphorus and silicon on the surface of the cut of newly formed bone tissue (according to the terms of the experiment), Me [LQ; HQ]

Elements	Timing	Groups			
		Control	60/40	50/50	40/60
Calcium, weight. %	day 30	14.61 [13.95; 15.22]	20.61 [19.75; 21.55]*	14.75 [12.1; 16.11]	11.31 [10.29; 12.72]
	day 60	26.11 [23.75; 28.45]	35.51 [32.75; 40.01]*	24.7 [22.45; 27.65]	19.95 [17.26; 21.55]
	day 90	28.41 [26.15; 30.22]	36.02 [30.93; 38.25]*	24.08 [21.95; 26.95]	21.75 [19.55; 23.51]
Phosphorus, weight. %	day 30	6.64 [6.39; 7.18]	15.58 [13.67; 17.41]*	12.55 [10.76; 14.65]*	8.69 [7.84; 9.41]*
	day 60	10.10 [9.73; 11.49]	17.71 [16.35; 18.95]*	13.53 [11.41; 16.65]*	12.02 [9.63; 13.11]
	day 90	11.75 [11.23; 12.32]	18.56 [17.94; 19.17]*	14.11 [12.18; 15.35]*	11.61 [10.58; 12.44]
Silicon, weight. %	day 30	0.75 [0.51; 0.81]	1.95 [1.79; 2.15]*	1.45 [1.15; 1.74]*	0.98 [0.91; 1.15]
	day 60	0.23 [0.21; 0.28]	0.51 [0.25; 0.81]*	0.17 [0.11; 0.33]	0.13 [0.03; 0.18]
	day 90	0.04 [0.02; 0.09]	0.17 [0.08; 0.23]*	0.11 [0.05; 0.19]*	0.05 [0.02; 0.07]

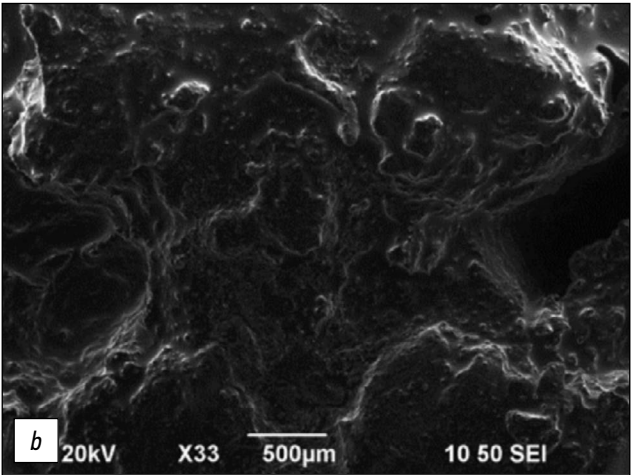
Note. * — differences between groups are statistically significant ($p < 0.05$).

study (Table 3). Calcium levels increased predominantly throughout the monitoring period in all groups ($p < 0.04$). However, they reached their highest value in group 2 by day 30 of follow-up and, at all subsequent times, exceeded the indicators in other groups by 18.3%–44.6% ($p = 0.03$), with a relatively more uniform distribution of elements in the studied areas (Fig. 4).

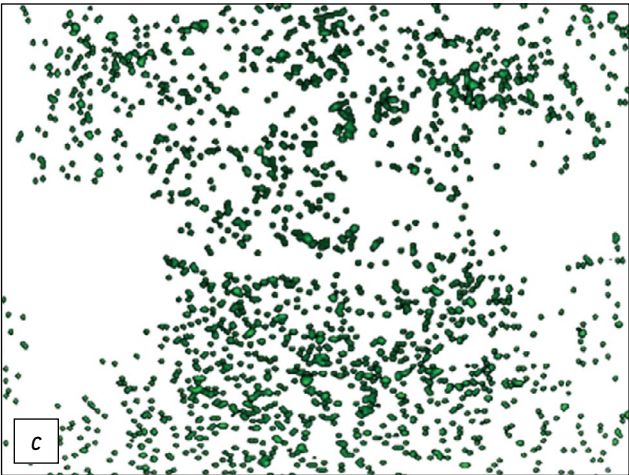
The final calcium levels in the group without bioceramic implantation exceeded those in groups 3 and 4 ($p = 0.045$). Similar dynamics were revealed in the change in phosphorus content in the samples ($p = 0.045$). However, unlike calcium, the final mass fractions of phosphorus in groups 1, 3, and 4 were statistically proportionate, although they remained one-third less than that in group 2 on average ($p = 0.046$).



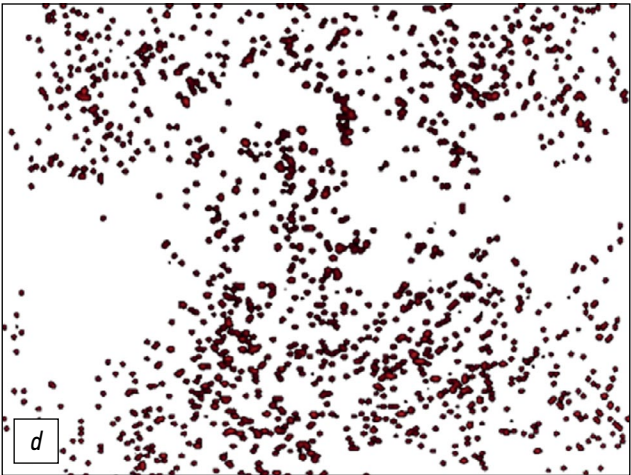
Magnification $\times 15$



Magnification $\times 33$



Magnification $\times 33$



Magnification $\times 33$



Magnification $\times 33$

Fig. 4. Micrography of the surface of a bone sample of a laboratory animal with implantation of granules of the composition HA/WT 60/40 wt.% on day 30 (a, b), maps of the distribution of calcium (c), phosphorus (d) and silicon (e) in this area.

The silicon content in all groups demonstrated the opposite trend, as it changed from maximum amounts on day 30 of the experiment to an almost tenfold decrease by day 90. The highest silicon content in the bone defect area was registered in the group of animals that were implanted with a material containing the smallest amount of calcium silicate (group 2, HA/WT 60/40 wt.%). Moreover, the silicon content in the samples decreased at all stages of the study as the proportion of silicon salt in the granules increased (from 40 to 60 wt.% when changing from materials with a HA/WT proportion of 60/40 wt.% to granules containing calcium phosphate and silicate in a ratio of 40/60 wt.%). Not only the low amount of silicon found on day 30 in group 4 was unexpected, but also the tenfold difference in this indicator by the end of the experiment (day 90) compared to the data in group 2 ($p=0.002$), owing to its maximum values in the initial powders.

According to data of the EDA analysis of the areas of the restored bone defect, it can be concluded that, at all monitoring periods, the content of calcium, phosphorus, and silicon was significantly higher in group 2 than in the other groups ($p=0.02$), which was evident by day 90 ($p=0.02$) (Table 4). Furthermore, the decrease in the silicon level in the studied macropreparations of group 2 at all monitoring

periods occurred less rapidly with similar positive dynamics of calcium and phosphorus indicators.

When conducting Spearman's correlation analysis, significant correlations of medium and high strength were revealed between the level of microelements in the structure of newly formed tissue and bone density in all groups, except for phosphorus in group 3 (in this case, no correlation was noted). The strongest correlation was noted in relation to the amount of silicon and the density of newly formed tissue in groups 1 and 2 ($r=-0.848$ and $r=-0.775$, respectively). A direct correlation between calcium content and tissue density was revealed in all study groups and was assessed as a moderate correlation. Changes in the amount of phosphorus in the bone tissue structure did not always correspond to an increase in the density of newly formed tissue; thus, in group 2, a moderate correlation was noted ($r=0.458$), and in group 3, no correlation was found ($r=0.158$) (Table 5).

DISCUSSION

SUMMARY OF THE MAIN RESULTS OF THE STUDY

The study results indicate that implants containing calcium phosphates and silicates can be used to fill

Table 4. The distribution of trace elements in the structure of the newly formed tissue on the 90th day of the study, Me [LQ; HQ]

Group	Calcium, weight. %	Phosphorus, weight. %	Silicon, weight. %
1	28.41 [26.15; 30.22]	11.75 [11.23; 12.32]	0.04 [0.02; 0.09]
2	36.02 [30.93; 38.25]	18.56 [17.94; 19.17]	0.17 [0.08; 0.23]
3	24.08 [21.95; 26.95]	14.11 [12.18; 15.35]	0.11 [0.05; 0.19]
4	21.75 [19.55; 23.51]	11.61 [10.58; 12.44]	0.05 [0.02; 0.07]

Table 5. Spearman correlation coefficient for the levels of calcium, phosphorus and silicon in biopsies by weight. % and bone density in HU

Group	Elements	r_s	p	t (N-2)
1	Ca/HU	0.691	>0.001	6.526
	P/HU	0.733	>0.001	7.319
	Si/HU	-0.818	>0.001	-9.673
2	Ca/HU	0.681	>0.001	6.298
	P/HU	0.458	0.001	3.503
	Si/HU	-0.775	>0.001	-8.34
3	Ca/HU	0.573	0.0002	4.74
	P/HU	0.158	0.27	1.08
	Si/HU	-0.696	>0.001	-6.58
4	Ca/HU	0.573	>0.001	4.74
	P/HU	0.559	0.00003	4.58
	Si/HU	-0.694	>0.001	-6.54

Note. Ca — calcium, P — phosphorus, Si — silicon.

bone defects, owing to their properties of osteoinduction and osteoconduction in the absence of a pathological inflammatory reaction of the surrounding tissues. The most pronounced osteogenic effect, confirmed by radiation and microscopic research methods, was observed in group 2, wherein materials with a ratio of calcium phosphates and silicates of 60/40 wt.% were implanted into the metaphyseal defect zone.

DISCUSSION OF THE MAIN RESULT OF THE STUDY

The capacity for physiological, reparative regeneration and post-load remodeling is a fundamental characteristic of bone tissue, determining the cycles of replacement and remodeling. These processes include the recruitment and differentiation of populations of osteoblastic and osteoclastic cells which activity is coordinated and regulated by a complex combination of biological, biochemical, and physical factors [16, 17]. Among the most crucial biological components responsible for the reparative activity of bones, various growth factors that manifest as a result of the activation of platelet alpha granules such as PDGF, VEGF, TGF, IGF-I, IGF-II, FGF, TGF- β 1, and others [16], biologically active substrates (endostatsins, angiopoietins, and thrombospondin I) [18], T-lymphocytes, and pro-inflammatory cytokines, particularly interleukin-17F (IL-17F) [19], are traditionally considered. Several studies highlighted the reorganization of complete hormonal regulation of damaged areas of the skeleton, on which the adequacy and nature of the restorative processes generally depend, noting that it is the cascade of endocrine changes that accompanies physiological and reparative regeneration of bone tissue at all its stages [2023]. In some studies, the process of regulation of intercellular behavior and interaction of determined and induced cellular elements with the extracellular matrix and cytoskeleton is considered as the most critical component of osteogenesis, and the integrins that implement it are actively involved in angiogenesis, cell migration, and general regulation of the cell cycle and in the differentiation of osteoblastic and osteoclastic structures [24].

A problem in the course of reparative regeneration in the area of a bone defect is the need for its clear orientation toward organotypic replacement, as in the early stages of replenishment of lost structures, the growth of connective tissue with its subsequent fibrosis stops the process of neo-osteogenesis. In contrast, the connective tissue growth factor, under certain conditions, acts as the most crucial regulator of skeletogenesis, ensuring the physiological course of mesenchymal condensation, chondrogenesis, and osteogenesis [25]. Some experimental studies have shown that the connective tissue growth factor, which is expressed and secreted by osteoblasts during proliferation, regulatory induces osteogenic differentiation in the osteoblasts, and its pathological expression becomes a component of new mechanisms for the development of non-organotypic replacement and secondary osteoporosis [26]. Fibrosis

becomes an unjustified non-specific reaction of the body, physiologically ensuring the isolation of the remaining bone cells from contact with the external environment, but hindering the differentiation and specialization of connective tissue, especially in contact with abiogenic structures (e.g., implants and endoprotheses) [27]. Following this logic, the replacement of the defect with bioimplants has the same risks of uncontrolled growth of undifferentiated connective tissue. This process can be hindered, or more precisely, organotypic replenishment of the defect can be facilitated by staged degradation of the implanted material and by creating a microenvironment that would induce or facilitate the development of further differentiation of growing osteogenic structures. In this regard, relying on the studied mineral composition of bone tissue, many researchers pay attention to the presence and distribution of essential elements in the damage zone. Notably, during bone tissue formation, the concentration of some macro- and microelements increases, in particular calcium, phosphorus, and silicon [12]. It is logical to create such concentrations of these components that would, on the one hand, be able to direct histogenesis in the proper direction and, on the other hand, provide growing tissues with the optimal amount of the required elemental material. Although widely used in modern traumatology and orthopedics, the isolated use of bioimplants consisting of various calcium or silicon compounds has also some drawbacks. It has been established that implants made of calcium phosphates have a serious issue of uncontrolled biodegradation, when slow resorption inhibits the processes of osseointegration, and rapid dissolution can lead to insufficient filling of the bone defect [28]. The use of hydroxyapatite promotes osteogenesis processes; however, this process develops mainly on the bioimplant surface, and undifferentiated connective tissue can form in its center with insufficient degradation [29]. Silicon in bioimplants has a different mechanism of action; gradually releasing, it potentiates osteogenesis by acting primarily on the vascular component of granulation tissue [30]. Because bone tissue, being highly specialized, develops and is restructured under conditions of oxybiotic nutrition, the induction of endothelial cell function through the activation of VEGF and the main fibroblast growth factor provides the necessary biological effect [31, 32]. A high concentration of silicate ions, more than 20 times higher than the initial one, was revealed in the growth zones of young bone, with their maximum amount being in the cytoplasm of osteoblasts, where orthophosphoric acid potentiates their differentiation and increases the concentration of osteogenesis markers, including the procollagen type I carboxy-terminal propeptide [12]. A significant disadvantage of materials made with silicon (bioglass) is that they undergo biodegradation much faster than calcium phosphates, which does not allow them to be used as an osteoconductive framework for relatively slowly growing bone [33].

Some studies have shown that the use of implantable materials based on composites, including calcium phosphate and silicate, in replacing bone tissue defects shows comparatively better results than their separate use [13, 34, 35]. The combined use of these substances can potentiate the strengths of each of the components and relatively neutralize the weaknesses. Accordingly, the study of the features of changes in the amounts of phosphorus, calcium, and silicon in growing bone tissue can provide indirect information on the features of its regeneration and the dependence of the elemental composition on the stage of the process and determine the optimal ratio of the studied components in the implant composition. A highly informative tool for such a study is the combined SEM-EDA method, which allows visualization of the surface morphology of biological object samples, identification of the qualitative and quantitative elemental composition of their surface layer, and collection of data on the integral and local distribution of atoms of chemical elements in the mapping mode [36].

In general clinical practice, the widely used test for monitoring and visualizing bone tissue regenerative processes is routine X-ray examination, owing to its availability, sufficient degree of objectivity, and simplicity. Its significant drawback is the lack of objective criteria that allow identifying, evaluating, and comparing areas of reparative activity. The next generation of X-ray methods, multispiral computed tomography, which enables detecting areas of interest in numerical values, HU, does not have this drawback. The basis for comparing bone tissue density is the scale proposed by Misch and Kircos in 1999. They indicated 150 HU as the lower limit of bone density; however, in some studies, bone tissue was diagnosed at a density >200 HU, that of muscle tissue is 148 HU, and undifferentiated tissue is from 5 to 135 HU [37]. The consensus opinion is that organotypic bone remodeling is detected with an optical density of the tissue under study exceeding 350 HU [38–40], which was adopted as the main criterion in the present study.

The starting point of the study was determining the radiographic density of bone defect structures during their initial filling with phosphate–silicate granules. Since day 7 after defect replacement, the median densities in the experimental groups did not have a significant difference and significantly (more than 2 times) exceeded this indicator in group 1 without defect replacement with implants. It can be recognized that the initial radiographic density of bone defect structures was determined by the density of the implanted material and did not depend on the ratio of phosphates and silicates in its composition. By day 30 after implantation, a decrease in density indices by 3.5% was noted in group 2 and by more than 50% in groups 3 and 4 and a moderate increase in the control group by 75% (up to 189 HU). We believe that such a significant decrease in density indices by this time in the experimental groups was primarily due to the primary fragmentation and degradation of the implanted material and the low area of newly formed bone tissue. According

to previously obtained data, its area ranged from 8.51 [6.25; 9.97] in group 2 to 6.11 [4.75; 8.21] in group 3 and 3.68 [2.87; 4.88] in group 4 [15]. A less significant decrease in density in group 2 was explained by a large amount of new bone.

Additionally, the residual granules of the implanted biocomposites had a direct effect on the radiographic density. Morphometric study showed that all the groups contained fragments of granular material (15–35 μm in size) tightly embedded in the newly formed trabecular structure. However, by day 90, their quantity did not exceed 7.9% of the total defect volume in group 2 and remained at 17.4% and 17.3% in groups 3 and 4, respectively, whereas the area of newly formed bone tissue in group 2 was 23.06 [19.51; 26.01]%, 17.5 [15.4; 20.8]% in group 3, and 7.6 [4.5; 9.3]% in group 4 [15]. Consequently, the area of newly formed tissue had a greater effect on the radiographic density of the regenerated segment than the remaining, partially resorbed, granule fragments.

Comparison of the data obtained with SEM and MSCT with the determination of correlations between them became the main objective of the study.

The study of the elemental composition of bone preparations using the EDA method showed that in group 2, at all follow-up periods, the content of calcium, phosphorus, and silicon was not only the highest, but also had a statistically significant difference with the control and experimental groups, with the amount of calcium and phosphorus increasing only until day 60 and the silicon content decreasing tenfold by day 90. In group 4, the mass fractions of calcium and phosphorus, although increasing until day 90, were the lowest and comparable with the indicators in the control group. Significantly higher level of silicon was determined on day 30 in the control group, but significantly lower level than in other experimental groups was noted. The data of group 3 occupied an intermediate position, but were closest to the indicators of group 4. Thus, the maximum accumulation of calcium in the bone defect zone was revealed in group 2, which was generally proportional to its concentration in the powders.

Based on the data obtained, it can be assumed that the focus on the number of elements in the original material cannot be accepted as an isolated factor determining the resource of ionic action. This study showed a more crucial role of the ratios of calcium phosphates and silicates in the implanted material for the manifestation of their regenerative potential. The best potentiating effect with a mass content of 60% HA and 40% WT in granules, indicating the greatest expression and duration of bone tissue formation, is explained by an earlier and higher degree of material degradation, including with the use of tissue active cellular elements (e.g., giant cells of foreign bodies), with subsequent faster capture and accumulation of them by osteoblastic cells. Notably, when using phosphate–silicate implants with a HA/WT ratio of 40/60 wt.%, the MSCT density of newly formed tissue in the area of the formed defect by day 90 was lower than in group 1, where the metaphyseal defect area remained unfilled.

The results obtained by the SEM-EDA method were compared with those with the objective X-ray presentation. It revealed that the best results of defect replacement were noted in group 2, where bone structures were registered by day 30, which continued organotypic reorganization on days 60 and 90 of the experiment and eventually reached the density of mature spongy bone. In other experimental and control groups, the bone regenerate density indices by day 90 of the study significantly fell behind the results of group 2, with closer values recorded in animals of group 3 and the lowest and comparable ones in groups 1 and 4. The correlation between the radiographic data obtained and the levels of calcium, phosphorus, and silicon showed a high closeness of the relationship between the amount of calcium and bone regenerate density, which is a studied and explainable pattern. The direct correlation between the high silicon content in the early stages of connective tissue specialization and the radiographic bone density revealed in this study confirms the importance of this microelement in regenerative processes, and its decrease can serve as a marker of organotypic restructuring. Conversely, according to the data obtained, the probable optimal ratio of calcium phosphate (hydroxyapatite) and calcium silicate (wollastonite) was approximately 60/40 mass%. The data of the experiment indicate that a further increase in the calcium silicate content leads to a slowdown in organotypic restructuring and in the formation of the bone regenerate. The prospects of the study are identification of the limits of the regenerative potential of implants with a proportional decrease in the amount of silicon in the implanted biomaterials.

The results of this study demonstrate the feasibility of evaluating the features of the course of reparative osteogenesis depending on the ionic environment, as well as the high potential for the use of synthetic bioceramics in general and the possibility of using implants based on phosphate-silicate composites to replace bone defects.

CONCLUSION

The stages of accumulation of calcium, phosphorus, and silicon ions are directly associated with the radiographic indicators of bone regenerate density and change in the processes of regeneration and specialization of the structures of the damaged area.

Quantitative indicators of calcium and phosphorus content in the bone regenerate increase mainly in days 30–60, and silicon indicators reach their maximum values by day 30 of the experiment and then slowly decrease. This indicates

that this microelement is crucial in the starting regenerative processes, and its decrease can serve as a marker of organotypic restructuring.

Synthetic granules containing calcium phosphate (hydroxyapatite) and calcium silicate (wollastonite) in a ratio of 60/40 mass% showed the greatest potential for regenerative action in the early stages (30 days) and throughout the experimental study.

ADDITIONAL INFO

Author contribution. All authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication). The greatest contribution is distributed as follows: A.A. Rozhdestvenskiy — conducting an experimental study, data collection, literature review, data analysis, statistical processing, writing a text; G.G. Dzuba — literature review, analysis of the results obtained, writing the text, editing the article; D.A. Polonyankin — literature review, analysis of the results obtained, writing the text, editing the article

Funding source. The study was carried out as part of the fulfillment of the state task of the Ministry of Health of the Russian Federation № 056-00048-22-00 dated January 10, 2022.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: А.А. Рождественский — проведение экспериментального исследования, сбор данных, обзор литературы, анализ данных, статистическая обработка, написание текста; Г.Г. Дзюба — обзор литературы, проведение экспериментального исследования, написание текста, редактирование статьи; Д.А. Полонянкин — сбор данных, редактирование статьи.

Источник финансирования. Исследование осуществлено в рамках выполнения государственного задания Минздрава России № 056-00048-22-00 от 10 января 2022 г.

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

REFERENCES

1. Shteinle AV. Posttraumatic regeneration of bone tissue (part 1). *Siberian Medical Journal*. 2009;4(1):101–108. EDN: KZFTDH
2. Borzunov DY. Non-free bone grafting according to G.A. Ilizarov in the problem of rehabilitation of patients with long bones defects and pseudoarthroses. *Genij Ortopedii*. 2011;(2):21–26. EDN: OGCTHL
3. Bokov AE, Mlyavikh SG, Shirokova NY, et al. Current Trends in the Development of Materials for Bone Grafting and Spinal Fusion

- (Review). *Modern Technologies in Medicine*. 2018;10(4):203–219. doi: 10.17691/stm2018.10.4.24
4. Putliayev VI. Modern bioceramic materials. *Sorov education journal*. 2004;8(1):44–50.
 5. Zhou P, Xia D, Ni Z, et al. Calcium silicate bioactive ceramics induce osteogenesis through oncostatin M. *Bioact Mater*. 2020;6(3):810–822. doi: 10.1016/j.bioactmat.2020.09.018
 6. Persikov AV, Brodsky B. Unstable molecules form stable tissues. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2002;99(3):1101–1103. doi: 10.1073/pnas.042707899
 7. Gromova OA, Troshin Iyu, Limanova OA. Calcium and its synergists in supporting the structure of connective and bone tissue. *Attending doctor*. 2014;5(5):69. EDN: SCPKLN
 8. Mu Y, Du Z, Xiao L, et al. The Localized Ionic Microenvironment in Bone Modelling/Remodelling: A Potential Guide for the Design of Biomaterials for Bone Tissue Engineering. *J Funct Biomater*. 2023;14(2):56. doi: 10.3390/jfb14020056
 9. Gharbi A, Oudadesse H, El Feki H, et al. High Boron Content Enhances Bioactive Glass Biodegradation. *J Funct Biomater*. 2023;14(7):364. doi: 10.3390/jfb14070364
 10. Jugdaohsingh R. Silicon and bone health. *J Nutr Health Aging*. 2007;11(2):99–110.
 11. Zhou B, Jiang X, Zhou X, et al. GelMA-based bioactive hydrogel scaffolds with multiple bone defect repair functions: therapeutic strategies and recent advances. *Biomater Res*. 2023;27(1):86. doi: 10.1186/s40824-023-00422-6
 12. Skripnikova IA, Guriev AV. Micronutrients in the prevention of osteoporosis: focus on silicon. *Osteoporosis and osteopathy*. 2014;17(2):36–40. doi: 10.14341/osteo2014236-40
 13. Ros-Tárraga P, Mazon P, Revilla-Nuin B, et al. High temperature $\text{CaSiO}_3\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ceramic promotes osteogenic differentiation in adult human mesenchymal stem cells. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*. 2020;110(7):110355. doi: 10.1016/j.msec.2019.110355
 14. Misch CE, Kircos LT. Diagnostic imaging and techniques. In: Misch C.E., editor. *Contemporary Implant Dentistry*. 2nd ed. Mosby; St. Louis; 1999. P. 73–87.
 15. Rozhdestvenskiy AA, Dzuba GG, Erofeev SA, et al. Reparative regeneration when replacing a bone defect with a synthetic granular implant based on various combinations of calcium phosphate and silicate. *Polytrauma*. 2023;4(4):63–71. EDN: BVAOQD
 16. Kupka JR, Sagheb K, Al-Nawas B, Schiegnitz E. The Sympathetic Nervous System in Dental Implantology. *J Clin Med*. 2023;12(8):2907. doi: 10.3390/jcm12082907
 17. Takayama T, Imamura K, Yamano S. Growth Factor Delivery Using a Collagen Membrane for Bone Tissue Regeneration. *Biomolecules*. 2023;13(5):809. doi: 10.3390/biom13050809
 18. Koritkin AA, Zukin AA, Zakharova DV, Novikova YaS. The use of platelet-rich plasma in replacing the focus of avascular necrosis of the femoral head with allografts. *Traumatology and orthopedics of Russia*. 2018;24(1):115–122. doi: 10.21823/2311-2905-2018-24-1-115-122
 19. Blazgenko AN, Rodin IA, Ponkina O, et al. Influence of A-PRP-therapy on reparative regeneration of bone tissue in fresh limb fractures. *Innovative medicine of Kuban*. 2019;3(15):32–38. doi: 10.35401/2500-0268-2019-15-3-32-38
 20. Wang Y, Kim J, Chan A, Whyne C, Nam D. A two-phase regulation of bone regeneration: IL-17F mediates osteoblastogenesis via C/EBP- β in vitro. *Bone*. 2018;116:47–57. doi: 10.1016/j.bone.2018.07.007
 21. Monageng E, Offor U, Takalani NB, Mohlala K, Opuwari CS. A Review on the Impact of Oxidative Stress and Medicinal Plants on Leydig Cells. *Antioxidants (Basel)*. 2023;12(8):1559. doi: 10.3390/antiox12081559
 22. Dedov II, Melnichenko GA. *Endocrinology*. Moscow: GEOTAR-Media; 2019. 1112 p.
 23. Gao M, Du Z, Dong Q, Su S, Tian L. DAP1 regulates osteoblast autophagy via the ATG16L1-LC3 axis in Graves' disease-induced osteoporosis. *J Orthop Surg Res*. 2023;18(1):711. doi: 10.1186/s13018-023-04171-z
 24. Miromanov AM, Gusev KA. Hormonal regulation of osteogenesis: a review of the literature. *Traumatology and orthopedics of Russia*. 2021;27(4):120–130. doi: 10.21823/2311-2905-1609
 25. Aguilar A, Gifre L, Ureña-Torres P, et al. Pathophysiology of bone disease in chronic kidney disease: from basics to renal osteodystrophy and osteoporosis. *Front Physiol*. 2023;14:1177829. doi: 10.3389/fphys.2023.1177829
 26. Hwang J, Lee SY, Jo CH. Degenerative tendon matrix induces tenogenic differentiation of mesenchymal stem cells. *J Exp Orthop*. 2023;10(1):15. doi: 10.1186/s40634-023-00581-4
 27. Xu B, Wang X, Wu C, et al. Flavonoid compound icariin enhances BMP-2 induced differentiation and signalling by targeting to connective tissue growth factor (CTGF) in SAMP6 osteoblasts. *PLoS One*. 2018;13(7):e0200367. doi: 10.1371/journal.pone.0200367
 28. Shkurupy VA, Kim V, Kovner AV, Cherdanceva LA. Connective tissue and the problems of its pathological conditions. *Bulletin of Siberian Medicine*. 2017;16:75–85. doi: 10.20538/1682-0363-2017-4-75-85
 29. Mofakhami S, Salahinejad E. Biphasic calcium phosphate microspheres in biomedical applications. *J Control Release*. 2021;338:527–536. doi: 10.1016/j.jconrel.2021.09.004
 30. Kamitakahara M, Tatsukawa E, Shibata Y, et al. Effect of silicate incorporation on in vivo responses of α -tricalcium phosphate ceramics. *J Mater Sci Mater Med*. 2016;27(5):97. doi: 10.1007/s10856-016-5706-5
 31. Dashnyam K, Buitrago JO, Bold T, et al. Angiogenesis-promoted bone repair with silicate-shelled hydrogel fiber scaffolds. *Biomater Sci*. 2019;7(12):5221–5231. doi: 10.1039/c9bm01103j
 32. Edranov SS, Matveeva NY, Kalinichenko SG. Osteogenic and Regenerative Potential of Free Gingival Graft. *Bull Exp Biol Med*. 2021;171:404–401. doi: 10.1007/s10517-021-05237-w
 33. Zhang J, Liu Y, Chen Y, et al. Adipose-Derived Stem Cells: Current Applications and Future Directions in the Regeneration of Multiple Tissues. *Stem Cells Int*. 2020;2020:8810813. doi: 10.1155/2020/8810813
 34. Karadjian M, Essers C, Tsitlakidis S, et al. Biological Properties of Calcium Phosphate Bioactive Glass Composite Bone Substitutes: Current Experimental Evidence. *Int J Mol Sci*. 2019;20(2):305. doi: 10.3390/ijms20020305
 35. Keshavarz M, Alizadeh P, Kadumudi FB, et al. Multi-leveled Nanosilicate Implants Can Facilitate Near-Perfect Bone Healing. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2023;15(17):21476–21495. doi: 10.1021/acsami.3c01717
 36. Polonyankin DA, Blesman AI, Postikov DV, Teployhov AA. *Theoretical foundations of scanning electron microscopy and energy dispersive analysis of nanomaterials: tutorial*. Omsk: OmGTU; 2019. 116 p.
 37. Chuiko AN, Kopitov AA. Computed tomography and basic mechanical characteristics of bone tissues. *Medical visualization*. 2012;1(1):102–107. EDN: OYWKSL

38. Misch CE. Density of bone: Effect on treatment planning, surgical approach, and healing. In: *Contemporary Implant Dentistry*. St. Louis, MI, USA; 1993. P. 469–485.
39. Yablokov AE. Evaluation of the optical density of bone tissue in dental implantation. *Russian Dentistry*. 2019;12(3):8–13. doi: 10.17116/rossstomat2019120318

40. Baek YW, Lim YJ, Kim B. Comparison of Implant Surgery Methods of Cortical Tapping and Cortical Widening in Bone of Various Density: A Three-Dimensional Finite Element Study. *Materials (Basel)*. 2023;16(8):3261. doi: 10.3390/ma16083261

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штейнле А.В. Посттравматическая регенерация костной ткани (часть 1) // Сибирский медицинский журнал. 2009. Т. 4, № 1. С. 101–108. EDN: KZFTDH
2. Борзунов Д.Ю. Несвободная костная пластика по Г.А. Илизарову в проблеме реабилитации больных с дефектами и ложными суставами длинных костей // Гений ортопедии. 2011. № 2. С. 21–26. EDN: OGCTHL
3. Bokov A.E., Mlyavikh S.G., Shirokova N.Y., Davydenko D.V., Orlinskaya N.Y. Current Trends in the Development of Materials for Bone Grafting and Spinal Fusion (Review) // *Modern Technologies in Medicine*. 2018. Vol. 10, № 4. P. 203–219. doi: 10.17691/stm2018.10.4.24
4. Пуляев В.И. Современные биокерамические материалы // Современный образовательный журнал. 2004. Т. 8, № 1. С. 44–50.
5. Zhou P., Xia D., Ni Z., et al. Calcium silicate bioactive ceramics induce osteogenesis through oncostatin M // *Bioact Mater*. 2020. Vol. 6, № 3. P. 810–822. doi: 10.1016/j.bioactmat.2020.09.018
6. Persikov A.V., Brodsky B. Unstable molecules form stable tissues // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2002. Vol. 99, № 3. P. 1101–1103. doi: 10.1073/pnas.042707899
7. Громова О.А., Торшин И.Ю., Лиманова О.А. Кальций и его синергисты в поддержке структуры соединительной и костной ткани // *Лечащий врач*. 2014. № 5. С. 69. EDN: SCPKLN
8. Mu Y., Du Z., Xiao L., et al. The Localized Ionic Microenvironment in Bone Modelling/Remodelling: A Potential Guide for the Design of Biomaterials for Bone Tissue Engineering // *J Funct Biomater*. 2023. Vol. 14, № 2. P. 56. doi: 10.3390/jfb14020056
9. Gharbi A., Oudadesse H., El Feki H., et al. High Boron Content Enhances Bioactive Glass Biodegradation // *J Funct Biomater*. 2023. Vol. 14, № 7. P. 364. doi: 10.3390/jfb14070364
10. Jugdaohsingh R. Silicon and bone health // *J Nutr Health Aging*. 2007. Vol. 11, № 2. P. 99–110.
11. Zhou B., Jiang X., Zhou X., et al. GelMA-based bioactive hydrogel scaffolds with multiple bone defect repair functions: therapeutic strategies and recent advances // *Biomater Res*. 2023. Vol. 27, № 1. P. 86. doi: 10.1186/s40824-023-00422-6
12. Скрипникова И.А., Гурьев А.В. Микроэлементы в профилактике остеопороза: фокус на кремний // *Остеопороз и остеопатии*. 2014. Т. 17, № 2. С. 36–40. doi: 10.14341/osteo2014236-40
13. Ros-Tárraga P., Mazón P., Revilla-Nuin B., et al. High temperature $\text{CaSiO}_3\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ceramic promotes osteogenic differentiation in adult human mesenchymal stem cells // *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*. 2020. Vol. 107. P. 110355. doi: 10.1016/j.msec.2019.110355
14. Misch C.E., Kircos L.T. Diagnostic imaging and techniques. *Contemporary Implant Dentistry*. 2nd ed. Mosby; St. Louis, 1999. P. 73–87.
15. Рождественский А.А., Дзюба Г.Г., Ерофеев С.А., и др. Репаративная регенерация при замещении костного дефекта синтетическим гранулированным имплантатом на основе различных комбинаций фосфата и силиката кальция // *Политравма*. 2023. № 4. С. 63–71. EDN: BVAQQD
16. Kupka J.R., Sagheb K., Al-Nawas B., Schiegnitz E. The Sympathetic Nervous System in Dental Implantology // *J Clin Med*. 2023. Vol. 12, № 8. P. 2907. doi: 10.3390/jcm12082907
17. Takayama T., Imamura K., Yamano S. Growth Factor Delivery Using a Collagen Membrane for Bone Tissue Regeneration // *Biomolecules*. 2023. Vol. 13, № 5. P. 809. doi: 10.3390/biom13050809
18. Корыткин А.А., Зыкин А.А., Захарова Д.В., Новикова Я.С. Применение обогащённой тромбоцитами плазмы при замещении очага аваскулярного некроза головки бедренной кости аллотрансплантатами // *Травматология и ортопедия России*. 2018. Т. 24, № 1. С. 115–122. doi: 10.21823/2311-2905-2018-24-1-115-122
19. Блаженко А.Н., Родин И.А., Понкина О.Н., и др. Влияние А-PRP-терапии на репаративную регенерацию костной ткани при свежих переломах костей конечностей // *Инновационная медицина Кубани*. 2019. Т. 3, № 15. С. 32–38. doi: 10.35401/2500-0268-2019-15-3-32-38
20. Wang Y., Kim J., Chan A., Whyne C., Nam D. A two-phase regulation of bone regeneration: IL-17F mediates osteoblastogenesis via C/EBP- β in vitro // *Bone*. 2018. Vol. 116. P. 47–57. doi: 10.1016/j.bone.2018.07.007
21. Monageng E., Offor U., Takalani N.B., Mohlala K., Opuwari C.S. A Review on the Impact of Oxidative Stress and Medicinal Plants on Leydig Cells // *Antioxidants (Basel)*. 2023. Vol. 12, № 8. P. 1559. doi: 10.3390/antiox12081559
22. Дедов И.И., Мельниченко Г.А. Эндокринология. Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2019. 1112 с.
23. Gao M., Du Z., Dong Q., Su S., Tian L. DAP1 regulates osteoblast autophagy via the ATG16L1-LC3 axis in Graves' disease-induced osteoporosis // *J Orthop Surg Res*. 2023. Vol. 18, № 1. P. 711. doi: 10.1186/s13018-023-04171-z
24. Мироманов А.М., Гусев К.А. Гормональная регуляция остеогенеза: обзор литературы // *Травматология и ортопедия России*. 2021. Т. 27, № 4. С. 120–130. doi: 10.21823/2311-2905-1609
25. Aguilar A., Gifre L., Ureña-Torres P., et al. Pathophysiology of bone disease in chronic kidney disease: from basics to renal osteodystrophy and osteoporosis // *Front Physiol*. 2023. Vol. 14. P. 1177829. doi: 10.3389/fphys.2023.1177829
26. Hwang J., Lee S.Y., Jo C.H. Degenerative tendon matrix induces tenogenic differentiation of mesenchymal stem cells // *J Exp Orthop*. 2023. Vol. 10, № 1. P. 15. doi: 10.1186/s40634-023-00581-4
27. Xu B., Wang X., Wu C., et al. Compound icariin enhances BMP-2 induced differentiation and signalling by targeting to connective tissue growth factor (CTGF) in SAMP6 osteoblasts // *PloS One*. 2018. Vol. 13, № 7. P. e0200367. doi: 10.1371/journal.pone.0200367
28. Shkurupy V.A., Kim L.B., Kovner A., Cherdanceva L.A. Connective tissue and the problems of its pathological

conditions // *Bulletin of Siberian Medicine*. 2017. Vol. 16. P. 75–85. doi: 10.20538/1682-0363-2017-4-75-85

29. Mofakhami S., Salahinejad E. Biphasic calcium phosphate microspheres in biomedical applications // *J Control Release*. 2021. Vol. 338. P. 527–536. doi: 10.1016/j.jconrel.2021.09.004

30. Kamitakahara M., Tatsukawa E., Shibata Y., et al. Effect of silicate incorporation on in vivo responses of α -tricalcium phosphate ceramics // *J Mater Sci Mater Med*. 2016. Vol. 27, № 5. P. 97. doi: 10.1007/s10856-016-5706-5

31. Dashnyam K., Buitrago J.O., Bold T., et al. Angiogenesis-promoted bone repair with silicate-shelled hydrogel fiber scaffolds // *Biomater Sci*. 2019. Vol. 7, № 12. P. 5221–5231. doi: 10.1039/c9bm01103j

32. Edranov S.S., Matveeva N.Y., Kalinichenko S.G. Osteogenic and Regenerative Potential of Free Gingival Graft // *Bull Exp Biol Med*. 2021. Vol. 171. P. 404–401. doi: 10.1007/s10517-021-05237-w

33. Zhang J., Liu Y., Chen Y., et al. Adipose-Derived Stem Cells: Current Applications and Future Directions in the Regeneration of Multiple Tissues // *Stem Cells Int*. 2020. Vol. 2020. P. 8810813. doi: 10.1155/2020/8810813

34. Karadjian M., Essers C., Tsiatlakidis S., et al. Biological Properties of Calcium Phosphate Bioactive Glass Composite Bone Substitutes:

Current Experimental Evidence // *Int J Mol Sci*. 2019. Vol. 20, № 2. P. 305. doi: 10.3390/ijms20020305

35. Keshavarz M., Alizadeh P., Kadumudi F.B., et al. Multi-leveled Nanosilicate Implants Can Facilitate Near-Perfect Bone Healing // *ACS Appl Mater Interfaces*. 2023. Vol. 15, № 17. P. 21476–21495. doi: 10.1021/acsami.3c01717

36. Полонянкин Д.А., Блесман А.И., Постников Д.В., Теплоухов А.А. Теоретические основы растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа наноматериалов: учеб. пособие. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. С. 5–10.

37. Чуйко А.Н., Копытов А.А. Компьютерная томография и основные механические характеристики костных тканей // *Медицинская визуализация*. 2012. № 1. С. 102–107. EDN: OYWKSL

38. Misch C.E. Density of bone: Effect on treatment planning, surgical approach, and healing. In: *Contemporary Implant Dentistry*. St. Louis, MI, USA, 1993. P. 469–485.

39. Яблоков А.Е. Оценка оптической плотности костной ткани при дентальной имплантации // *Российская стоматология*. 2019. Т. 12, № 3. С. 8–13. doi: 10.17116/rosstomat2019120318

40. Baek Y.W., Lim Y.J., Kim B. Comparison of Implant Surgery Methods of Cortical Tapping and Cortical Widening in Bone of Various Density: A Three-Dimensional Finite Element Study // *Materials (Basel)*. 2023. Vol. 16, № 8. P. 3261. doi: 10.3390/ma16083261

AUTHORS' INFO

* **Andrey A. Rozhdestvenskiy**, MD;

address: 56 Serova str., 644020 Omsk, Russia;

ORCID: 0000-0002-9566-6926;

eLibrary SPIN: 3348-5229;

e-mail: Rozhdestvensky@bk.ru

German G. Dzuba, MD, Dr. Sci. (Medicine), associate professor;

ORCID: 0000-0002-4292-213X;

eLibrary SPIN: 3290-2830;

e-mail: germanort@mail.ru

Denis A. Polonyankin, Cand. Sci. (Pedagogy);

ORCID: 0000-0001-6799-3105;

eLibrary SPIN: 8251-9838;

e-mail: dapolonyankin@omgtu.ru

ОБ АВТОРАХ

* **Рождественский Андрей Александрович**;

адрес: Россия, 644020, Омск, ул. Серова, 56;

ORCID: 0000-0002-9566-6926;

eLibrary SPIN: 3348-5229;

e-mail: Rozhdestvensky@bk.ru

Дзюба Герман Григорьевич, д-р мед. наук, доцент;

ORCID: 0000-0002-4292-213X;

eLibrary SPIN: 3290-2830;

e-mail: germanort@mail.ru

Полонянкин Денис Андреевич, канд. пед. наук,

ORCID: 0000-0001-6799-3105;

eLibrary SPIN: 8251-9838;

e-mail: dapolonyankin@omgtu.ru

* Corresponding author / Автор, ответственный за переписку

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto634164>

Сравнительный анализ эффективности протоколов очистки костного матрикса

Д.В. Смоленцев¹, Ю.С. Лукина^{1,2}, Л.Л. Бионышев-Абрамов¹, Н.Б. Сережникова^{1,3},
М.Г. Васильев¹

¹ Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова, Москва, Россия;

² Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия;

³ Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова (Сеченовский университет), Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Данная статья описывает протокол очистки ксеногенного костного матрикса, испытанный коллективом авторов в статье «Определение эффективности протокола децеллюляризации ксеногенного костного матрикса в исследованиях *in vitro* и *in vivo*» (результаты испытаний были описаны в журнале «Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова», 2023, том 30, № 4, с. 435–447, doi: <https://doi.org/10.17816/vto622849>).

Цель. Провести сравнительный анализ методов физической и химической очистки ксеногенной спонгиозной костной ткани посредством томографического, морфологического исследований.

Материалы и методы. Ксеногенную спонгиозную ткань бедренных костей крупного рогатого скота фрагментировали до размеров 10×10×10 мм и обрабатывали водой, гипертоническим, гипотоническим растворами и 3% или 6% раствором перекиси водорода в различных сочетаниях. Затем применяли глубокую вторичную очистку органическими растворителями или методом сверхкритической флюидной экстракции, после чего проводили ЯМР ¹H с целью определения следов реагентов. Эффективность оптимального протокола определяли с помощью гистологического и томографического исследований с расчётом коэффициента очистки по денситометрическим показателям.

Результаты. В соответствии с расчётным по денситометрическим показателям коэффициентом очистки, межтрабекулярное пространство костной ткани после воздействия проточной водой и гипо- и гипертоническими растворами с последующей очисткой 3% раствором H₂O₂ недостаточно очищено, гистологический анализ показал наличие от 0 до 60% остеоцитов для разных протоколов очистки. При замене на 6% раствор H₂O₂ коэффициент очистки выше, однако наблюдается деструкция костной ткани. Дополнительная глубокая очистка позволяет добиться высокой степени очистки при сохранности структуры, но при применении органических растворителей их следы обнаруживаются в матриксе, в связи с чем более эффективным является использование сверхкритической флюидной экстракции.

Заключение. Последовательное использование проточной воды, 0,5% раствора NaCl, 3% раствора H₂O₂ с последующей обработкой в ск-СО₂ является эффективным протоколом очистки ксеногенной спонгиозной костной ткани.

Ключевые слова: костная ткань; децеллюляризация; флюидная экстракция; микро-КТ; ксеногенная.

Как цитировать:

Смоленцев Д.В., Лукина Ю.С., Бионышев-Абрамов Л.Л., Сережникова Н.Б., Васильев М.Г. Сравнительный анализ эффективности протоколов очистки костного матрикса // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2024. Т. 31, № 3. С. 367–380. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto634164>

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto634164>

Comparative analysis of the effectiveness of bone matrix purification protocols

Dmitriy V. Smolentsev¹, Yulia S. Lukina^{1,2}, Leonid L. Bionyshev-Abramov¹,
Natalya B. Serezhnikova^{1,3}, Maksim G. Vasiliev¹

¹ N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russia;

² Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia;

³ Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: This article describes the protocol for the purification of xenogenic bone matrix tested by a team of authors in the article «Determining the effectiveness of a xenogeneic bone matrix decellularization protocol in in vitro and in vivo studies» (the test results were described in the journal N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics. 2023;30(4):431–443, doi: <https://doi.org/10.17816/vto622849>).

AIM: To conduct a comparative analysis of methods of physical and chemical purification of xenogeneic spongy bone tissue by tomographic and morphological studies.

MATERIALS AND METHODS: Xenogenic bovine femoral spongiosa tissue was fragmented to the size of 10×10×10 mm and treated with water, hypertonic, hypotonic, hypotonic solutions, and 3% or 6% hydrogen peroxide solution in various combinations. Deep secondary purification with organic solvents or supercritical fluid extraction was then applied, followed by ¹H NMR to determine traces of reagents. The efficiency of the optimal protocol was determined by histologic and tomographic studies with calculation of the purification factor by densitometric indices.

RESULTS: In accordance with the purification coefficient calculated by densitometric indicators, the intertrabecular space of bone tissue after exposure to flowing water and hypo- and hypertonic solutions followed by cleaning with a 3% H₂O₂ solution is not sufficiently purified; histological analysis showed the presence of 0 to 60% osteocytes for different cleaning protocols. When replaced with a 6% H₂O₂ solution, the purification coefficient was higher, but bone destruction was observed. Additional deep purification allows a high purification rate while preserving the structure, but when organic solvents are used, their traces are detected in the matrix; therefore, the use of supercritical fluid extraction is more effective.

CONCLUSION: The sequential use of flowing water, 0.5% NaCl solution, 3% H₂O₂ solution followed by sc-CO₂ treatment is an effective protocol for the purification of xenogeneic spongy bone tissue.

Keywords: bone tissue; decellularization; fluid extraction; micro-CT; xenogenic.

To cite this article:

Smolentsev DV, Lukina YS, Bionyshev-Abramov LL, Serezhnikova NB, Vasiliev MG. Comparative analysis of the effectiveness of bone matrix purification protocols. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2024;31(3):367–380. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto634164>

ОБОСНОВАНИЕ

Применение остеопластических материалов, направленных на увеличение объёма собственной кости и на закрытие костных дефектов, уже давно вошло в ежедневную практику ортопедов, нейрохирургов, челюстно-лицевых хирургов и стоматологов. До 5% переломов, 20% высокоэнергетических травм и зачастую плановые ортопедические процедуры, например, спондилодез, приводят к несращениям [1, 2]. Текущий золотой стандарт лечения костных дефектов — аутогенная кость, полученная прежде всего из подвздошного гребня пациента или иных локализаций, таких как вертельная зона бедра, бугристость большеберцовой кости [3–5]. Несмотря на свою иммуносовместимость, костный аутотрансплантат может быть взят в ограниченном количестве и вызывать сопутствующую заболеваемость (болезненность) донорского участка [6–8]. Аллогенная и ксеногенная костная ткань — альтернативные биологические материалы для лечения костной ткани [3, 8, 9].

Для достижения биосовместимости материала, отсутствия отторжений при получении костного матрикса необходимо решить проблему полного удаления антигенов из исходного материала. Однако грубая обработка снижает и потенциальные положительные свойства имплантатов. Для сохранения одного из важнейших свойств костных имплантатов, остеоиндукции, необходимо сохранение микроархитектоники кости, заряда её поверхности, шероховатости и полного удаления клеток костного мозга и жира (чужеродных клеток, включая клетки красного и жёлтого костного мозга животных). Нативная структура создаёт подходящую среду для клеточного функционирования и дифференцировки [10]. Децеллюляризация — это техника удаления клеток и иммуногенных веществ из тканей, сохраняя при этом естественный внеклеточный матрикс [11, 12], в процессе которой используется химическое, ферментативное или механическое разрушение. Протоколы децеллюляризации разрабатываются с учётом таких факторов, как плотность ткани, клеточность и наличие липидов, что особенно важно для костной ткани, содержащей жиры, для которой децеллюляризация сочетается со стадией делипидизации [13, 14]. Децеллюляризованный костный матрикс содержит факторы роста, фибронектин, гепаринсульфат, хондроитинсульфат и гиалуроновую кислоту, которые индуцируют дифференцировку мезенхимальных стволовых клеток в остеобласты [15].

В процессе децеллюляризации происходит некоторое нарушение структуры костного матрикса. Для создания идеальных материалов необходимо стабильное состояние между поддержанием структуры матрикса и удалением клеточного компонента [16], что является основной проблемой.

Точная и полная децеллюляризация невозможна, поэтому эффективная децеллюляризация должна максимизировать изъятие клеточных компонентов

и генетического материала, сводя к минимуму разрушение структуры матрикса, что позволит сохранить биологическую активность и специфические биомеханические характеристики [17].

Конкретные процедуры децеллюляризации варьируют и могут включать комбинацию физических, ферментативных и химических процессов. Физическая децеллюляризация является наименее разрушительным её методом, при этом большинство компонентов и структуры внеклеточного матрикса остаются нетронутыми после воздействий [18]. В качестве физических методов воздействия применяются УЗ-воздействие (патент РФ № 2166252), воздействия центробежной силы (патент РФ № 2172104), воздействия магнитного поля (патент РФ № 2223104). Однако сама по себе физическая децеллюляризация не может полностью удалить клеточный детрит (фрагменты клеток) из ткани. Часто её используют в сочетании с дополнительными химическими или ферментативными методами [19]. Так, применение ферментных препаратов наряду с другими предлагается для депротенизации путём ферментации в 2–5% растворе трипсина (патент РФ № 2301633) или в 0,01% растворе хемотрипсина (патент РФ № 2223104). Среди химических растворителей наибольшей популярностью обладают 6–10% растворы перекиси водорода, спиртоэфирные растворы (патенты РФ № 2166252, № 2172104, № 2223104, № 2377959).

Для подтверждения эффективной децеллюляризации необходимо учитывать как минимум три характеристики в соответствии с Р.М. Старо и соавт. [20]:

- один миллиграмм обезвоженных децеллюляризованных тканей должен содержать менее 50 наногرامмов двухцепочечной ДНК;
- длину всех оставшихся фракций ДНК должны составлять менее 200 пар оснований;
- децеллюляризованные образцы не должны иметь ясного ядра при окрашивании гематоксилином и эозином, а также при окрашивании DAPI.

Помимо количественного определения оставшегося клеточного материала важна оценка макроскопических и микроскопических изменений в структуре, для чего могут быть использованы методы микроскопии [21], микрокомпьютерной томографии [22, 23].

В настоящее время в тканевых банках используют сочетание физических, химических и биологических методов для достижения наилучшего клеточного эффекта. В рамках нашей научной работы ставилась задача разработать эффективный протокол очистки ксеногенной костной ткани, используя сравнительный метод анализа по результатам комплексного исследования костного материала, включая гистологическую и микротомографическую (микро-КТ) оценки. Микротомографическое исследование является стандартным инструментом для визуализации структуры костной ткани. Однако микро-КТ может служить скрининговым инструментом оценки очистки костной ткани посредством расчёта денситометрических

показателей межтрабекулярного пространства. В работе предложен метод оценки чистоты межтрабекулярного пространства, что ранее не применялось другими исследователями, по крайней мере в известных нам литературных источниках.

Цель исследования — провести сравнительный анализ методов физической и химической очистки ксеногенной спонгиозной костной ткани посредством томографического, морфологического исследований.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

Объектом исследования являлась ксеногенная ткань бедренных костей крупного рогатого скота в возрасте 24 месяцев, приобретённая на мясокомбинате «Останкино» (Москва, Россия). После транспортировки в охлаждённом виде кости хранили при температуре -20 °C в морозильной камере MDF-794 (Sanyo, Япония) для поддержания остеоиндуктивного потенциала. Перед очисткой кости были разморожены, спонгиозная кость отобрана и фрагментирована до размеров 10×10×10 мм с использованием ленточной пилы КТ-210 («КТ Сервис», Россия).

Дизайн исследования

Исследование включало два этапа:

- сравнение методик первичной очистки (гипертонический, гипотонический растворы и растворы перекиси водорода разной концентрации в различных сочетаниях);
- сравнение методик глубокой (вторичной) очистки смесью органических растворителей (этанол-хлороформ, гексан-пропанол) с последующим удалением их вакуумированием в течение 5 часов и очистки с помощью технологии сверхкритической флюидной экстракции.

Режимы первичной очистки

Первичная очистка включала две стадии:

- воздействие гипертоническим (7% раствор хлорида натрия) («ЛенРеактив», хч, Россия), или гипотоническим раствором (0,5% раствор хлорида натрия), или проточной водой в течение 4 часов при комнатной температуре на орбитальном шейкере PSU-20i (BioSan, Латвия) при 120 оборотах в минуту в вакууме с использованием эксикатора и вакуумного насоса. Соотношение объёма жидкости к объёму материала (V жидкости/V материала)=10:1;
- воздействие низкоконцентрированным (3%) или высококонцентрированным (6%) раствором перекиси водорода медицинской (ОАО «Самарамедпром», Россия) в ультразвуковой ванне ПСБ-12035-05 («ПСБ-Галс», Россия) при температуре 40 °C в течение 8 часов.

Обозначение методики очистки с указанием воздействия приведено в табл. 1.

Режимы глубокой очистки

Глубокая очистка применялась к материалу, очищенному согласно протоколу, разработанному по результатам первого этапа исследования. Первичная очистка состояла из последовательного воздействия проточной водой (V воды/V материала=10:1) в течение 4 часов и гипотонического раствора в течение 2 часов на встряхивающем столе при 120 оборотах в минуту в вакууме при комнатной температуре с последующей обработкой в 3% растворе перекиси водорода в ультразвуке при температуре 40 °C в течение 8 часов. Для глубокой очистки использовались смеси органических растворителей (этанол-хлороформ, гексан-пропанол) с соотношением 50:50 по объёму при комнатной температуре в течение 24 часов с последующим удалением их вакуумированием в течение 5 часов или технология сверхкритической флюидной экстракции, проводимая на установке Waters-5000 (Waters, США)

Таблица 1. Методики очистки ксеногенного костного матрикса

Table 1. Methods of purification of xenogenic bone matrix

Номер методики \ Реагенты	7% раствор NaCl	0,5% раствор NaCl	H ₂ O прот.	3% раствор H ₂ O ₂ +УЗ	6% раствор H ₂ O ₂ +УЗ
1-1	+			+	
1-2	+				+
2-1		+		+	
2-2		+			+
3-1			+	+	
3-2			+		+

Примечание. H₂O прот. — проточная вода, H₂O₂ — перекись водорода медицинская, УЗ — ультразвуковая ванна.

Note. H₂O прот. — running water, H₂O₂ — hydrogen peroxide medical, УЗ — ultrasonic bath.

Таблица 2. Методики глубокой очистки ксеногенного костного матрикса

Table 2. Methods of deep purification of xenogenic bone matrix		
Номер методики \ Реагенты	ск-СО ₂	Органические растворители
4-1	–	Этанол, хлороформ
4-2	–	Гексан, пропанол
4-3	+	–

при давлении 450 Бар, температуре +35 °С, скорости потока ск-СО₂ 2±0,5 мл/мин в течение 8 часов.
Обозначение методики очистки с реагентами воздействия указано в табл. 2.

Микротомографическое исследование

Сканирование образцов выполнено на рентгеновском микротомографе Bruker SkyScan 1172 (Bruker Belgium, Бельгия) в режиме, указанном с помощью программного обеспечения SkyScan. На основе полученных теневых проекций произведена реконструкция в программе NRecon по алгоритму Фельдкамп. При предварительном просмотре сечений были выбраны параметры реконструкции и динамический диапазон для достижения оптимальной контрастности изображения.
Изображения объёмных моделей образцов получены с помощью программы CTvox, входящей в пакет программного обеспечения для томографа. Для построения объёмных моделей использовался алгоритм MarchingCube, который является алгоритмом построения поверхности на основе модели явного задания шестигранных вокселей, разработанной Лоренсеном и Клайном (1987).

Денситометрическое исследование

Денситометрическое исследование проведено на тех же образцах при выборе зоны интереса 5×5×5 мм, расположенной в центральной части образца, с помощью программы СТАп 1.20.3.0 (рис. 1).
Плотность по шкале Хаунсфилда (НУ) была определена для объёма куба. Количество измерений на каждый метод очистки равно десяти. Результаты денситометрии оценивались в соответствии с табл. 3.
Результаты денситометрического исследования представлены в виде соотношения веществ/биоткани

Таблица 3. Диапазон плотности для вещества/ткани
Table 3. Density range for substance/fabric

Вещество (ткань)	Диапазон плотности по шкале Хаунсфилда, НУ
Воздух	-1000—-816
Ткань межтрабекулярного пространства	-816—+301
Минерализованная костная ткань	+314—+2487

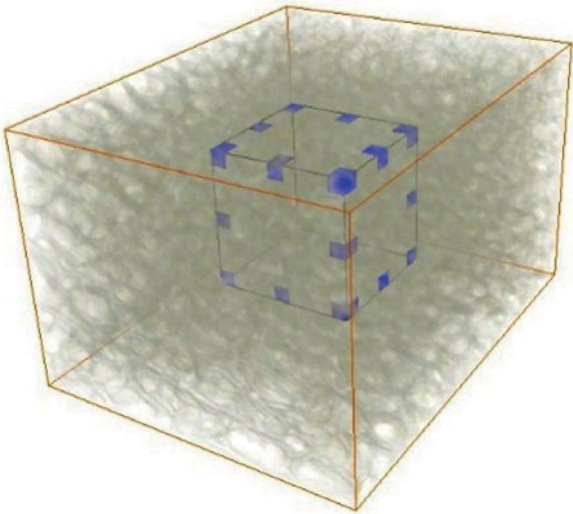


Рис. 1. Зона интереса для расчёта денситометрических показателей.
Fig. 1. Area of interest for the calculation of densitometric parameters.

в центральной части образцов объёмом 5×5×5 мм в процентах от общего объёма как средние значения по результатам трёх измерений.
Степень очистки ксеногенного костного матрикса представлена коэффициентом очистки, рассчитанным по формуле:

$$K_{оч.} = \frac{V_{\text{воздуха}}}{V_{\text{ткани межтрабекулярного пространства}}} \cdot$$

Гистологическое исследование

Все образцы фиксировали в нейтральном формалине, декальцинировали, обезвоживали, заливали в парафин, получали срезы толщиной 4 микрона, окрашивали гематоксилином-эозином и пикросириусом красным. Изучали при стандартной световой, фазово-контрастной и поляризационной микроскопии в микроскопе Leica DM 4000 B LED (Leica Microsystems Wetzlar GmbH, Германия) с камерой Leica DFC 7000 T.
Морфологический анализ содержания остеоцитов в костной ткани был основан на характерных морфологических особенностях этих клеток и их специфическом расположении и не требовал дополнительного иммуногистохимического исследования. Остеоциты — основные клетки костной ткани овальной формы, с уплощёнными

ядрами и многочисленными отростками, лежащие в особых полостях межклеточного вещества — костных лакунах.

Морфометрический анализ содержания костных лакун с оставшимися после обработки клеточными ядрами остеоцитов был выполнен на 100 тыс. мкм² площади образцов ксенокости в программе ImageJ при увеличении ×200 в 10 полях зрения для каждого образца. Данные представлены в виде средних значений и ошибок среднего. Статистический анализ проводился с использованием программного обеспечения GraphPadPrism 9.0.0. Значимость различий оценивали с помощью однофакторного анализа ANOVA с тестом множественного сравнения Тьюки. Значения $p \leq 0,05$ считались статистически значимыми.

Спектроскопия ядерного магнитного резонанса

Качественное определение остаточных количеств растворителей после финального обезжиривания проводили методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР ¹H), используя в качестве внутреннего стандарта бензол (спектры ЯМР ¹H зарегистрированы на спектрометре Bruker Advance-400 (BrukerBioSpin GmbH, Германия), рабочая частота 400 МГц, в C₆D₅N). Образцы для ЯМР готовили путём экстракции матрикса размером 10×7×3 мм в 3 мл бензола

в закупоренных виалах в шейкере-инкубаторе без нагревания при скорости вращения 120 грт в течение 10 суток, центрифугирования и упаривания экстракта в вакууме. Остаток растворяли в 0,6 мл C₆D₅N. В пробирку для ЯМР, содержащую приблизительно 0,4 мл дейтерированного растворителя, добавляли 3 мкл образца экстрагированного раствора.

Статистический анализ

Применялся для анализа остеоцитов и указан в разделе статьи «Гистологическое исследование».

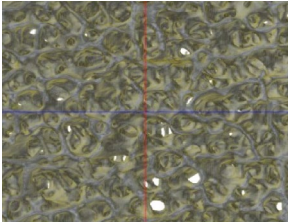
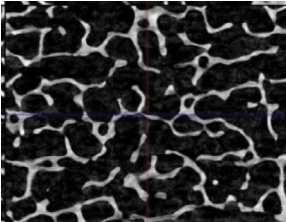
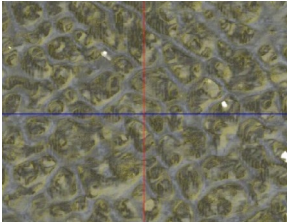
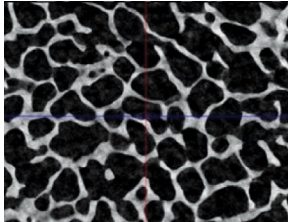
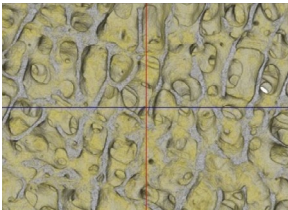
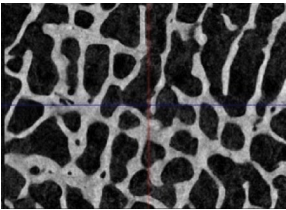
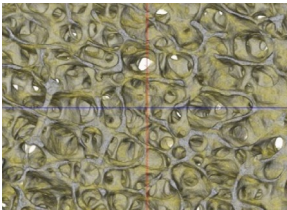
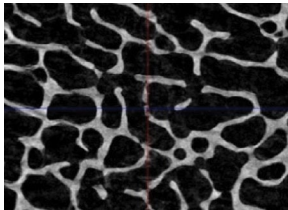
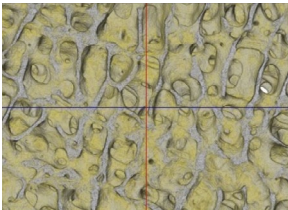
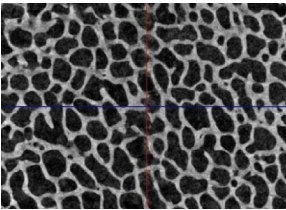
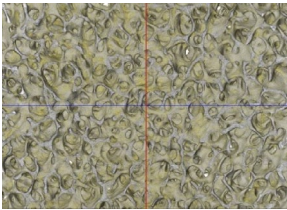
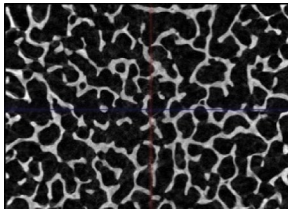
Этическая экспертиза

В данной работе этическая экспертиза не требовалась ввиду отсутствия воздействия на живые организмы в процессе исследования.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В соответствии с результатами микротомографического исследования (табл. 4), макроскопических изменений в трабекулярной костной структуре после воздействия в соответствии с указанными выше протоколами очистки не наблюдалось. Сохранность костной структуры отчётливо подтверждается результатами гистологического

Таблица 4. Результаты томографического исследования
Table 4. The results of the tomographic examination

3D-реконструкция	Микро-КТ срез	3D-реконструкция	Микро-КТ срез
1-1		1-2	
			
2-1		2-2	
			
3-1		3-2	
			

исследования при использовании фазово-контрастной и поляризационной микроскопии (табл. 5).

У образцов 1-1 и 3-1 костные трабекулы обычной толщины формировали ячеистую сеть, что характерно для нормальной губчатой кости. Во всех остальных образцах присутствовали признаки нарушения микро-структуры и архитектоники костной ткани с увеличением площади межтрабекулярного пространства: костные трабекулы становились тоньше, были более рыхло и параллельно расположены, появлялось много мелких трабекул.

Таблица 5. Микроскопия образцов ксеногенного костного матрикса
Table 5. Microscopy of xenogenic bone matrix samples

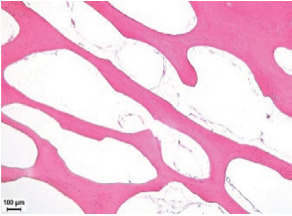
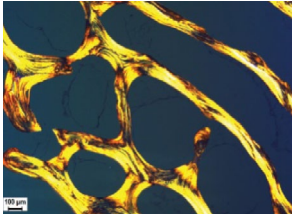
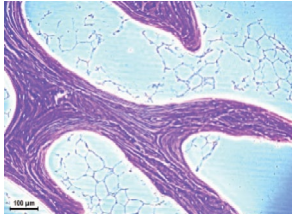
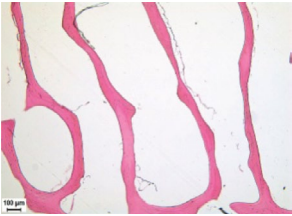
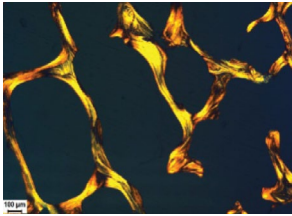
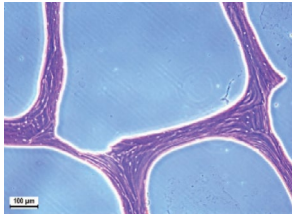
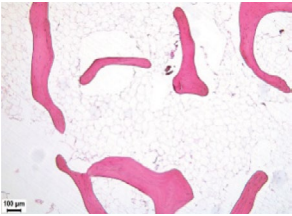
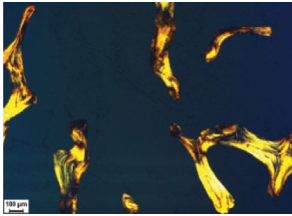
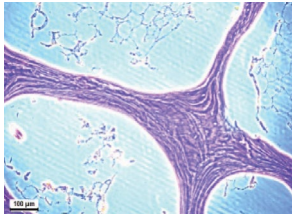
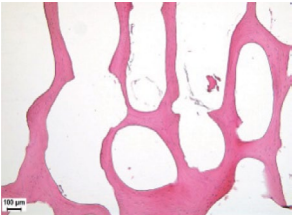
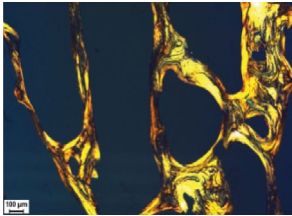
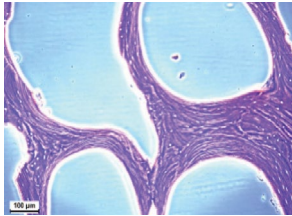
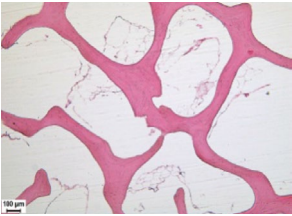
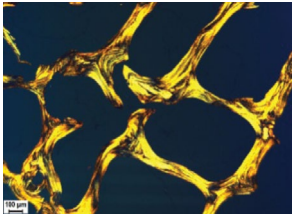
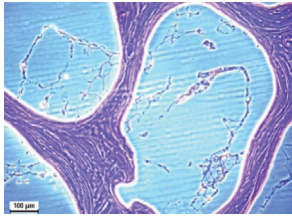
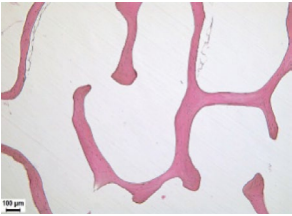
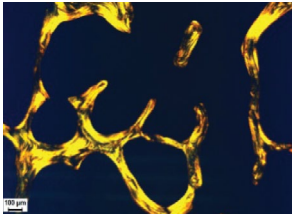
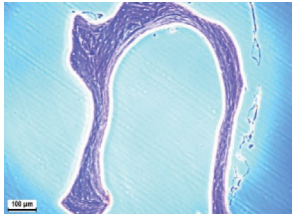
Номер методики	Светлопольная микроскопия, гематоксилин-эозин, увеличение ×50	Поляризационная микроскопия, пикросириус красный, увеличение ×50	Фазово-контрастная микроскопия, гематоксилин-эозин, увеличение ×100
1-1			
1-2			
2-1			
2-2			
3-1			
3-2			

Таблица 6. Морфологические параметры образцов ксеногенной костной ткани
Table 6. Morphological parameters of xenogenic bone tissue samples

Номер методики	Костная структура	Расположение трабекул	Трабекулы	Жировые клетки/оболочки жировых клеток	Кровеносные сосуды
1-1	Сохранена	Нормальное	Нормальные	Сохранены	Нет
1-2	Сохранена	Рыхлое, параллельно расположенные	Тонкие	Сохранены	Есть
2-1	Сохранена	Рыхлое	Мелкие	Сохранены	Нет
2-2	Сохранена	В некоторых участках рыхлое, есть параллельно расположенные	Тонкие	Сохранены	Нет
3-1	Сохранена	Нормальное	Нормальные	Сохранены	Нет
3-2	Сохранена	Рыхлое	Тонкие	Сохранены	Нет

В соответствии с морфологическими параметрами образцов (табл. 6), очищенных по применяемым методикам, в незначительной части лакун сохранялись остециты, мембраны адипоцитов (жировых клеток) костного мозга, в одном из образцов наблюдались кровеносные сосуды.

ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, при воздействии гипертонического раствора хорошо сохраняются костные трабекулы, которые формируют ячеистую сеть, характерную для нормальной губчатой кости, однако гипертонический раствор хуже остальных влияет на вымывание остеоцитов. Гипертонический раствор отделяет ДНК от белков [24, 25]. Гипотонические растворы могут легко вызывать лизис клеток с помощью простых осмотических эффектов с минимальными изменениями молекул матрикса и архитектуры в соответствии с литературными данными [25]. Однако при четырёхчасовом воздействии гипотоническим раствором отмечались незначительные нарушения структуры: костные трабекулы становились тоньше, были более рыхло и параллельно расположены. Всё это в итоге может привести к снижению костной плотности, упругости и эластичности с последующим повышением ломкости кости. В соответствии с литературными данными,

гипо- и гипертонические растворы эффективно лизируют клетки, но неэффективно удаляют клеточные остатки [20]. Воздействие проточной водой хорошо сохраняет костные трабекулы, оставляя наименьшее количество остеоцитов в межтрабекулярном пространстве (табл. 7). Сохранность жировых клеток в результате первичной очистки в водных растворах указывает на недостаточно эффективную делипидизацию и требует дополнительных методов очистки.

Предложенный скрининговый метод определения коэффициента очистки по денситометрической плотности, определённой по результатам микро-КТ, даёт возможность быстро оценить степень очистки межтрабекулярного пространства. Этот метод является грубым и не может быть использован в качестве единственного метода контроля, однако он наименее трудоёмкий, наиболее быстрый и может быть применён для первичного скрининга в процессе очистки. Межтрабекулярное пространство, заполненное ретикулярной и жировой тканью, освобождается в процессе очистки, заполняясь воздухом. При расчёте коэффициента очистки минерализованный компонент кости не учитывался, поскольку его количество в объёме связано с удалённостью от надкостницы и уменьшается от периферии к костномозговому каналу. В соответствии с расчётным по денситометрическим показателям коэффициентом очистки межтрабекулярное

Таблица 7. Морфологический анализ содержания остеоцитов
Table 7. Morphological analysis of osteocyte content

Номер методики	Процент содержания костных лакун с оставшимися после обработки ядрами остеоцитов от общего числа лакун в образце	Количество костных лакун с оставшимися ядрами остеоцитов в костной ткани (шт/100 тыс. мкм ² образца)
1-1	34,0±4,1	13,6±1,7
1-2	7,7±1,1	3,3±0,5
2-1	25,9±3,7	10,7±1,5
2-2	7,7±1,5	3,3±0,7
3-1	12,6±2,3	4,5±0,8
3-2	5,2±1,3	2,8±0,7

Таблица 8. Соотношение веществ/биотканей в объёме образцов (%) и коэффициент очистки**Table 8.** The ratio of substances/biological tissues in the volume of samples (%) and the purification coefficient

Вещество/биоткань \ Номер методики	1-1	1-2	2-1	2-2	3-1	3-2
Воздух	17,4	18,9	12,0	27,7	8,5	21,9
Ткань межтрабекулярного пространства	72,1	56,5	73,1	66,5	79,0	66,6
Минерализованный компонент кости	10,5	24,6	14,9	5,8	12,6	11,6
Коэффициент очистки	0,24±0,05	0,33±0,06	0,16±0,04	0,42±0,06	0,11±0,04	0,33±0,06

пространство костной ткани после воздействия проточной водой и гипо- и гипертоническими растворами заполнено в меньшей степени воздухом и в большей — иными веществами (возможно, клеточными остатками ретикулярной и жировой ткани) (табл. 8).

В связи с необходимостью удаления лизисных клеточных остатков необходимо дополнительное воздействие. Физические методы очистки ткани в определённой степени эффективны и обладают преимуществом перед другими методами в низких иммунных реакциях ткани после их применения за счёт отсутствия воздействия химических реагентов, которые могут оставаться в следовых количествах после использования в методике очистки. Они применяются для изменения физических характеристик ткани, разрушения клеточной мембраны, вызывания лизиса клеток и, наконец, удаления клеток и другого содержимого [26].

УЗ-воздействие может привести к лизису клеток, но чаще используется для облегчения химического воздействия и удаления клеточного материала. Известно, что перекись водорода, взаимодействуя с липидами клеточных мембран, повреждает их, инактивирует и устраняет широкий спектр микроорганизмов. Совместное взаимодействие перекиси водорода и ультразвука увеличивает эффективность очистки, которая зависит от концентрации перекиси водорода. Обработка ультразвуком приводит к нарушению целостности клеточной мембраны, образованию пор и лизису клеток. Как следствие, увеличивается проницаемость мембраны, что способствует проникновению перекиси вглубь матрикса и облегчает его. При обработке костного матрикса 6% раствором перекиси водорода в остеocyтах ядер наблюдается в несколько раз меньше, чем при обработке в 3% растворе, следовательно, его иммуногенность ниже, но общая костная структура более рыхлая, трабекулы становятся тоньше и реже, что подтверждается данными гистологического и микрофотографического исследований. Таким образом, использование 6% раствора перекиси водорода вызывает деструкцию и нежелательно с точки зрения сохранности архитектуры.

На основании результатов первого этапа исследования протокол первичной очистки включает последовательное воздействие проточной водой в течение 4 часов, гипотоническим раствором в течение 2 часов и 3% раствором

перекиси водорода в ультразвуке в течение 8 часов. При использовании указанного протокола сохраняется нормальная костная структура, однако также сохранены мембраны адипоцитов (жировых клеток) костного мозга, количество остеocитов с ядрами ~10%. Коэффициент очистки составляет 0,68±0,06.

Следующим этапом работы было исследование воздействия органических растворителей (смеси этанола с хлороформом и гексана с пропанолом) и сверхкритической флюидной экстракции диоксидом углерода на ксеногенный костный матрикс, подвергнутый первичной очистке.

Эффективность использования всех этих методов подтверждается результатами томографического и гистологического исследований: сохранностью микроархитектоники (костные трабекулы формируют характерную для нормальной губчатой кости ячеистую сеть, костный матрикс имеет нормальную тонковолокнистую структуру), лизисом клеток (в лакунах сохранено меньше 10% остеocитов с ядрами, остальные лакуны пустые) и полным удалением клеточных остатков (мембраны адипоцитов костного мозга отсутствуют). На рис. 2, 3 приведены результаты томографического и гистологического исследований для образца, очищенного по методике 4-3. Результаты исследований образцов, очищенных по методикам 4-1 и 4-2, представляют собой аналогичную картину.

Коэффициент очистки ксеногенного костного матрикса после глубокой очистки при воздействии органических растворителей и сверхкритической флюидной экстракции (4-1, 4-2, 4-3), в соответствии с результатами томографического исследования (рис. 3), составляет ~0,90±0,07 для образцов, очищенных по методике 4-1, ~0,92±0,04 для образцов, очищенных по методике 4-2, и ~0,91±0,05 для образцов, очищенных по методике 4-3, что значительно превышает коэффициент очистки после первичного воздействия.

Органические растворители оказывают воздействие на лизис клеток путём дегидратации, солюбилизации и удаления липидов, эффективно удаляют клетки из плотных тканей и инактивируют пирогены. Однако растворители способны сшивать и осаждать белки, включая коллаген [20]. При химическом воздействии на костную ткань органическими растворителями возможно снижение некоторых факторов роста, биологической активности

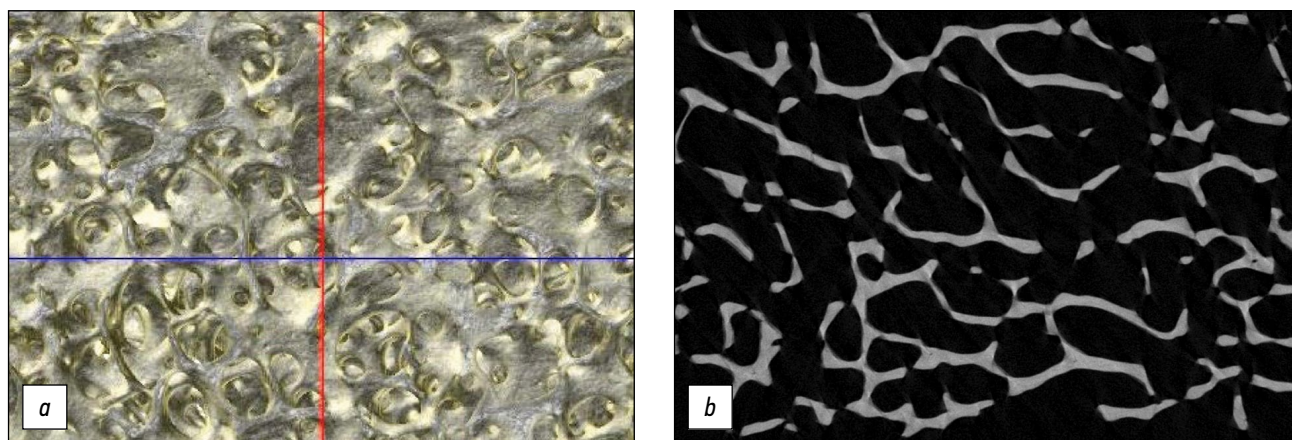


Рис. 2. Результаты томографического исследования образца, очищенного по методике 4-3: *a* — 3D-реконструкция, *b* — микро-КТ срез.

Fig. 2. Tomographic results of the sample purified by technique 4-3: *a* — 3D reconstruction, *b* — micro-CT slice.

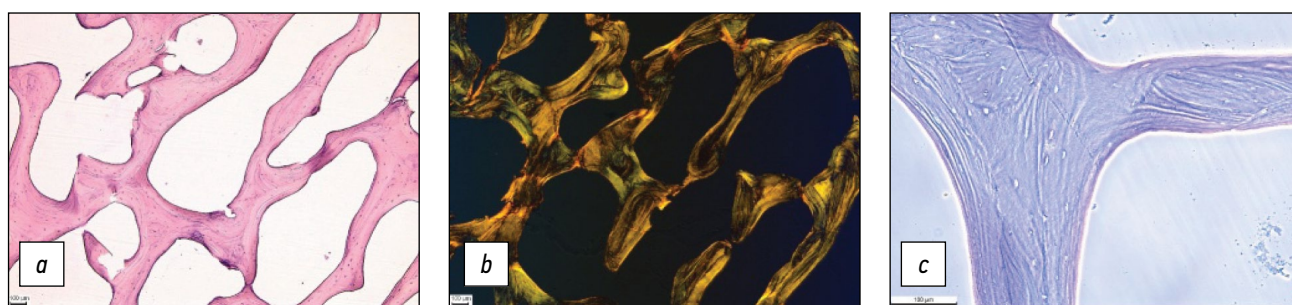


Рис. 3. Микроскопия образца, очищенного по методике 4-3: *a* — светлопольная, гематоксилин-эозин, увеличение $\times 50$; *b* — поляризационная, пикросириус красный, увеличение $\times 50$; *c* — фазово-контрастная, гематоксилин-эозин, увеличение $\times 10$.

Fig. 3. Microscopy of the sample purified by method 4-3: *a* — light-field, hematoxylin-eosin, magnification $\times 50$; *b* — polarization, picrosirius red, magnification $\times 50$; *c* — phase-contrast, hematoxylin-eosin, magnification $\times 10$.

полученных матриксов в большинстве случаев и снижение биосовместимости, увеличение частоты отрицательного иммунного ответа из-за остаточных реагентов [26].

Согласно результатам спектроскопии ядерного магнитного резонанса, следовые количества реагентов действительно присутствуют после удаления органических растворителей вакуумированием, что может повышать иммуногенность. В спектрах ЯМР ^1H образцов, обработанных органическими растворителями, обнаружены химические сдвиги, которые соответствуют следовым количествам этанола, пропанола, гексана (рис. 4) [27]. На рис. 4*a* представлен спектр ЯМР ^1H вытяжки из матрикса, очищенного смесью этанола ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) и хлороформа (CHCl_3). Согласно G.R. Fulmer и соавт. [27], при использовании бензола (C_6D_6) в качестве внутреннего стандарта химические сдвиги групп этанола приходятся на 0,50; 0,96 и 3,34 м.д., химические сдвиги групп хлороформа — на 6,15 м.д. Последний сдвиг на спектре не обнаружен. Другие сдвиги присутствуют на спектре с незначительным смещением.

На рис. 4*b* представлен спектр ЯМР ^1H вытяжки из матрикса, очищенного смесью гексана ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}_3$) и пропанола ($(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$). Согласно G.R. Fulmer и соавт. [27], при использовании бензола в качестве внутреннего стандарта химические сдвиги групп пропанола приходятся

на 0,95 и 3,67 м.д., химические сдвиги групп гексана — на 0,89 и 1,24 м.д. Сдвиг, характерный для гексана, обнаружен при 1,27 м.д., сдвиги, относящиеся к пропанолу, при 0,95 и 3,64 м.д. Обнаруженные сдвиги свидетельствуют о следовых количествах органических растворителей на поверхности матриксов.

На рис. 4*c* представлен спектр ЯМР ^1H вытяжки из матрикса, очищенного сверхкритической флюидной экстракцией. На спектре обнаружены единственные сдвиги малой интенсивности, синглет, в той же области, где находится вода. Сверхкритический диоксид углерода удаляет остатки клеток при пропускании через ткани с контролируемой скоростью, аналогичной сушке в критической точке, для удаления клеток при минимальном изменении механических свойств матрикса [28]. При экстракции в CO_2 удаление липидов из ткани на 14% эффективнее, чем традиционная экстракция липидов [29]. В литературе сообщается о возможности ск- CO_2 служить стерилизующим агентом [28, 30], однако этот эффект применительно к костной ткани требует дополнительного изучения.

Технология сверхкритической флюидной экстракции высокоэффективно очищает костный матрикс и не оставляет следов органических растворителей, остаточное

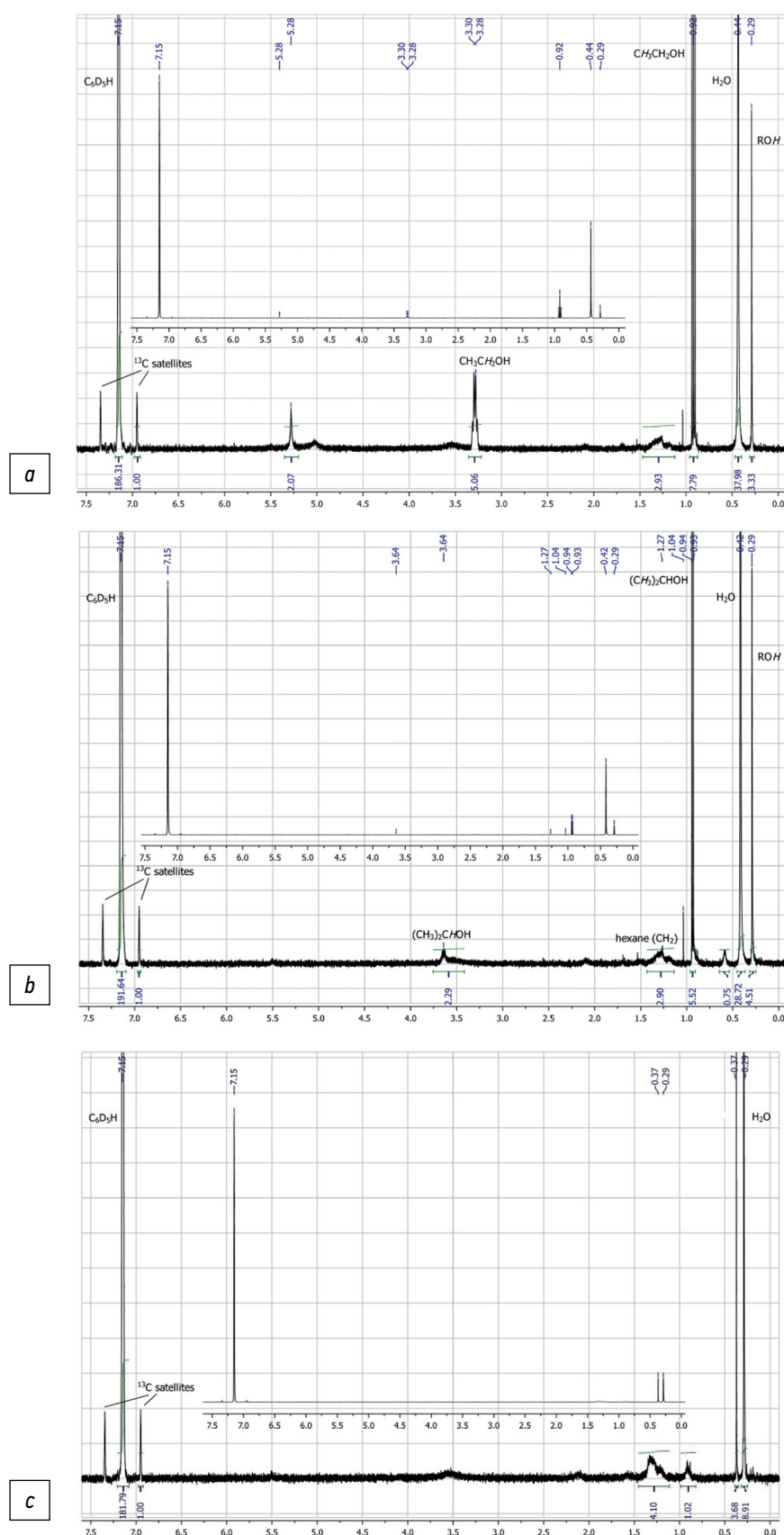


Рис. 4. ЯМР-спектры экстрактов из образцов, очищенных: *a* — этанолом+хлороформом (4-1), *b* — гексаном+пропанолом (4-2), *c* — ск- CO_2 (4-3).

Fig. 4. NMR spectra of extracts from samples purified with: *a* — ethanol+chloroform (4-1), *b* — hexane+propanol (4-2), *c* — sk- CO_2 (4-3).

количество которых могло бы потребовать контроля в процессе производства. По литературным данным, при обработке в ск- CO_2 содержание липидов снижается до 0,1% [29]. Оставшийся после воздействия углекислый газ представляет собой естественный компонент тканей, не является токсичным и легко выводится.

Таким образом, эффективный протокол очистки следующий:

- воздействие проточной водой в течение 4 часов;
- воздействие 0,5% раствором NaCl в течение часа;
- воздействие 3% раствором H_2O_2 при УЗ-воздействии в течение 8 часов;
- воздействие сверхкритическим CO_2 в течение 8 часов при давлении 450 бар, температуре +35 °C.

В нашей работе очистка костного матрикса флюидной экстракцией является эффективной завершающей стадией протокола очистки. При полной очистке межтрабекулярного пространства костной ткани от клеточного компонента наблюдается полная сохранность микро- и макроструктуры ксеногенного костного матрикса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы был выбран наиболее эффективный протокол очистки ксеногенной спонгиозной костной ткани с использованием сочетания физического и химического воздействия. Подобраны параметры, реагенты и методы воздействия, позволяющие провести полную очистку межтрабекулярного пространства от кровеносных сосудов, клеточных элементов, сохранив

микроархитектонику нативной костной ткани, что подтверждается гистологическим и томографическим исследованиями с учётом коэффициента очистки, рассчитанного на основе денситометрической плотности.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

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

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

ADDITIONAL INFO

Author contribution. All authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Funding source. The authors state that there is no external funding when conducting the research and preparing the publication.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dickson G., Buchanan F., Marsh D., et al. Orthopaedic tissue engineering and bone regeneration // *Technol Health Care*. 2007. Vol. 15, № 1. P. 57–67.
2. Brydone A.S., Meek D., MacLaine S. Bone grafting, orthopaedic biomaterials, and the clinical need for bone engineering // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. 2010. Vol. 224, № 12. P. 1329–1343. doi: 10.1243/09544119jeim770
3. Vo T.N., Kasper F.K., Mikos A.G. Strategies for controlled delivery of growth factors and cells for bone regeneration // *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2012. Vol. 64, № 12. P. 1292–1309. doi: 10.1016/j.addr.2012.01.016
4. Belthur M.V., Conway J.D., Jindal G., Ranade A., Herzenberg J.E. Bone graft harvest using a new intramedullary system // *Clin Orthop*. 2008. Vol. 466, № 12. P. 2973–2980. doi: 10.1007/s11999-008-0538-3
5. Conway J.D. Autograft and nonunions: morbidity with intramedullary bone graft versus iliac crest bone graft // *Orthop Clin North Am*. 2010. Vol. 41, № 1. P. 75–84. doi: 10.1016/j.ocl.2009.07.006
6. Schwartz C.E., Martha J.F., Kowalski P., et al. Prospective evaluation of chronic pain associated with posterior autologous iliac crest bone graft harvest and its effect on postoperative outcome // *Health Qual Life Outcomes*. 2009. Vol. 7. P. 49. doi: 10.1186/1477-7525-7-49
7. Sen M.K., Miclau T. Autologous iliac crest bone graft: should it still be the gold standard for treating nonunions? // *Injury*. 2007. Vol. 38, suppl 1. P. S75–S80. doi: 10.1016/j.injury.2007.02.012
8. Thangarajah T., Shahbazi S., Pendegress C.J., et al. Tendon Reattachment to Bone in an Ovine Tendon Defect Model of Retraction Using Allogenic and Xenogenic Demineralised Bone Matrix Incorporated with Mesenchymal Stem Cells // *PLoS One*. 2016. Vol. 11, № 9. P. e0161473. doi: 10.1371/journal.pone.0161473
9. Musson D.S., Gao R., Watson M., et al. Bovine bone particulates containing bone anabolic factors as a potential xenogenic bone graft substitute // *J Orthop Surg Res*. 2019. Vol. 14, № 1. P. 60. doi: 10.1186/s13018-019-1089-x
10. Sackett S.D., Tremmel D.M., Ma F., et al. Extracellular matrix scaffold and hydrogel derived from decellularized and delipidized human pancreas // *Sci Rep*. 2018. Vol. 8, № 1. P. 1–16. doi: 10.1038/s41598-018-28857-1
11. Hussey G.S., Dziki J.L., Badylak S.F. Extracellular matrix-based materials for regenerative medicine // *Nat Rev Mater*. 2018. Vol. 3, № 7. P. 159–73. doi: 10.1038/s41578-018-0023-x
12. Hillebrandt K.H., Everwien H., Haep N., et al. Strategies based on organ decellularization and recellularization // *Transpl Int*. 2019. Vol. 32, № 6. P. 571–85. doi: 10.1111/tri.13462

13. Saldin L.T., Cramer M.C., Velankar S.S., White L.J., Badylak S.F. Extracellular matrix hydrogels from decellularized tissues: Structure and function // *Acta Biomater.* 2017. Vol. 49. P. 1–15. doi: 10.1016/j.actbio.2016.11.068
14. Gardin C., Ricci S., Ferroni L., et al. Decellularization and Delipidation Protocols of Bovine Bone and Pericardium for Bone Grafting and Guided Bone Regeneration Procedures // *PLoS One.* 2015. Vol. 10, № 7. P. e0132344. doi: 10.1371/journal.pone.0132344
15. Amirazad H., Dadashpour M., Zarghami N. Application of decellularized bone matrix as a bioscaffold in bone tissue engineering // *Journal of biological engineering.* 2022. Vol. 16, № 1. P. 1–18. doi: 10.1186/s13036-021-00282-5
16. Carvalho M.S., Cabral J.M.S., da Silva C.L., Vashishth D. Bone matrix non-collagenous proteins in tissue engineering: creating new bone by mimicking the extracellular matrix // *Polymers.* 2021. Vol. 13, № 7. P. 1095. doi: 10.3390/polym13071095
17. Keane T.J., Swinehart I.T., Badylak S.F. Methods of tissue decellularization used for preparation of biologic scaffolds and in vivo relevance // *Methods.* 2015. Vol. 84. P. 25–34. doi: 10.1016/j.ymeth.2015.03.005
18. Nonaka P.N., Campillo N., Uriarte J.J., et al. Effects of freezing/thawing on the mechanical properties of decellularized lungs // *J Biomed Mater Res — Part A.* 2014. Vol. 102, № 2. P. 413–419. doi: 10.1002/jbm.a.34708
19. Lu H., Hoshiba T., Kawazoe N., Chen G. Comparison of decellularization techniques for preparation of extracellular matrix scaffolds derived from three-dimensional cell culture // *J Biomed Mater Res — Part A.* 2012. Vol. 100A, № 9. P. 2507–2516. doi: 10.1002/jbm.a.34150
20. Crapo P.M., Gilbert T.W., Badylak S.F. An overview of tissue and whole organ decellularization processes // *Biomaterials.* 2011. Vol. 32, № 12. P. 3233–3243. doi: 10.1016/j.biomaterials.2011.01.057
21. Burk J., Erbe I., Berner D., et al. Freeze-thaw cycles enhance decellularization of large tendons // *Tissue Eng Part C Methods.* 2014. Vol. 20, № 4. P. 276–284. doi: 10.1089/ten.tec.2012.0760
22. Xu H., Xu B., Yang Q., et al. Comparison of decellularization protocols for preparing a decellularized porcine annulus fibrosus scaffold // *PLoS One.* 2014. Vol. 9, № 1. P. e86723. doi: 10.1371/journal.pone.0086723
23. Smith C.A., Board T.N., Rooney P., et al. Correction: human decellularized bone scaffolds from aged donors show improved osteoinductive capacity compared to young donor bone // *PLoS One.* 2017. Vol. 12, № 11. P. e0177416. doi: 10.1371/journal.pone.0187783
24. Cox B., Emili A. Tissue subcellular fractionation and protein extraction for use in mass-spectrometry-based proteomics // *Nat Protoc.* 2006. Vol. 1, № 4. P. 1872e8. doi: 10.1038/nprot.2006.273
25. Xu C.C., Chan R.W., Tirunagari N. A biodegradable, acellular xenogeneic scaffold for regeneration of the vocal fold lamina propria // *Tissue Eng.* 2007. Vol. 13, № 3. P. 551e66. doi: 10.1089/ten.2006.0169
26. Liao J., Xu B., Zhang R., et al. Applications of decellularized materials in tissue engineering: advantages, drawbacks and current improvements, and future perspectives // *Journal of Materials Chemistry B.* 2020. Vol. 8, № 44. P. 10023–10049. doi: 10.1039/d0tb01534b
27. Fulmer G.R., Miller A.J.M., Sherden N.H., et al. NMR Chemical Shifts of Trace Impurities: Common Laboratory Solvents, Organics, and Gases in Deuterated Solvents Relevant to the Organometallic Chemist // *Organometallics.* 2010. Vol. 29, № 9. P. 2176–2179. doi: 10.1021/om100106e
28. Antons J., Marascio M.G., Aeberhard P. Decellularised tissues obtained by a CO₂-philic detergent and supercritical CO₂ // *Eur Cell Mater.* 2018. Vol. 36. P. 81–95. doi: 10.22203/eCM.v036a07/
29. Smolentsev D.V., Gurin A.A., Venediktov A.A., Evdokimov S.V., Fadeev R.A. Purification of xenogeneic bone matrix by extraction with supercritical carbon dioxide and evaluation of the obtained material // *Russ J Phys Chem B.* 2017. Vol. 11, № 8. P. 1283–1287. doi: 10.1134/S1990793117080115
30. Bernhardt A., Wehrl M., Paul B. Improved sterilization of sensitive biomaterials with supercritical carbon dioxide at low temperature // *PLoS One.* 2015. Vol. 10, № 6. P. e0129205. doi: 10.1371/journal.pone.0129205

REFERENCES

1. Dickson G, Buchanan F, Marsh D, et al. Orthopaedic tissue engineering and bone regeneration. *Technol Health Care.* 2007;15 (1):57–67.
2. Brydone AS, Meek D, MacLaine S. Bone grafting, orthopaedic biomaterials, and the clinical need for bone engineering. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine.* 2010;224(12):1329–1343. doi: 10.1243/09544119jeim770
3. Vo TN, Kasper FK, Mikos AG. Strategies for controlled delivery of growth factors and cells for bone regeneration. *Advanced Drug Delivery Reviews.* 2012;64(12):1292–1309. doi: 10.1016/j.addr.2012.01.016
4. Belthur MV, Conway JD, Jindal G, Ranade A, Herzenberg JE. Bone graft harvest using a new intramedullary system. *Clin Orthop.* 2008;466(12):2973–2980. doi: 10.1007/s11999-008-0538-3
5. Conway JD. Autograft and nonunions: morbidity with intramedullary bone graft versus iliac crest bone graft. *Orthop Clin North Am.* 2010;41(1):75–84. doi: 10.1016/j.jocl.2009.07.006
6. Schwartz CE, Martha JF, Kowalski P, et al. Prospective evaluation of chronic pain associated with posterior autologous iliac crest bone graft harvest and its effect on postoperative outcome. *Health Qual Life Outcomes.* 2009;7:49. doi: 10.1186/1477-7525-7-49
7. Sen MK, Miclau T. Autologous iliac crest bone graft: should it still be the gold standard for treating nonunions? *Injury.* 2007;38(Suppl 1):S75–S80. doi: 10.1016/j.injury.2007.02.012
8. Thangarajah T, Shahbazi S, Pendegrass CJ, et al. Tendon Reattachment to Bone in an Ovine Tendon Defect Model of Retraction Using Allogenic and Xenogenic Demineralised Bone Matrix Incorporated with Mesenchymal Stem Cells. *PLoS One.* 2016;11(9):e0161473. doi: 10.1371/journal.pone.0161473
9. Musson DS, Gao R, Watson M, et al. Bovine bone particulates containing bone anabolic factors as a potential xenogenic bone graft substitute. *J Orthop Surg Res.* 2019;14(1):60. doi: 10.1186/s13018-019-1089-x
10. Sackett SD, Tremmel DM, Ma F, et al. Extracellular matrix scaffold and hydrogel derived from decellularized and delipidized human pancreas. *Sci Rep.* 2018;8(1):1–16. doi: 10.1038/s41598-018-28857-1
11. Hussey GS, Dziki JL, Badylak SF. Extracellular matrix-based materials for regenerative medicine. *Nat Rev Mater.* 2018;3(7):159–73. doi: 10.1038/s41578-018-0023-x
12. Hillebrandt KH, Everwien H, Haep N, et al. Strategies based on organ decellularization and recellularization. *Transpl Int.* 2019;32(6):571–85. doi: 10.1111/tri.13462

13. Saldin LT, Cramer MC, Velankar SS, White LJ, Badylak SF. Extracellular matrix hydrogels from decellularized tissues: Structure and function. *Acta Biomater.* 2017;49:1–15. doi: 10.1016/j.actbio.2016.11.068
14. Gardin C, Ricci S, Ferroni L, et al. Decellularization and Delipidation Protocols of Bovine Bone and Pericardium for Bone Grafting and Guided Bone Regeneration Procedures. *PLoS One.* 2015;10(7):e0132344. doi: 10.1371/journal.pone.0132344
15. Amirazad H, Dadashpour M, Zarghami N. Application of decellularized bone matrix as a bioscaffold in bone tissue engineering. *Journal of biological engineering.* 2022;16(1):1–18. doi: 10.1186/s13036-021-00282-5
16. Carvalho MS, Cabral JMS, da Silva CL, Vashishth D. Bone matrix non-collagenous proteins in tissue engineering: creating new bone by mimicking the extracellular matrix. *Polymers.* 2021;13(7):1095. doi: 10.3390/polym13071095
17. Keane TJ, Swinehart IT, Badylak SF. Methods of tissue decellularization used for preparation of biologic scaffolds and in vivo relevance. *Methods.* 2015;84:25–34. doi: 10.1016/j.ymeth.2015.03.005
18. Nonaka PN, Campillo N, Uriarte JJ, et al. Effects of freezing/thawing on the mechanical properties of decellularized lungs. *J Biomed Mater Res — Part A.* 2014;102(2):413–419. doi: 10.1002/jbm.a.34708
19. Lu H, Hoshiba T, Kawazoe N, Chen G. Comparison of decellularization techniques for preparation of extracellular matrix scaffolds derived from three-dimensional cell culture. *J Biomed Mater Res — Part A.* 2012;100A(9):2507–2516. doi: 10.1002/jbm.a.34150
20. Crapo PM, Gilbert TW, Badylak SF. An overview of tissue and whole organ decellularization processes. *Biomaterials.* 2011;32(12):3233–3243. doi: 10.1016/j.biomaterials.2011.01.057
21. Burk J, Erbe I, Berner D, et al. Freeze-thaw cycles enhance decellularization of large tendons. *Tissue Eng Part C Methods.* 2014;20(4):276–284. doi: 10.1089/ten.tec.2012.0760
22. Xu H, Xu B, Yang Q, et al. Comparison of decellularization protocols for preparing a decellularized porcine annulus fibrosus scaffold. *PLoS One.* 2014;9(1):e86723. doi: 10.1371/journal.pone.0086723
23. Smith CA, Board TN, Rooney P, et al. Correction: human decellularized bone scaffolds from aged donors show improved osteoinductive capacity compared to young donor bone. *PLoS One.* 2017;12(11):e0177416. doi: 10.1371/journal.pone.0187783
24. Cox B, Emili A. Tissue subcellular fractionation and protein extraction for use in mass-spectrometry-based proteomics. *Nat Protoc.* 2006;1(4):1872e8. doi: 10.1038/nprot.2006.273
25. Xu CC, Chan RW, Tirunagari N. A biodegradable, acellular xenogeneic scaffold for regeneration of the vocal fold lamina propria. *Tissue Eng.* 2007;13(3):551e66. doi: 10.1089/ten.2006.0169
26. Liao J, Xu B, Zhang R, et al. Applications of decellularized materials in tissue engineering: advantages, drawbacks and current improvements, and future perspectives. *Journal of Materials Chemistry B.* 2020;8(44):10023–10049. doi: 10.1039/d0tb01534b
27. Fulmer GR, Miller AJM, Sherden NH, et al. NMR Chemical Shifts of Trace Impurities: Common Laboratory Solvents, Organics, and Gases in Deuterated Solvents Relevant to the Organometallic Chemist. *Organometallics.* 2010; 29(9):2176–2179. doi: 10.1021/om100106e
28. Antons J, Marascio MG, Aeberhard P. Decellularised tissues obtained by a CO₂-philic detergent and supercritical CO₂. *Eur Cell Mater.* 2018;36:81–95. doi: 10.22203/eCM.v036a07/
29. Smolentsev DV, Gurin AA, Venediktov AA, Evdokimov SV, Fadeev RA. Purification of xenogeneic bone matrix by extraction with supercritical carbon dioxide and evaluation of the obtained material. *Russ J Phys Chem B.* 2017;11(8):1283–1287. doi: 10.1134/S1990793117080115
30. Bernhardt A, Wehrl M, Paul B. Improved sterilization of sensitive biomaterials with supercritical carbon dioxide at low temperature. *PLoS One.* 2015;10(6):e0129205. doi: 10.1371/journal.pone.0129205

ОБ АВТОРАХ

* Смоленцев Дмитрий Владимирович;

адрес: Россия, 127299, Москва, ул. Приорова, 10;
ORCID: 0000-0001-5386-1929;
eLibrary SPIN: 3702-1955;
e-mail: SmolentsevDV@cito-priorov.ru

Лукина Юлия Сергеевна, канд. тех. наук,

ORCID: 0000-0003-0121-1232;
eLibrary SPIN: 2814-7745;
e-mail: lukina_rctu@mail.ru

Бионышев-Абрамов Леонид Львович;

ORCID: 0000-0002-1326-6794;
eLibrary SPIN: 1192-3848;
e-mail: sity-x@bk.ru

Серезникова Наталья Борисовна, канд. биол. наук,

ORCID: 0000-0002-4097-1552;
eLibrary SPIN: 2249-9762;
e-mail: natalia.serj@yandex.ru

Васильев Максим Геннадьевич, канд. мед. наук,

ORCID: 0000-0001-9810-6513;
eLibrary SPIN: 7954-6710;
e-mail: VasilevMG@cito-priorov.ru

AUTHORS' INFO

* Dmitriy V. Smolentsev;

address: 10 Priorova str., 127299 Moscow, Russia;
ORCID: 0000-0001-5386-1929;
eLibrary SPIN: 3702-1955;
e-mail: SmolentsevDV@cito-priorov.ru

Yulia S. Lukina, Cand. Sci. (Engineering);

ORCID: 0000-0003-0121-1232;
eLibrary SPIN: 2814-7745;
e-mail: lukina_rctu@mail.ru

Leonid L. Bionyshev-Abramov;

ORCID: 0000-0002-1326-6794;
eLibrary SPIN: 1192-3848;
e-mail: sity-x@bk.ru

Natalya B. Serezhnikova, Cand. Sci. (Biology);

ORCID: 0000-0002-4097-1552;
eLibrary SPIN: 2249-9762;
e-mail: natalia.serj@yandex.ru

Maksim G. Vasiliev, MD, Cand. Sci. (Medicine);

ORCID: 0000-0001-9810-6513;
eLibrary SPIN: 7954-6710;
e-mail: VasilevMG@cito-priorov.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto623895>

Особенности формирования костного регенерата и метаболизм маркеров костеобразования у пациентки с сахарным диабетом 1 типа и диабетической нейроостеоартропатией (стопа Шарко)

П.С. Бардюгов^{1–3}, Е.В. Артёмов¹, М.В. Паршиков², Н.В. Ярыгин²¹ Национальный медицинский исследовательский центр эндокринологии, Москва, Россия;² Российский университет медицины, Москва, Россия;³ Ильинская больница, Красногорск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Хирургическое лечение диабетической нейроостеоартропатии является сложным направлением в травматологии-ортопедии не только из-за тяжёлых нарушений биомеханики и грубых деформаций дистального сегмента нижней конечности, но и потому, что эти явления сопровождаются многими нарушениями соматического статуса. Особое значение имеет выраженное снижение минеральной плотности костной ткани. Данная работа призвана проиллюстрировать особенности лечения этой патологии.

Описание клинического случая. Представлен клинический случай лечения молодой пациентки 34 лет с сахарным диабетом 1 типа, формированием диабетической нейроостеоартропатии (стопа Шарко), асептическим некрозом таранной кости правой стопы. В 2019–2020 гг. проведено консервативное и хирургическое лечение, направленное на купирование активной стадии стопы Шарко, коррекцию деформации и стабилизацию дистального сегмента конечности (пяточно-большеберцовый артродез). Были достигнуты удовлетворительный результат лечения, полная активизация через 8 месяцев после проведённой операции. Однако в 2021 г. пациентка получила закрытый низкоэнергетический перелом дистального метафиза правой большеберцовой кости. По поводу данного эпизода пациентка обращается за медицинской помощью на стадии консолидации перелома со смещением фрагментов и жалобами на рецидив варусной деформации, ещё большее укорочение конечности, отёк области голеностопного сустава. Факт травмы отрицала, что позволило расценивать имеющийся перелом большеберцовой кости как патологический. В связи с этим выполнена операция: остеотомия берцовых костей в зоне консолидации патологического перелома с целью коррекции деформации и компенсации имеющегося укорочения конечности за счёт формирования дистракционного регенерата. В процессе лечения отмечались гипотрофия, замедленное формирование костного регенерата, что потребовало пролонгированного применения аппарата внешней фиксации и проведения специфической медикаментозной терапии, направленной на стимуляцию остеогенеза. По окончании курса отмечено увеличение минеральной плотности ткани, плотности регенерата рентгенологически и лабораторно (контроль маркеров костеобразования) и получение удовлетворительного функционального результата.

Заключение. Успешный результат в данном клиническом случае достигнут при сочетании ортопедического хирургического и консервативного лечения со специфической медикаментозной терапией у коморбидного пациента со сниженной минеральной плотностью костной ткани, высокой вероятностью осложнений в условиях мультидисциплинарного подхода.

Ключевые слова: клинический случай; стопа Шарко; остеоартропатия; остеопения; минеральная плотность костной ткани; пяточно-большеберцовый артродез; костный регенерат.

Как цитировать:

Бардюгов П.С., Артёмов Е.В., Паршиков М.В., Ярыгин Н.В. Особенности формирования костного регенерата и метаболизм маркеров костеобразования у пациентки с сахарным диабетом 1 типа и диабетической нейроостеоартропатией (стопа Шарко) // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2024. Т. 31, № 3. С. 381–393. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto623895>

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto623895>

Features of the formation of bone regenerate and metabolism of bone formation markers in a patient with type 1 diabetes mellitus and diabetic neuroosteoarthropathy (Charcot foot)

Petr S. Bardyugov^{1–3}, Ekaterina V. Artemova¹, Mikhail V. Parshikov², Nikolay V. Yarygin²

¹ Endocrinology Research Centre, Moscow, Russia;

² Russian University of Medicine, Moscow, Russia;

³ Ilyinskaya Hospital, Krasnogorsk, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Surgical treatment of diabetic neuroosteoarthropathy is a complex area in traumatology — orthopedics not only because of severe biomechanical disorders and gross deformations of the distal segment of the lower limb, but also because these phenomena are accompanied by many disorders of the somatic status. Of particular importance is a pronounced decrease in bone mineral density. This case is intended to illustrate the features of the treatment of this pathology.

CLINICAL CASE DESCRIPTION: A clinical case of treatment of a 34-year-old young female patient with type 1 diabetes mellitus, development of diabetic neuroosteoarthropathy (Charcot foot), and aseptic necrosis of the talus of the right foot is presented. From 2019–2020 conservative and surgical treatment was carried out aimed at stopping the active stage of Charcot foot, correcting deformity and stabilizing the distal segment of the limb (calcaneotibial arthrodesis). A satisfactory treatment result was achieved, complete activation 8 months after the operation. However, in 2021 The patient suffered a closed low-energy fracture of the distal metaphysis of the right tibia. Regarding this episode, the patient comes in at the stage of consolidation of a displaced fracture and complaints of recurrence of varus deformity, even greater shortening of the limb, and swelling of the ankle joint. The fact of injury is denied, which allows us to regard the existing fracture of the tibia as pathological. In this regard, an operation was performed: osteotomy of the fibula and tibia in the area of consolidation of the pathological fracture in order to correct the deformity and compensate for the existing shortening of the limb due to the formation of a distraction regenerate. During the treatment, malnutrition and delayed formation of bone regenerate were noted, which required prolonged use of an external fixation device and specific drug therapy aimed at stimulating osteogenesis and improving bone mineral density. At the end of the course, there was an increase in the mineral density of the tissue, the density of the regenerate radiologically and laboratory (control of bone formation markers) and a satisfactory functional result.

CONCLUSION: A successful result in this clinical case was achieved by combining orthopedic surgical and conservative treatment with specific drug therapy in a comorbid patient with reduced bone mineral density and a high probability of complications in a multidisciplinary approach.

Keywords: case report; Charcot foot; osteoarthropathy; osteopenia; bone mineral density; calcaneotibial arthrodesis; bone regenerate.

To cite this article:

Bardyugov PS, Artemova EV, Parshikov MV, Yarygin NV. Features of the formation of bone regenerate and metabolism of bone formation markers in a patient with type 1 diabetes mellitus and diabetic neuroosteoarthropathy (Charcot foot). *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2024;31(3):381–393. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto623895>

Received: 27.11.2023

Accepted: 11.02.2024

Published online: 08.08.2024

ВВЕДЕНИЕ

Диабетическая нейроостеоартропатия (ДНОАП) является тяжёлым осложнением сахарного диабета и представляет собой прогрессирующее поражение костной ткани, проявляющееся воспалением и резорбцией кости и в ряде случаев приводящее к развитию стойкой деформации дистального сегмента нижней конечности, вызванной периферической нейропатией [1, 2].

Нейрогенная регуляция трофики тканей конечностей осуществляется в основном двумя типами немиелинизированных волокон — симпатическими и сенсорными.

Симпатическая нервная система контролирует скелетный гомеостаз, главным образом через адренергические рецепторы (АР), которые представлены на костных клетках-мишенях — остеобластах и остеокластах [3, 4]. Распределение симпатических нервов в скелете млекопитающих до сих пор плохо описано, присутствие симпатического звена периферической нервной системы определяется на уровне бедренной кости. Симпатические периостальные волокна разветвляются в костном мозге и компактной кости, о чём свидетельствует иммуногистохимическая позитивность тканей в отношении тирозингидроксилазы (ТГ), нейропептида Y. Мелкие ветви периостальных нервных волокон, проходящие через кортикальную кость, связаны с кровеносными сосудами фолькмановского и гаверсова каналов. Некоторые могут проходить через паренхиму костного мозга и заканчиваться на стенках синусоидов, периваскулярных стромальных клетках. ТГ-иммунореактивные волокна обычно имеют спиральную морфологию и охватывают кровеносные сосуды, с которыми они связаны. В целом области минерализованной кости, которые подвергаются наибольшему механическому воздействию и нагрузке, имеют самую высокую скорость метаболизма и костного обмена. Они также наиболее васкуляризованы и имеют самую высокую плотность симпатических и сенсорных волокон. И надкостница, и костный мозг получают норадренергические волокна (часто связанные с сосудистой сетью), а также вазоактивные интестинальные полипептид-иммунореактивные (ВИП-иммунореактивные) волокна (часто связанные с паренхимой).

Доказательства роли АР в скелетном метаболизме были получены в ходе исследований на грызунах, где фармакологическая стимуляция β -адренергических сигналов повлияла на костную массу. Значительная потеря минеральной плотности костной ткани (МПКТ) была обнаружена у мышей, получавших изопротеренол (β -адренергический агонист), тогда как лечение пропранололом (неселективным β -адренергическим антагонистом) благотворно влияло на плотность кости [5]. Линии остеобластических клеток и первичные культуры остеобластов в основном экспрессируют подтип β 2АР со слабой или неопределяемой экспрессией β 1АР и β 3АР [6, 7].

β 2АР также идентифицируется на поверхности остеокластов, однако биологическая значимость прямого эффекта стимуляции β 2АР на остеокласты требует дальнейшего изучения, хотя сообщалось о прямом эффекте стимуляции β АР на дифференцировку остеокластов; анализы в этом исследовании проводились с клетками костного мозга, которые могут содержать остеобласты, экспрессирующие β 2АР. Кроме того, холинергическое влияние способно приводить к увеличению костной массы путём активации никотиновых рецепторов (α 2nAChR), экспрессируемых остеокластами, ингибируя резорбцию кости и запуская апоптоз остеокластов [8].

Нокаутные по β 1АР мыши имели низкую массу в бедренных костях и минимальный костный анаболический ответ на осевую компрессионную нагрузку. Этот фенотип, по-видимому, доминировал над фенотипом, индуцированным дефицитом β 2АР, поскольку мыши с двойным нокаутом β 1/2АР также имели фенотип низкой костной массы, связанный со снижением скорости костеобразования и отсутствием ответа на компрессионную нагрузку.

Эти результаты позволяют предположить, что передача сигналов β 1АР и β 2АР оказывает противоположное воздействие на кости: передача сигналов β 1АР оказывает преобладающий анаболический стимул, тогда как передача сигналов β 2АР является катаболической [9].

Парасимпатических волокон в конечностях, особенно в дистальных отделах, практически нет, возможны клинически незначимые по числу волокна в проксимальных зонах нижних конечностей, проникающие по сосудам периваскулярно из таза.

Иммуногистохимическое окрашивание дистального метафиза бедренной кости в исследовании на лабораторных мышцах выявило везикулярный транспортёр ацетилхолина (VAChT) — положительные нейрональные волокна в медуллярных межтрабекулярных пространствах, главным образом в непосредственной близости от костных балок. Чтобы картировать центральный вегетативный путь, было проведено ретроградное транснейрональное распространение рекомбинантного вируса псевдобешенства, инокулированного в дистальный метафиз бедренной кости. Меченые вирусом антитела были идентифицированы в центральном автономном ядре крестцового сегмента спинного мозга животных, анатомических участках, ограниченных для тел парасимпатических преганглионарных клеток [10].

Более того, активация nAChR специфическими агонистами может индуцировать пролиферацию остеобластов, что также способствует увеличению костной массы [11].

Надкостница и трабекулярные костные отделы богато иннервированы густой сетью сенсорных волокон, чувствительных к механической стимуляции. Хотя функциональная значимость этого физиологического процесса ещё не изучена в достаточной степени, как сенсорные, так и симпатические нервные волокна в конечностях способны прорасти в ответ на воспаление [12, 13].

В нормальной бедренной кости относительная плотность чувствительных нервных волокон кальцитонин-генеродственного пептида (CGRP+) и нейротрофной рецепторной тирозинкиназы 1, или TrkA (TrkA+), на единицу объёма равна: надкостница > костный мозг > минерализованная кость > хрящ — 100:2:0,1:0 соответственно. Тот факт, что большинство сенсорных нервных волокон, иннервирующих скелет, экспрессируют TrkA+, может частично объяснить, почему методы лечения, блокирующие путь NGF/TrkA, очень эффективны в ослаблении скелетной боли [14].

Механическая деформация, связанная с переломами или дефектами костей, активирует волокна Аδ- или С-типа, которые передают первоначальные болевые стимулы в соответствующие области коры головного мозга, что приводит к эффекторному высвобождению катехоламинов симпатическими нервами [15, 16].

На окончаниях сенсорных нервов имеется широкий спектр рецепторов, которые обнаруживают специфические медиаторы воспаления, и активация этих рецепторов запускает ряд последующих изменений, таких как фосфорилирование и активация ионных каналов (например, Nav1.7, Nav1.8, Nav1.9, TRPV1 и TRPA1), что также приводит к сенсibilизации и дальнейшему высвобождению нейротрансмиттеров [17].

Цитокины (гистамин, TNF, IL-1β, IL-6, IL-17A), липидные медиаторы (простагландин E2 (PGE2), лейкотриен B4) и факторы роста (NGF, нейротрофический фактор головного мозга (NGF) BDNF) продуцируются в основном тучными клетками, нейтрофилами, макрофагами и клетками Th17 или γδТ и вносят существенный вклад в сенсibilизацию сенсорных нервов. Например, связывание TNFα и его рецептора (рецептор TNFα1, TNFR1) на окончаниях фосфорилирует каналы Nav1.8, чтобы облегчить открытие каналов. Таким образом, валлеровская дегенерация и воспаление являются первичными реакциями периферических нервов во время перелома кости [18].

Анаболический эффект нейропептидов проявляется за счёт прямого связывания с клетками костного происхождения, а также воздействия на эндотелиальные клетки в ходе неоваскулогенеза [19–21].

Периферическая нервная система играет важную роль в развитии воспалительного ответа в тканях путём регуляции активности местной иммунной системы. По данным литературы (экспериментальные исследования), эфферентное звено парасимпатической нервной системы оказывает противовоспалительное действие путём влияния на различные подтипы рецепторов к ацетилхолину (nAChR), находящиеся на поверхности иммунокомпетентных клеток, тем самым модулируя их активность. Активация α7nAChR подавляет продукцию провоспалительных цитокинов путём снижения транслокации ядерного фактора NF-κB [22–24].

В острой стадии диабетической нейроостеоартропатии патологические изменения затрагивают костный мозг

и характеризуются персистирующим отёком и воспалением, затрагивающим также периартикулярные ткани. Некупирующееся воспаление приводит к прогрессирующему патологическому процессу, деформации и как следствие — к переломам. Про- и противовоспалительные медиаторы участвуют в сложном процессе активации и разрешении воспаления, важную роль в котором играет макрофагальная система. Стали появляться данные об участии макрофагов в остеогенезе. Однако до конца не ясно, какой фенотип макрофагов, M1 или M2 (провоспалительный M1-фенотип, противовоспалительный M2-фенотип), усиливает остеогенную дифференцировку мезенхимальных клеток *in vitro*. Ряд исследователей сообщают, что M1-макрофаги могут способствовать ранней и средней стадиям остеогенеза, тогда как M2-макрофаги способствуют минерализации матрикса гораздо позже. Соответствующее переключение с фенотипа M1 на фенотип M2 может иметь решающее значение для заживления переломов костей и остеоинтеграции имплантата [21].

К сожалению, накоплено достаточно скудное количество данных о патогенезе ДНОАП, а результаты медикаментозного воздействия на локальный остеопороз не увенчались успехом.

Результаты оперативного лечения костно-суставной патологии (особенно с использованием внутренних или внешних металлоконструкций) во многом зависят от способности костной ткани к репарации, к тому же больные сахарным диабетом с тяжёлым повреждением периферической нервной системы имеют низкий регенераторный потенциал мягкотканых дефектов [25, 26]. Данные обстоятельства обуславливают высокий риск таких осложнений, как замедленная консолидация или несращение переломов, отсутствие или замедленное формирование костного анкилоза (после выполнения артротомии), патологические переломы.

ОПИСАНИЕ КЛИНИЧЕСКОГО СЛУЧАЯ

Пациентка В., 34 лет, с сахарным диабетом 1 типа, длительностью заболевания 29 лет, будучи в декретном отпуске, первый раз обратилась за медицинской помощью в 2019 г. Характер профессиональной деятельности — медицинская сестра. Предъявляла жалобы на отёк, деформацию и укорочение правой нижней конечности, а также умеренные боли в области голеностопного сустава (5 баллов по Визуальной аналоговой шкале (ВАШ)).

Эпизод первый

Вес пациентки на момент первичного обращения составлял 55 кг, рост — 158 см, передвигалась без средств дополнительной опоры. При обследовании выявлена тяжёлая дистальная полинейропатия, число баллов по шкале НДС («Нейропатический дисфункциональный счёт») [27] — 20. Температурная и болевая чувствительность на стопе отсутствовали, что свидетельствовало о грубой



Рис. 1. Внешний вид конечности.

Fig. 1. Appearance of the limb.

патологии тонких немиелинизированных волокон. При исследовании артериального кровотока выявлены признаки медиасклероза, кровоток на задней большеберцовой артерии магистрально-изменённый, линейная скорость кровотока — 45 см/с, на тыльной артерии стопы — магистрально-изменённый, линейная скорость кровотока — 30 см/с. Отмечались умеренный отёк области правого голеностопного сустава (окружность +2 см по сравнению с контралатеральной конечностью), гипертермия кожных покровов (+5 °С по сравнению с контралатеральной конечностью), варусная деформация (пяточно-тибиальный угол без нагрузки 30°, с нагрузкой — 45°), длина бедренного сегмента и голени правой и левой нижних конечностей одинаковы, укорочение правой нижней конечности за счёт дистального сегмента на 2 см (рис. 1).

При рентгенологическом обследовании выявлен лизис таранной кости правой стопы на 2/3 от своего объёма (преимущественно тела таранной кости) со слабо выраженными признаками снижения МПКТ: истончение кортикальной пластинки, крупноячеистая трабекулярная микроструктура, усиленная рентгенопрозрачность (рис. 2, 3).

Было назначено консервативное лечение: иммобилизация функциональной полимерной повязкой, ограничение нагрузки на больную конечность. В процессе иммобилизации на высоте деформации в проекции наружной лодыжки сформировалась нейропатическая язва размером 1×1 см, Wagner 2, которая зажила после прекращения использования иммобилизации и ежедневных перевязок с 10% раствором бетадина. На фоне консервативного лечения через 4 месяца отмечена слабopоложительная динамика: снижение отёчности (+1,5 см) и разницы температуры кожных покровов (до +3°), снижение



Рис. 2. Рентгенограмма в передне-задней проекции до лечения.

Fig. 2. X-ray image in anterior-posterior projection before treatment.

болевого синдрома (до 3 баллов по ВАШ). Однако степень деформации не уменьшилась, и, учитывая нарушение опороспособности, высокий риск образования нейропатических язв и прогрессирования клинических проявлений, было принято решение о необходимости хирургического лечения.

В феврале 2020 г. выполнен пяточно-большеберцовый артродез в положении коррекции. Под спинальной анестезией и гемостатическим турникетом наружным



Рис. 3. Рентгенограмма в боковой проекции до лечения.

Fig. 3. X-ray image before treatment in lateral projection.

L-образным доступом с резекцией наружной лодыжки произведены удаление фрагментов лизированной таранной кости, обработка суставных поверхностей пяточной и большеберцовой кости, фиксация с коррекцией варусной деформации в аппарате Илизарова.

В ближайшем послеоперационном периоде проводились антибиотикопрофилактика — цефтриаксон 1,0 мл 2 р/день в/м, профилактика тромбозов — клексан 0,4 п/к 1 р/день, перевязки со спиртовым раствором хлоргексидина 0,5% до снятия швов (заживление операционной раны первичное). Учитывая высокую вероятность прорезывания тканей спицами и внутрикостными стержнями, развития гнойных осложнений в условиях дистальной нейропатии, рекомендована полная разгрузка оперированной конечности.

Через 5 месяцев после операции отмечались слабо выраженный отёк дистального отдела голени и стопы (+1 см), физиологический пяточно-тибиальный угол (5°). Рентгенологически наблюдались признаки формирования костного пяточно-большеберцового анкилозирования (отсутствие замыкательной пластинки между пяточной и большеберцовой костями, формирование единого кортикального слоя в зоне контакта), однако признаки снижения МПКТ стали более выражены, что, вероятно, дополнительно обусловлено отсутствием нагрузки. Произведён демонтаж аппарата Илизарова, наложена полимерная иммобилизирующая повязка.

Разрешена постепенно возрастающая нагрузка в полимерной иммобилизирующей повязке в течение 4 месяцев после демонтажа аппарата Илизарова, по истечении которых рентгенологически определялись увеличение МПКТ до предоперационных значений, ремоделирование



Рис. 4. Внешний вид конечности через 8 месяцев после операции.

Fig. 4. Appearance of the limb 8 months after surgery.



Рис. 5. Рентгенограммы через 8 месяцев после операции.

Fig. 5. X-ray image 8 months after surgery.

костной ткани — перестройка общей трабекулярной текстуры. Был разрешён переход на ортопедическую обувь с компенсацией укорочения конечности (4 см). К этому времени болевой синдром пациентку не беспокоил, патологическая подвижность отсутствовала, однако сохранялся слабо выраженный отёк дистального сегмента конечности (+1,5 см) (рис. 4, 5). В течение данного периоперационного периода лечения осложнений не отмечалось.

Эпизод второй

В марте 2021 г. пациентка обратилась повторно с жалобами на слабые боли (3 балла по ВАШ), укорочение конечности и наличие деформации на уровне нижней трети голени. Со слов больной, деформация развивалась постепенно в течение 2 месяцев. Факт получения травмы отрицала, за медицинской помощью не обращалась. Отмечалось увеличение массы тела на 7 кг.

Клинически определялись отёчность (+2,5 см), умеренная гипертермия (+2°) и варусная деформация (30°) дистального отдела голени без подвижности на указанном уровне. Перемещалась свободно, без средств дополнительной опоры (рис. 6).

Рентгенологически выявлен спиралевидный перелом метафизарной зоны большеберцовой кости со смещением на стадии консолидации с образованием объёмной костной мозоли. Как и ранее, отмечались признаки снижения МПКТ (рис. 7, 8).

На момент повторного поступления в стационар отмечен дефицит 25-ОН витамина D — 18 нг/мл (30–100) на фоне хронической болезни почек (ХБП), С3а (скорость клубочковой фильтрации — 49 мл/мин/1,73 м²), нормального уровня кальция, скорректированного на альбумин, фосфора, что сопровождалось гиперпаратиреозом (паратиреоидный гормон — 106,8 пг/мл (15–65)). По результатам двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии (денситометрии) МПКТ в проксимальном отделе бедренной



Рис. 6. Внешний вид конечности (вид сзади).

Fig. 6. Appearance of the limb (posterior view).

кости выявлена остеопения до -2 SD по Z-score, до $-1,7$ SD в поясничном отделе позвоночника, остеопороз до $-3,0$ SD в лучевой кости.

При исследовании маркеров костной резорбции и костеобразования выявлено следующее. Остеокальцин — маркер костеобразования (витамин К- и витамин D-зависимый белок, присутствует в костной и зубной ткани, синтезируется остеобластами и одонтобластами, большая часть образующегося остеокальцина

откладывается во внеклеточном матриксе кости, подвергается минерализации в процессе формирования новой костной ткани, оставшаяся часть белка (10–40%) поступает в кровоток) — находился в референсном диапазоне 20,53 нг/мл (14–42), С-концевой телопептид коллагена I типа (наиболее значимый продукт деградации коллагена: в процессе резорбции остеокластами телопептиды высвобождаются в кровоток и выводятся почками) у пациентки с переломом составил 0,438 нг/мл (0,1–0,85).

На основании клинико-анамнестических данных сделан вывод о патологическом характере перелома, рекомендовано хирургическое лечение.

Под спинномозговой анестезией без кровоостанавливающего турникета наложен аппарат Илизарова на 4 модулях. Произведена остеотомия малоберцовой кости из наружного доступа 2,0 см и большеберцовой кости из доступа 4,0 см по передне-внутренней поверхности на высоте деформации в зоне имеющейся костной мозоли. Профилактика осложнений, перевязки операционных ран и режим нагрузки были идентичны проводимым ранее. Заживление ран первичное, осложнений в ближайшем послеоперационном периоде не наблюдалось.

Через 10 дней после операции начата этапная дозированная дистракция в зоне остеотомии на передне-задних стержнях, соответствующих оси большеберцовой кости, 0,75 мм/сут, на медиальном стержне — 1,0 мм/сут. Каждые 2 недели проводилось рентгенографическое исследование для оценки степени коррекции деформации и контроля удлинения. После коррекции углового смещения (рис. 9) скорость дистракции на трёх стержнях была одинаковой — 0,75 мм/сут. Через 8 недель после начала дистракции, когда диастаз между костными фрагментами



Рис. 7. Рентгенограмма в передне-задней проекции.

Fig. 7. X-ray image in anterior-posterior projection.



Рис. 8. Рентгенограмма в боковой проекции.

Fig. 8. X-ray image in lateral projection.

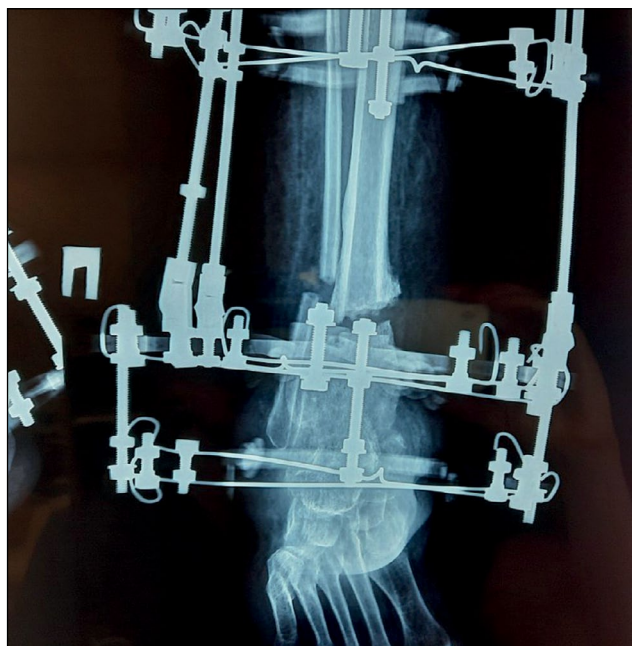


Рис. 9. Рентгенограмма в передне-задней проекции после окончания коррекции варусной деформации.

Fig. 9. X-ray image in anterior-posterior projection after correction of varus deformity.

составлял 40 мм, была достигнута компенсация укорочения и деформации конечности, дистракция была остановлена. К этому времени отмечались начальные признаки формирования костного регенерата, рентгенологические признаки снижения МПКТ оставались на прежнем уровне. Маркеры костного метаболизма не выходили за пределы референса — остеокальцин 34,76 нг/мл (11–43), С-концевой телопептид коллагена I типа — 0,346 нг/мл (0,3–0,57). После коррекции дефицита витамина D (приём колекальциферола 50 000 МЕ еженедельно в течение 8 недель внутрь, далее 2000 МЕ ежедневно внутрь) уровень ПТГ нормализовался и составил 61,7 пг/мл (15–65).

В последующем рентген-контроль осуществлялся ежемесячно. Плотность костного регенерата увеличивалась, однако отмечалась отрицательная динамика МПКТ. Через 4 месяца после операции обнаружены признаки гипотрофии регенерата — его сужение и извитая линия пониженной плотности, расположенная поперечно, ограниченная зоной с повышенной плотностью костной ткани (склероз) на уровне средней части регенерата; это также сопровождалось общими признаками сниженной МПКТ (рис. 10).

В связи с формированием гипотрофии регенерата на фоне стандартного лечения принято решение о добавлении к терапии терипаратида 20 мкг в день подкожно, длительность лечения составила 6 месяцев. Терипаратид — рекомбинантный человеческий паратиреоидный гормон, который является активным фрагментом эндогенного человеческого паратгормона и физиологическое действие которого заключается в стимуляции формирования костной ткани посредством прямого влияния на остеобласты. Несмотря на риск развития осложнений,

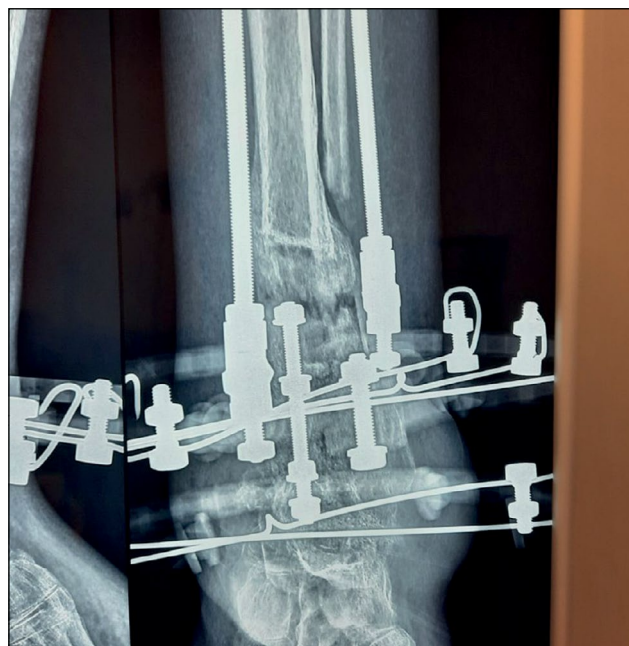


Рис. 10. Рентгенограмма в косой проекции с признаками гипотрофии регенерата.

Fig. 10. X-ray image in oblique projection with signs of regenerate malnutrition.

связанных со сниженной устойчивостью к механическому воздействию на ткани (как следствие нейропатии), и нагноения, разрешена дозированная нагрузка не более 25% от массы тела.

Через 4 месяца лечения терипаратидом отмечено четырёхкратное увеличение маркера костеобразования (остеокальцина) — 133,1 нг/мл (11–43). По результатам денситометрии отмечено увеличение МПКТ на 9,7% в лучевой кости и до 5% — в бедренной кости. По рентгенологическим данным выявлена положительная динамика в отношении формирования костного регенерата: увеличение плотности, однородности, снижение проявлений общего снижения МПКТ. Ещё через 2 месяца отмечалось формирование кортикальной пластинки на всём протяжении регенерата, после чего принято решение о демонтаже аппарата Илизарова, общий срок применения которого составил 10 месяцев (рис. 11).

Дальнейший период реабилитации был аналогичен предыдущему эпизоду: фиксация в полимерной иммобилизирующей повязке на протяжении 4 месяцев с постепенно возрастающей нагрузкой. В последующем, через 12 месяцев после повторной операции, — переход на готовую ортопедическую обувь и стельки без компенсации укорочения, возвращение к полноценной нагрузке (рис. 12).

ОБСУЖДЕНИЕ

В некоторых работах зарубежных авторов описан опыт артродеза заднего отдела стопы и пяточно-большеберцового артродеза при лечении стопы Шарко с удлинением



Рис. 11. Рентгенограммы после демонтажа аппарата Илизарова.
Fig. 11. X-ray images after dismantling of Ilizarov device.



Рис. 12. Внешний вид конечностей через 12 месяцев после операции.
Fig. 12. Appearance of limbs 12 months after surgery.

большеберцовой кости за счёт дистракционного остеогенеза [28–31]. Преимуществами данного метода костной пластики являются абсолютная биосовместимость и физиологичность, широкие возможности по восполнению утраченного объёма кости и коррекции деформации, а также низкая себестоимость.

Применяется остеотомия как в проксимальной части большеберцовой кости, так и в дистальной, в том числе с интрамедуллярным ретроградным остеосинтезом по завершении этапа дистракции в аппарате внешней фиксации [31]. Авторы данной работы считают преимуществом этой методики стимуляцию кровообращения на уровне дистального сегмента нижней конечности (в зоне пяточно-большеберцового артродеза) за счёт остеотомии дистальной зоны большеберцовой кости, при этом, однако, указывая на более длительный срок формирования регенерата в нижней трети голени по сравнению с остеотомией в проксимальной метафизарной зоне — приблизительно 10 и 8 мес, соответственно.

Нам представляется, что выбор зоны остеотомии на уровне дистального отдела большеберцовой кости прогностически менее благоприятен и не оказывает значимого положительного влияния на формирование пяточно-большеберцового анкилоза (исходя из известных особенностей патогенеза стопы Шарко). Выполнение остеотомии на этом уровне может быть продиктовано вынужденными обстоятельствами, как и происходило в описанном клиническом случае (формирование патологического перелома со смещением).

К сожалению, ни в одной из работ не описаны особенности костной регенерации в условиях сниженной МПКТ,

сопутствующего медикаментозного лечения, направленного на компенсацию остеопороза.

Накоплен опыт назначения препаратов для лечения остеопороза у пациентов с различными стадиями нейроостеоартропатии. Имеются данные рандомизированных исследований по применению препаратов группы бисфосфонатов (памидронат и алендронат), которые используются для лечения системного остеопороза. Как известно, механизм действия бисфосфонатов заключается в ингибировании костной резорбции путём замедления превращения предшественников остеокластов в активные остеокласты, а также подавлении активности зрелых остеокластов. В функциональной активности остеокластов большое значение имеют протонный насос и биосинтез клеткой металлопротеиназ, подавление которого бисфосфонатами приводит к неспособности клетки к растворению минералов неорганического и органического матрикса — коллагена и неколлагеновых белков [32].

Данные преклинических исследований о влиянии бисфосфонатов на репаративный остеогенез противоречивы, однако исследователи сходятся во мнении, что бисфосфонаты на ранних этапах регенерации способствуют формированию объёмных регенератов, повышению механической прочности кости, но в последующем приводят к замедлению процесса ремоделирования регенерата [33]. В случае реконструктивного хирургического лечения стопы Шарко с применением металлофиксаторов и/или удлинением костей голени за счёт дистракционного остеогенеза изолированное применение бисфосфонатов может привести к неудовлетворительным результатам.

В рандомизированном исследовании у пациентов со стопой Шарко оценивалась эффективность терипаратида на фоне консервативного лечения — иммобилизации конечности при помощи полимерных повязок или туторов. Ежедневное введение препарата не сокращало время лечения по сравнению с контрольной группой, однако отмечалось повышение маркеров костеобразования, что может свидетельствовать о тенденции к повышению прочностных характеристик костной ткани [34, 35]. Эффективность терипаратида в ходе реконструктивных вмешательств на ДНОАП не исследована.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лечение стопы Шарко ввиду остеопороза сопряжено с рядом осложнений. Сформировавшаяся гипотрофия костного регенерата, потенциально способная осложниться переломом, свидетельствует о нарушении остеогенеза. Фармакологическое воздействие, стимулирующее процесс костеобразования, является важным аспектом, по всей видимости, увеличивающим вероятность успешного ортопедического лечения диабетической нейроостеоартропатии.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли

существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

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

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

Информированное согласие. Авторы получили письменное согласие пациентки на публикацию её медицинских данных (17.11.2023 г.).

ADDITIONAL INFO

Author contribution. All authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Funding source. The authors state that there is no external funding when conducting the research and preparing the publication.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Consent for publication. The patient gave her written consent for publication of her medical data (Nov 17, 2023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wukich D.K., Schaper N.C., Gooday C., et al. Guidelines on the diagnosis and treatment of active Charcot neuro-osteoarthropathy in persons with diabetes mellitus (IWGDF 2023) // *Diabetes Metab Res Rev.* 2024. Vol. 40, № 3. P. e3646. doi: 10.1002/dmrr.3646
2. Дедов И.И., Шестакова М.В., Майоров А.Ю., и др. Алгоритмы специализированной медицинской помощи больным сахарным диабетом // *Сахарный диабет.* 2023. Т. 26, № 2S. С. 1–231. doi: 10.14341/DM13042
3. Bjurholm A., Kreicbergs A., Brodin E., Schultzberg M. Substance P- and CGRP-immunoreactive nerves in bone // *Peptides.* 1988. Vol. 1, № 9. P. 165–171. doi: 10.1016/0196-9781(88)90023-x
4. Bellinger D.L., Lorton D., Felten S.Y., Felten D.L. Innervation of lymphoid organs and implications in development, aging, and autoimmunity // *International journal of immunopharmacology.* 1992. Vol. 3, № 14. P. 329–344. doi: 10.1016/0192-0561(92)90162-e
5. Takeda S., Eleftheriou F., Levasseur R., et al. Leptin regulates bone formation via the sympathetic nervous system // *Cell.* 2002. Vol. 111, № 3. P. 305–317. doi: 10.1016/S0092-8674(02)01049-8
6. Moore R.E., Smith C.K. II, Bailey C.S., Voelkel E.F., Tashjian A.H. Jr. Characterization of beta-adrenergic receptors on rat and human osteoblast-like cells and demonstration that beta-receptor agonists can stimulate bone resorption in organ culture // *Bone Miner.* 1993. Vol. 23, № 3. P. 301–315. doi: 10.1016/S0169-6009(08)80105-5
7. Togari A., Arai M., Mizutani S., et al. Expression of mRNAs for neuropeptide receptors and beta-adrenergic receptors in human osteoblasts and human osteogenic sarcoma cells // *Neurosci Lett.* 1997. Vol. 233, № 2–3. P. 125–128. doi: 10.1016/S0304-3940(97)00649-6
8. Bajayo A., Bar A., Denes A., et al. Skeletal parasympathetic innervation communicates central IL-1 signals regulating bone mass accrual // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* 2012. Vol. 38, № 109. P. 15455–15460. doi: 10.1073/pnas.1206061109
9. Pierroz D.D., Bonnet N., Bianchi E.N., et al. Deletion of β -adrenergic receptor 1, 2, or both leads to different bone phenotypes and response to mechanical stimulation // *J Bone Miner Res.* 2012. Vol. 27, № 6. P. 1252–1262. doi: 10.1002/jbmr.1594
10. Kliemann K., Kneffel M., Bergen I., et al. Quantitative analyses of bone composition in acetylcholine receptor M3R and $\alpha 7$ knockout mice // *Life Sci.* 2012. Vol. 91, № 21–22. P. 997–1002. doi: 10.1016/j.lfs.2012.07.024
11. Eleftheriou F. Impact of the Autonomic Nervous System on the Skeleton // *Physiol Rev.* 2018. Vol. 98, № 3. P. 1083–1112. doi: 10.1152/physrev.00014.2017
12. Jimenez-Andrade J.M., Mantyh P.W. Sensory and sympathetic nerve fibers undergo sprouting and neuroma formation in the painful arthritic joint of geriatric mice // *Arthritis Res Ther.* 2012. Vol. 14, № 3. P. R101. doi: 10.1186/ar3826
13. Ghilardi J.R., Freeman K.T., Jimenez-Andrade J.M., et al. Neuroplasticity of sensory and sympathetic nerve fibers in a mouse model of a painful arthritic joint // *Arthritis Rheum.* 2012. Vol. 64, № 7. P. 2223–2232. doi: 10.1002/art.34385

14. Castañeda-Corral G., Jimenez-Andrade J.M., Bloom A.P., et al. The majority of myelinated and unmyelinated sensory nerve fibers that innervate bone express the tropomyosin receptor kinase A // *Neuroscience*. 2011. Vol. 178. P. 196–207. doi: 10.1016/j.neuroscience.2011.01.039
15. Nencini S., Ringuet M., Kim D.-H., Greenhill C., Ivanusic J.J. GDNF, neurturin, and artemin activate and sensitize bone afferent neurons and contribute to inflammatory bone pain // *J. Neurosci*. 2018. Vol. 38, № 21. P. 4899–4911. doi: 10.1523/JNEUROSCI.0421-18.2018
16. Ghilardi J.R., Freeman K.T., Jimenez-Andrade J.M., et al. Sustained blockade of neurotrophin receptors TrkA, TrkB and TrkC reduces non-malignant skeletal pain but not the maintenance of sensory and sympathetic nerve fibers // *Bone*. 2011. Vol. 48, № 2. P. 389–398. doi: 10.1016/j.bone.2010.09.019
17. McMahon S.B., La Russa F., Bennett D.L.H. Crosstalk between the nociceptive and immune systems in host defence and disease // *Nat Rev Neurosci*. 2015. Vol. 16, № 7. P. 389–402. doi: 10.1038/nrn3946
18. Tao R., Mi B., Hu Y., et al. Hallmarks of peripheral nerve function in bone regeneration // *Bone Res*. 2023. Vol. 11, № 1. P. 6. doi: 10.1038/s41413-022-00240-x
19. Mi J., Xu J., Yao H., et al. Calcitonin gene-related peptide enhances distraction osteogenesis by increasing angiogenesis // *Tissue Eng*. 2021. Vol. 27, № 1–2. P. 87–102. doi: 10.1089/ten.TEA.2020.0009
20. Wang L., Shi X., Zhao R., et al. Calcitonin-gene-related peptide stimulates stromal cell osteogenic differentiation and inhibits RANKL induced NF-kappaB activation, osteoclastogenesis and bone resorption // *Bone*. 2010. Vol. 46, № 5. P. 1369–1379. doi: 10.1016/j.bone.2009.11.029
21. Yuan Y., Jiang Y., Wang B., et al. Deficiency of calcitonin gene-related peptide affects macrophage polarization in osseointegration // *Front. Physiol*. 2020. Vol. 11. P. 733. doi: 10.3389/fphys.2020.00733
22. Pongratz G., Straub R.H. Role of peripheral nerve fibres in acute and chronic inflammation in arthritis // *Nat Rev Rheumatol*. 2013. Vol. 9, № 2. P. 117–126. doi: 10.1038/nrrheum.2012.181
23. Vinik A.I., Nevoret M.-L., Casellini C., Parson H. Diabetic neuropathy // *Endocrinol Metab Clin North Am*. 2013. Vol. 42, № 4. P. 747–787. doi: 10.1016/j.ecl.2013.06.001
24. Van Maanen M.A., Vervoordeldonk M.J., Tak P.P. The cholinergic anti-inflammatory pathway: towards innovative treatment of rheumatoid arthritis // *Nat Rev Rheumatol*. 2009. Vol. 5, № 4. P. 229–232. doi: 10.1038/nrrheum.2009.31
25. Ha J., Hester T., Foley R., et al. Charcot foot reconstruction outcomes: A systematic review // *J Clin Orthop Trauma*. 2020. Vol. 11, № 3. P. 357–368. doi: 10.1016/j.jcot.2020.03.025
26. Kwaadu K.Y. Charcot Reconstruction: Understanding and Treating the Deformed Charcot Neuropathic Arthropathic Foot // *Clin Podiatr Med Surg*. 2020. Vol. 37, № 2. P. 247–261. doi: 10.1016/j.cpm.2019.12.002
27. Young R.J. The Organisation of Diabetic Foot Care: Evidence-Based Recommendations. The Foot in Diabetes. John Wiley & Sons, Ltd, 2006. P. 398–403. doi: 10.1002/0470029374.ch36
28. Siddiqui N.A., Millonig K.J., Mayer B.E., et al. Increased Arthrodesis Rates in Charcot Neuroarthropathy Utilizing Distal Tibial Distraction Osteogenesis Principles // *Foot & Ankle Specialist*. 2022. Vol. 15, № 4. P. 394–408. doi: 10.1177/19386400221087822
29. Tellisi N., Fragomen A.T., Ilizarov S., Rozbruch S.R. Limb Salvage Reconstruction of the Ankle with Fusion and Simultaneous Tibial Lengthening Using the Ilizarov/Taylor Spatial Frame // *HSS Journal*. 2007. Vol. 4, № 1. P. 32–42. doi: 10.1007/s11420-007-9073-0
30. Sakurakichi K., Tsuchiya H., Uehara K., et al. Ankle arthrodesis combined with tibial lengthening using the Ilizarov apparatus // *Journal of Orthopaedic Science*. 2003. Vol. 8, № 1. P. 20–25. doi: 10.1007/s007760300003
31. Millonig K.J., Siddiqui N.A. Tibial Lengthening and Intramedullary Nail Fixation for Hindfoot Charcot Neuroarthropathy // *Clin Podiatr Med Surg*. 2022. Vol. 39, № 4. P. 659–673. doi: 10.1016/j.cpm.2022.05.011
32. Galli M., Pitocco D., Ruotolo V., et al. The effect of alendronate in acute charcot neuroarthropathy of the foot could be mediated by the decrease of IGF-1 // *Orthop Procs*. 2009. Vol. 91-B, suppl. P. 161–161. doi: 10.1302/0301-620X.91BSUPP_I.0910161c
33. Shina Y., Engebretsen L., Iwasa J., et al. Use of bisphosphonates for the treatment of stress fractures in athletes // *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2011. Vol. 17, № 5. P. 542–550. doi: 10.1007/s00167-008-0673-0
34. Rastogi A., Hajela A., Prakash M., et al. Teriparatide (recombinant human parathyroid hormone) increases foot bone remodeling in diabetic chronic Charcot neuroarthropathy: a randomized double-blind placebo-controlled study // *J Diabetes*. 2019. Vol. 11, № 9. P. 703–710. doi: 10.1111/1753-0407.12902
35. Petrova N.L., Donaldson N.K., Bates M., et al. Effect of Recombinant Human Parathyroid Hormone (1-84) on Resolution of Active Charcot Neuro-osteoarthropathy in Diabetes: A Randomized, Double-Blind, Placebo-Controlled Study // *Diabetes Care*. 2021. Vol. 44, № 7. P. 1613–1621. doi: 10.2337/dc21-0008

REFERENCES

1. Wukich DK, Schaper NC, Gooday C, et al. Guidelines on the diagnosis and treatment of active Charcot neuro-osteoarthropathy in persons with diabetes mellitus (IWGDF 2023). *Diabetes Metab Res Rev*. 2024;40(3):e3646. doi: 10.1002/dmrr.3646
2. Dedov II, Shestakova MV, Mayorov AYU, et al. Algorithms of specialized medical care for patients with diabetes mellitus. *Diabetes mellitus*. 2023;26(2S):1–231. (In Russ). doi: 10.14341/DM13042
3. Bjurholm A, Kreicbergs A, Brodin E, Schultzberg M. Substance P- and CGRP-immunoreactive nerves in bone. *Peptides*. 1988;1(9):165–171. doi: 10.1016/0196-9781(88)90023-x
4. Bellinger DL, Lorton D, Felten SY, Felten DL. Innervation of lymphoid organs and implications in development, aging, and autoimmunity. *International journal of immunopharmacology*. 1992;3(14):329–344. doi: 10.1016/0192-0561(92)90162-e
5. Takeda S, Elefteriou F, Levasseur R, et al. Leptin regulates bone formation via the sympathetic nervous system. *Cell*. 2002;111(3):305–317. doi: 10.1016/S0092-8674(02)01049-8
6. Moore RE, Smith CK II, Bailey CS, Voelkel EF, Tashjian AH Jr. Characterization of beta-adrenergic receptors on rat and human osteoblast-like cells and demonstration that beta-receptor agonists can stimulate bone resorption in organ culture. *Bone Miner*. 1993;23(3):301–315. doi: 10.1016/S0169-6009(08)80105-5
7. Togari A, Arai M, Mizutani S, et al. Expression of mRNAs for neuropeptide receptors and beta-adrenergic receptors in human

- osteoblasts and human osteogenic sarcoma cells. *Neurosci Lett*. 1997;233(2–3):125–128. doi: 10.1016/S0304-3940(97)00649-6
8. Bajayo A, Bar A, Denes A, et al. Skeletal parasympathetic innervation communicates central IL-1 signals regulating bone mass accrual. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2012;38(109):15455–15460. doi: 10.1073/pnas.1206061109
9. Pierroz DD, Bonnet N, Bianchi EN, et al. Deletion of β -adrenergic receptor 1, 2, or both leads to different bone phenotypes and response to mechanical stimulation. *J Bone Miner Res*. 2012;27(6):1252–1262. doi: 10.1002/jbmr.1594
10. Kliemann K, Kneffel M, Bergen I, et al. Quantitative analyses of bone composition in acetylcholine receptor M3R and $\alpha 7$ knockout mice. *Life Sci*. 2012;91(21–22):997–1002. doi: 10.1016/j.lfs.2012.07.024
11. Eleftheriou F. Impact of the Autonomic Nervous System on the Skeleton. *Physiol Rev*. 2018;98(3):1083–1112. doi: 10.1152/physrev.00014.2017
12. Jimenez-Andrade JM, Mantyh PW. Sensory and sympathetic nerve fibers undergo sprouting and neuroma formation in the painful arthritic joint of geriatric mice. *Arthritis Res Ther*. 2012;14(3):R101. doi: 10.1186/ar3826
13. Ghilardi JR, Freeman KT, Jimenez-Andrade JM, et al. Neuroplasticity of sensory and sympathetic nerve fibers in a mouse model of a painful arthritic joint. *Arthritis Rheum*. 2012;64(7):2223–2232. doi: 10.1002/art.34385
14. Castañeda-Corral G, Jimenez-Andrade JM, Bloom AP, et al. The majority of myelinated and unmyelinated sensory nerve fibers that innervate bone express the tropomyosin receptor kinase A. *Neuroscience*. 2011;178:196–207. doi: 10.1016/j.neuroscience.2011.01.039
15. Nencini S, Ringuet M, Kim D-H, Greenhill C, Ivanusic JJ. GDNF, neurturin, and artemin activate and sensitize bone afferent neurons and contribute to inflammatory bone pain. *J Neurosci*. 2018;38(21):4899–4911. doi: 10.1523/JNEUROSCI.0421-18.2018
16. Ghilardi JR, Freeman KT, Jimenez-Andrade JM, et al. Sustained blockade of neurotrophin receptors TrkA, TrkB and TrkC reduces non-malignant skeletal pain but not the maintenance of sensory and sympathetic nerve fibers. *Bone*. 2011;48(2):389–398. doi: 10.1016/j.bone.2010.09.019
17. McMahon SB, La Russa F, Bennett DLH. Crosstalk between the nociceptive and immune systems in host defence and disease. *Nat Rev Neurosci*. 2015;16(7):389–402. doi: 10.1038/nrn3946
18. Tao R, Mi B, Hu Y, et al. Hallmarks of peripheral nerve function in bone regeneration. *Bone Res*. 2023;11(1):6. doi: 10.1038/s41413-022-00240-x
19. Mi J, Xu J, Yao H, et al. Calcitonin gene-related peptide enhances distraction osteogenesis by increasing angiogenesis. *Tissue Eng*. 2021;27(1–2):87–102. doi: 10.1089/ten.TEA.2020.0009
20. Wang L, Shi X, Zhao R, et al. Calcitonin-gene-related peptide stimulates stromal cell osteogenic differentiation and inhibits RANKL induced NF- κ B activation, osteoclastogenesis and bone resorption. *Bone*. 2010;46(5):1369–1379. doi: 10.1016/j.bone.2009.11.029
21. Yuan Y, Jiang Y, Wang B, et al. Deficiency of calcitonin gene-related peptide affects macrophage polarization in osseointegration. *Front Physiol*. 2020;11:733. doi: 10.3389/fphys.2020.00733
22. Pongratz G, Straub RH. Role of peripheral nerve fibres in acute and chronic inflammation in arthritis. *Nat Rev Rheumatol*. 2013;9(2):117–126. doi: 10.1038/nrrheum.2012.181
23. Vinik AI, Nevoret M-L, Casellini C, Parson H. Diabetic neuropathy. *Endocrinol Metab Clin North Am*. 2013;42(4):747–787. doi: 10.1016/j.ecl.2013.06.001
24. Van Maanen MA, Vervordeldonk MJ, Tak PP. The cholinergic anti-inflammatory pathway: towards innovative treatment of rheumatoid arthritis. *Nat Rev Rheumatol*. 2009;5(4):229–232. doi: 10.1038/nrrheum.2009.31
25. Ha J, Hester T, Foley R, et al. Charcot foot reconstruction outcomes: A systematic review. *J Clin Orthop Trauma*. 2020;11(3):357–368. doi: 10.1016/j.jcot.2020.03.025
26. Kwaadu KY. Charcot Reconstruction: Understanding and Treating the Deformed Charcot Neuropathic Arthropathic Foot. *Clin Podiatr Med Surg*. 2020;37(2):247–261. doi: 10.1016/j.cpm.2019.12.002
27. Young RJ. *The Organisation of Diabetic Foot Care: Evidence-Based Recommendations. The Foot in Diabetes*. John Wiley & Sons, Ltd; 2006. P. 398–403. doi: 10.1002/0470029374.ch36
28. Siddiqui NA, Millonig KJ, Mayer BE, et al. Increased Arthrodesis Rates in Charcot Neuroarthropathy Utilizing Distal Tibial Distraction Osteogenesis Principles. *Foot & Ankle Specialist*. 2022;15(4):394–408. doi: 10.1177/19386400221087822
29. Tellisi N, Fragomen AT, Ilizarov S, Rozbruch SR. Limb Salvage Reconstruction of the Ankle with Fusion and Simultaneous Tibial Lengthening Using the Ilizarov/Taylor Spatial Frame. *HSS Journal*. 2007;4(1):32–42. doi: 10.1007/s11420-007-9073-0
30. Sakurakichi K, Tsuchiya H, Uehara K, et al. Ankle arthrodesis combined with tibial lengthening using the Ilizarov apparatus. *Journal of Orthopaedic Science*. 2003;8(1):20–25. doi: 10.1007/s007760300003
31. Millonig KJ, Siddiqui NA. Tibial Lengthening and Intramedullary Nail Fixation for Hindfoot Charcot Neuroarthropathy. *Clin Podiatr Med Surg*. 2022;39(4):659–673. doi: 10.1016/j.cpm.2022.05.011
32. Galli M, Pitocco D, Ruotolo V, et al. The effect of alendronate in acute charcot neuroarthropathy of the foot could be mediated by the decrease of IGF-1. *Orthop Procs*. 2009;91-B(suppl.):161–161. doi: 10.1302/0301-620X.91BSUPP_I.0910161c
33. Shina Y, Engebretsen L, Iwasa J, et al. Use of bisphosphonates for the treatment of stress fractures in athletes. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2011;17(5):542–550. doi: 10.1007/s00167-008-0673-0
34. Rastogi A, Hajela A, Prakash M, et al. Teriparatide (recombinant human parathyroid hormone) increases foot bone remodeling in diabetic chronic Charcot neuroarthropathy: a randomized double-blind placebo-controlled study. *J Diabetes*. 2019;11(9):703–710. doi: 10.1111/1753-0407.12902
35. Petrova NL, Donaldson NK, Bates M, et al. Effect of Recombinant Human Parathyroid Hormone (1-84) on Resolution of Active Charcot Neuro-osteoarthropathy in Diabetes: A Randomized, Double-Blind, Placebo-Controlled Study. *Diabetes Care*. 2021;44(7):1613–1621. doi: 10.2337/dc21-0008

ОБ АВТОРАХ

*** Бардюгов Пётр Сергеевич**, канд. мед. наук;
адрес: Россия, 117292, Москва, ул. Дм. Ульянова, д. 11;
ORCID: 0000-0002-5771-0973;
eLibrary SPIN: 7590-0446;
e-mail: petrbardiugov@gmail.com

Артёмова Екатерина Викторовна;
ORCID: 0000-0002-2232-4765;
eLibrary SPIN: 4649-0765;
e-mail: artemova.ekaterina@endocrincentr.ru

Паршиков Михаил Викторович, д-р мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0003-4201-4577;
eLibrary SPIN: 5838-4366;
e-mail: parshikovmikhail@gmail.com

Ярыгин Николай Владимирович, д-р мед. наук, профессор,
член-корр. РАН;
ORCID: 0000-0003-4322-6985;
eLibrary SPIN: 3258-4436;
e-mail: dom1971@yandex.ru

AUTHORS' INFO

*** Petr S. Bardiugov**, MD, Cand. Sci. (Medicine);
address: 11 Dm. Ulyanova str., 117292 Moscow, Russia;
ORCID: 0000-0002-5771-0973;
eLibrary SPIN: 7590-0446;
e-mail: petrbardiugov@gmail.com

Ekaterina V. Artemova, MD;
ORCID: 0000-0002-2232-4765;
eLibrary SPIN: 4649-0765;
e-mail: artemova.ekaterina@endocrincentr.ru

Mikhail V. Parshikov, MD, Dr. Sci. (Medicine), professor;
ORCID: 0000-0003-4201-4577;
eLibrary SPIN: 5838-4366;
e-mail: parshikovmikhail@gmail.com

Nikolay V. Yarygin, MD, Dr. Sci. (Medicine), professor,
corresponding member of the Russian Academy of Sciences;
ORCID: 0000-0003-4322-6985;
eLibrary SPIN: 3258-4436;
e-mail: dom1971@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto634755>

Оперативное лечение двустороннего спондилолиза L5 позвонка у профессиональной гимнастки с использованием индивидуальной конструкции

М.С. Ветрилэ, А.А. Кулешов, С.Н. Макаров, И.Н. Лисянский, В.Р. Захарин, А.И. Кокорев, Н.А. Аганесов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Спондилолиз является одной из наиболее частых причин боли в пояснице у детей и подростков, профессионально занимающихся спортом. Отмечается, что спондилолиз чаще наблюдается при занятиях видами спорта, которые связаны с повторной осевой нагрузкой и/или гиперэкстензией поясничного отдела позвоночника с ротацией. В большинстве случаев лечение спондилолиза, включая случаи его возникновения у профессиональных спортсменов, — консервативное. Оперативное лечение показано только при неэффективности консервативной терапии или при прогрессировании симптоматики. Одной из наиболее частых методик оперативного лечения спондилолиза является восстановление целостности дужки с использованием различных металлоконструкций. Применение аддитивных методов для изготовления индивидуальных имплантатов в настоящее время позволяет изготавливать персонализированные имплантаты, обладающие рядом преимуществ. В статье описывается первый опыт использования индивидуального имплантата для оперативного лечения спондилолиза и приводится краткий обзор литературы.

Описание клинического случая. Представлен клинический случай лечения 16-летней пациентки, профессионально занимающейся спортивной гимнастикой. Приведено описание анамнеза, клинических проявлений и специальных методов диагностики. Описаны предоперационное планирование, проектирование индивидуального имплантата, проведение операции и отдалённые результаты лечения. В кратком литературном обзоре представлены результаты консервативного лечения, основные показания и методы оперативной терапии спондилолиза, обоснована возможность применения индивидуально изготовленного имплантата для его оперативного лечения.

Заключение. Для оперативного лечения спондилолиза L5 позвонка и восстановления целостности дужки позвонка без фиксации позвоночно-двигательного сегмента возможно использование индивидуально изготовленного имплантата. Применение кастомизированных имплантатов ожидается позволит улучшить результаты при сочетании спондилолиза с аномалиями и индивидуальными особенностями костных структур позвонка, в том числе у пациентов, профессионально занимающихся спортом.

Ключевые слова: спондилолиз; спондилолиз у спортсменов; реконструкция дуги позвонка; аддитивные технологии; персонализированные имплантаты; индивидуальный имплантат.

Как цитировать:

Ветрилэ М.С., Кулешов А.А., Макаров С.Н., Лисянский И.Н., Захарин В.Р., Кокорев А.И., Аганесов Н.А. Оперативное лечение двустороннего спондилолиза L5 позвонка у профессиональной гимнастки с использованием индивидуальной конструкции // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2024. Т. 31, № 3. С. 395–405. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto634755>

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto634755>

Surgical treatment of L5 spondylolysis in an athlete using custom-made implant

Marchel S. Vetrile, Aleksandr A. Kuleshov, Sergey N. Makarov, Igor N. Lisyansky, Vitaliy R. Zakharin, Alexey I. Kokorev, Nikolay A. Aganesov

N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Spondylolysis is one of the most common causes of lower back pain in children and adolescents who are professionally involved in sports. It is noted that spondylolysis is observed more often when practicing a number of sports that are associated with repeated axial load and/or hyperextension of the lumbar spine with rotation. In most cases, the treatment of spondylolysis, including cases of its occurrence in professional athletes, is conservative. Surgical treatment is indicated only if conservative treatment is ineffective or if symptoms progress. One of the most common methods of surgical treatment of spondylolysis is to restore the integrity of the arch using various metal structures. The use of additive methods for the manufacture of individual implants currently allows the manufacture of personalized implants with a number of advantages. The article describes the first experience of using an individual implant for surgical treatment of spondylolysis and provides a brief review of the literature.

CLINICAL CASE DESCRIPTION: A clinical case is presented involving the treatment of a 16-year-old female patient who is a professional gymnast. The report includes a description of the patient's medical history, clinical manifestations, and specialized diagnostic methods. The preoperative planning, design of a custom implant, the surgical procedure, and long-term treatment outcomes are detailed. A brief literature review highlights the results of conservative treatment, the main indications and methods of surgical therapy for spondylolysis, and justifies the use of a custom-made implant for its surgical treatment.

CONCLUSION: For the surgical treatment of L5 spondylolysis and restoration of vertebral arch integrity without limiting motion on L5-S1 level, the use of a custom-made implant is possible. The use of customized implants may improve outcomes in cases where spondylolysis is combined with abnormalities and individual characteristics of the vertebral bone structures, including the patient's sports activity.

Keywords: spondylolysis; spondylolysis in athletes; direct spondylolysis repair; additive technologies; personalized implant; custom-made implant.

To cite this article:

Vetrile MS, Kuleshov AA, Makarov SN, Lisyansky IN, Zakharin VR, Kokorev AI, Aganesov NA. Surgical treatment of L5 spondylolysis in an athlete using custom-made implant. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2024;31(3):395–405. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto634755>

ВВЕДЕНИЕ

Спондилолиз — дефект (щель) межсуставного сегмента дуги позвонка, который может наблюдаться с одной или двух сторон и является одной из частых причин боли в пояснице у детей и подростков, профессионально занимающихся спортом [1].

Чаще всего лечение спондилолиза, включая случаи его возникновения у профессиональных спортсменов, — консервативное. В случаях, когда спондилолиз проявляется болевым синдромом, рекомендуются ограничение физических нагрузок, ношение корсета в течение 6–12 недель, физиотерапевтическое лечение, курс нестероидных противовоспалительных препаратов. По данным литературы, до 98% случаев консервативного лечения приводят к купированию симптоматики и возвращению к спортивной активности [2]. Сращение зоны спондилолизного дефекта при консервативном лечении отмечают в 50–75% случаев [2, 3].

Оперативное лечение показано только при неэффективности консервативного лечения или при прогрессировании симптоматики. Одной из наиболее частых методик оперативного лечения спондилолиза является восстановление целостности дужки, называемое в англоязычной литературе *direct repair* [4]. Операция проводится с использованием транспедикулярных винтов, вводимых в L5 позвонок, в сочетании с субламинарно установленными крючками или U-образно изогнутого стержня, проведённого под остистым отростком.

Применение аддитивных методов для изготовления индивидуальных имплантатов в настоящее время позволяет изготавливать персонализированные имплантаты, обладающие рядом преимуществ. В статье описывается первый опыт применения индивидуального имплантата для оперативного лечения спондилолиза.

ОПИСАНИЕ КЛИНИЧЕСКОГО СЛУЧАЯ

Пациентка Т., 16 лет, была госпитализирована в 2021 году в ФГБУ «НМИЦ ТО им. Н.Н. Приорова» Минздрава России с жалобами на боль в пояснично-крестцовой области, значительно усиливающуюся при физической нагрузке.

Из анамнеза заболевания: пациентка занимается спортивной гимнастикой с 4-летнего возраста, на момент госпитализации имела звание кандидата в мастера спорта, являлась членом сборной команды области, призёром Чемпионата России по спортивной гимнастике и др. После интенсивных тренировок и соревнований за полгода до госпитализации начала беспокоить боль в области пояснично-крестцового отдела позвоночника, усиливавшаяся при физических нагрузках. Выраженный болевой синдром вынудил пациентку остановить тренировочный процесс. Проводимая в течение 3 месяцев консервативная терапия (физиотерапевтическое лечение, лечебная гимнастика)

и ограничение физических нагрузок привели к уменьшению интенсивности болевого синдрома. Тем не менее наклоны туловища вперёд, назад, ротационные движения вызывали боль, что не позволило восстановить прежний уровень физической активности. Амбулаторно по месту жительства пациентке выполнены исследования методом магнитно-резонансной (МРТ) и компьютерной томографии (КТ), выставлен диагноз «спондилолиз L5 позвонка». Спустя 3 месяца после дебюта заболевания пациентка обратилась с вышеуказанными жалобами в НМИЦ ТО им. Н.Н. Приорова. При осмотре выявлено, что сгибание и разгибание туловища сопровождаются болевыми ощущениями в области поясницы, паравертебральные мышцы умеренно напряжены. При пальпации отмечается болезненность на уровне паравертебральных мышц в пояснично-крестцовом отделе. В неврологическом статусе — отсутствие очаговой симптоматики, симптомы натяжения отрицательные, парезов, патологических рефлексов, нарушения чувствительности и функции тазовых органов нет. По данным опросников *Ped's QL* — 76 баллов, *ODI* — 20%, *VAS* — 5 баллов.

Пациентке проведена лучевая диагностика. По данным рентгенографии позвоночника подтверждён спондилолиз L5 позвонка. Параметры сагиттального баланса туловища, по данным постуральной рентгенографии, без значимых отклонений от нормы ($PI=60^\circ$, $PT=14^\circ$, $SS=46^\circ$, $LL=65^\circ$, $TK=38,5^\circ$) (рис. 1а).

По данным мультиспиральной КТ пояснично-крестцового отдела позвоночника определяется билатеральный спондилолизный дефект межсуставной части дужки L5 позвонка (рис. 1б, с, д). По данным МРТ пояснично-крестцового отдела позвоночника, признаки стеноза позвоночного канала отсутствуют, гидрофильность межпозвоночных дисков не нарушена (рис. 1е).

На основании данных клинического осмотра и дополнительных исследований установлен клинический диагноз «спондилолиз L5 позвонка» (M43.0 по МКБ-10).

Учитывая сохраняющийся болевой синдром, ограничивающий физическую, в том числе спортивную, активность, неэффективность консервативной терапии и данные лучевой диагностики, пациентке рекомендовано оперативное лечение. Принято решение выполнить восстановление целостности дужки L5 позвонка при помощи индивидуально изготовленной конструкции.

Совместно с инженерами ООО «Конмет» выполнена компьютерная реконструкция сегмента L5-S1 на основании данных КТ. Изготовлена полноразмерная стереолитографическая модель сегмента L5-S1. На основании представленного проекта индивидуальной конструкции инженерами выполнено проектирование конструкции для восстановления целостности дужки L5 позвонка. Конструкция состояла из фигурной пластины, соответствующей анатомическому рельефу дорсальной поверхности дужки L5 позвонка и нижней поверхности остистого отростка L5 позвонка. Также на пластине

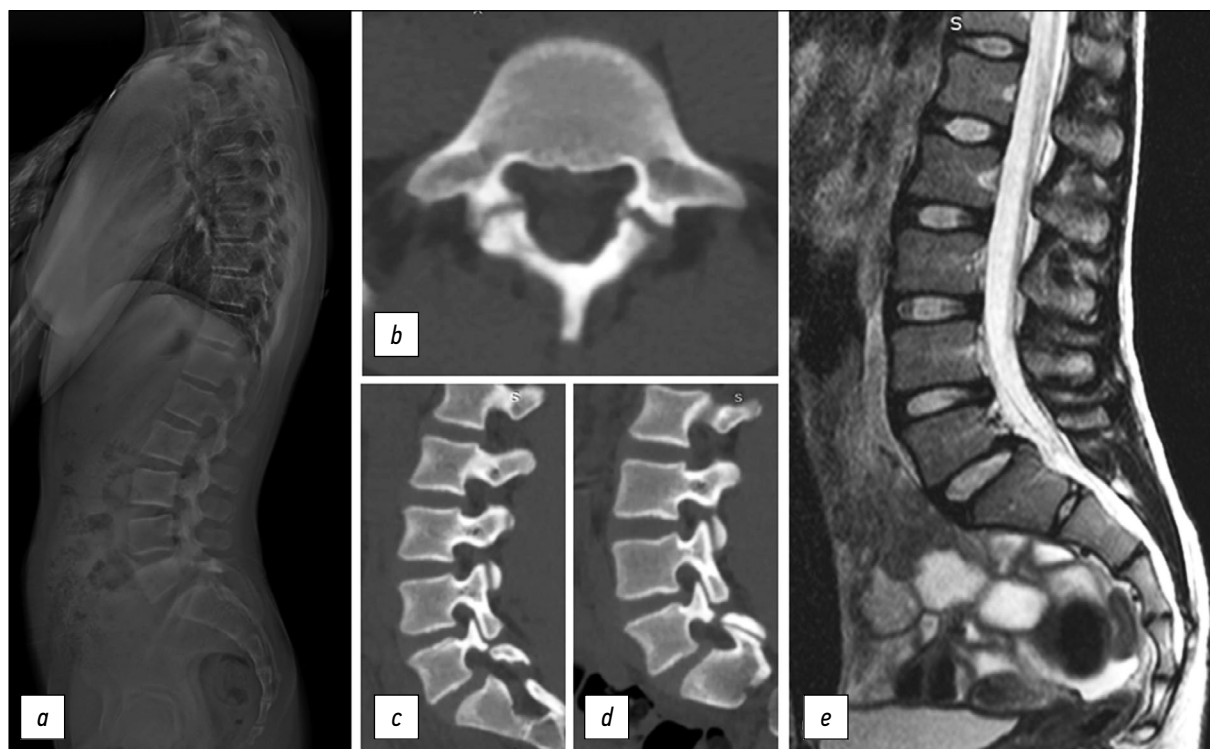


Рис. 1. Данные лучевой диагностики: *a* — постуральная рентгенография позвоночника в боковой проекции, *b, c, d* — компьютерная томография, *e* — магнитно-резонансная томография.

Fig. 1. Radiological imaging: *a* — postural radiography of the spine in lateral projection, *b, c, d* — computed tomography, *e* — magnetic resonance imaging.

спроектировано два крючкообразных выступа для субламинарной фиксации, по наружным краям пластины с обеих сторон — отверстия в проекции точек ввода транспедикулярных винтов. Также спроектировано два транспедикулярных винта с головкой под торцевой ключ (рис. 2). Спроектированная конструкция изготовлена

с использованием аддитивных технологий ООО «Кон-мет» из сплава Ti-6Al-4V ELI (рис. 3).

Ход операции: в положении пациентки на животе под интубационным наркозом выполнен разрез кожи и подкожно-жировой клетчатки по линии остистых отростков от L5 до S1. Произведено скелетирование дуги L5

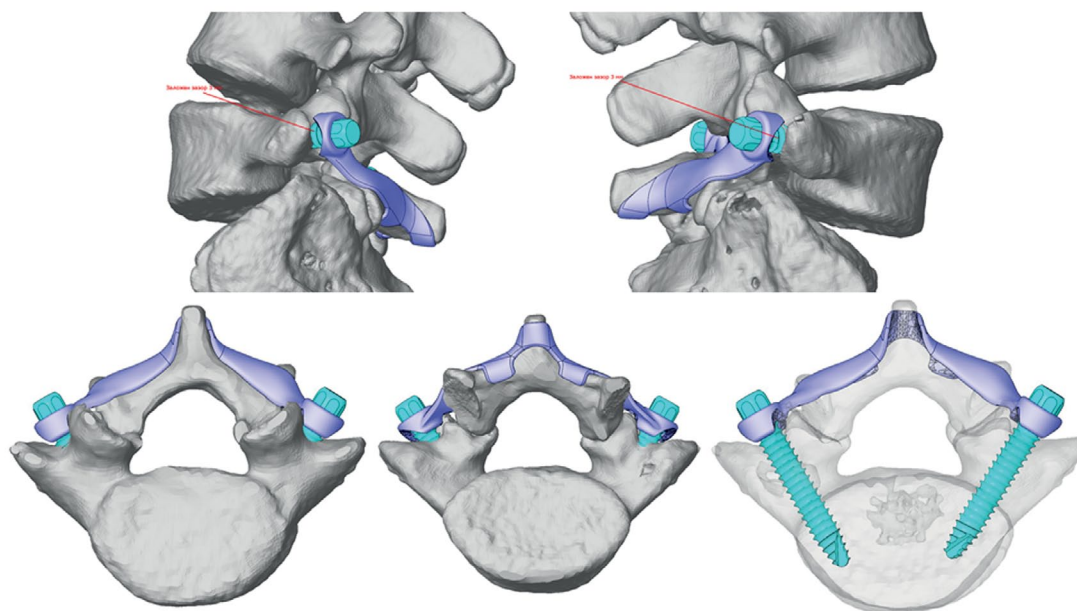


Рис. 2. Проект индивидуальной конструкции.

Fig. 2. The project of an individual implant.



Рис. 3. Полноразмерная 3D-модель пояснично-крестцового сегмента и индивидуальная металлоконструкция.

Fig. 3. The full-size 3D model of the lumbosacral segment and custom-made implant.

с сохранением надостистой связки. Выполнен гемостаз. С помощью высокооборотистой дрели и костных ложек произведён кюретаж зоны спондилолиза с обеих сторон (рис. 4а, б). С помощью ламинотомов удалена межостистая связка L5-S1. Изогнутым распатором выполнено

скелетирование дужки в месте осуществления субламинарной фиксации. Установлена индивидуальная пластина на скелетированную дужку L5 позвонка, причём пластина проведена между остистыми отростками соответственно L5 и S1 позвонков. Чрескожно под контролем

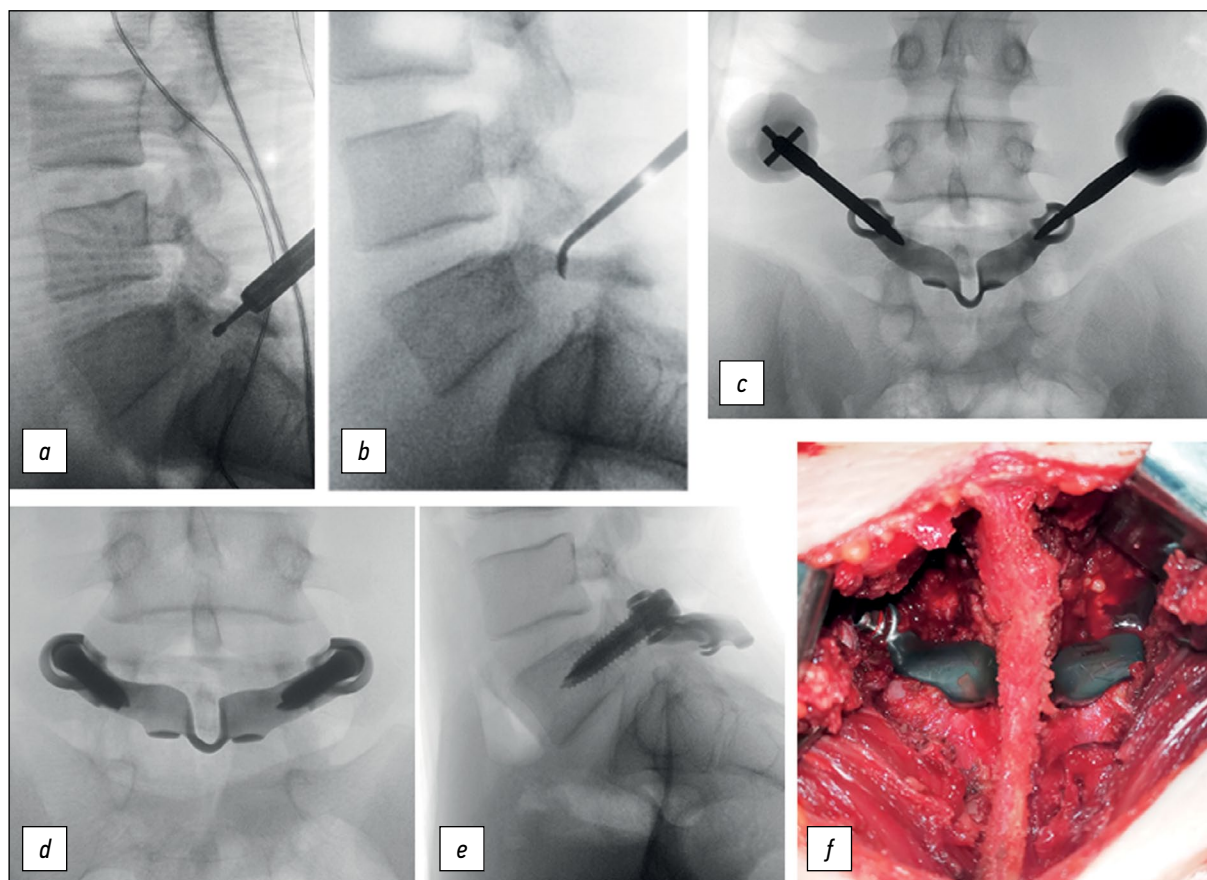


Рис. 4. Флюороскопический контроль во время операции и внешний вид установленной конструкции: а, б — обработка зоны спондилолиза, с — установка транспедикулярных винтов, d, e — ЭОП-контроль положения конструкции, f — внешний вид установленной конструкции, сохранённая надостистая связка.

Fig. 4. Fluoroscopic control during surgery and the appearance of the installed implant: а, b — preparing of the spondylolysis zone, с — pedicular screws isertion, d, e — fluoroscopic control, f — appearance of the installed custom-made imlant with preserved supraspinous ligament.

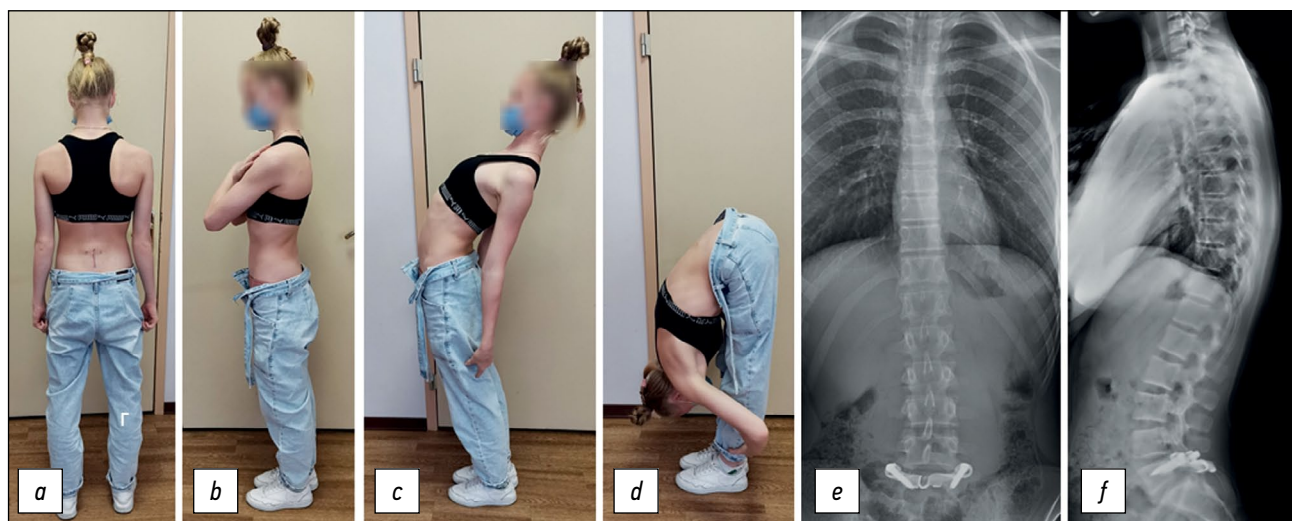


Рис. 5. Отдалённый результат через 3 месяца после операции: *a, b, c, d* — внешний вид и объём движений, *e, f* — постуральная рентгенография позвоночника, положение конструкции правильное, фиксация зоны спондилолиза стабильная, сагиттальный баланс не нарушен.

Fig. 5. 3 months follow-up: *a, b, c, d* — appearance and range of motion, *e, f* — postural X-ray of the spine, implant position is correct, fixation is stable, sagittal balance is normal.

с применением электронно-оптического преобразователя (ЭОП) и визуального контроля через отверстия в конструкции в корни дуг L5 позвонка с обеих сторон проводятся транспедикулярные винты (рис. 4с). При вкручивании винтов за счёт конструкции их головок пластина плотно прижата к дужке позвонка и фиксирована. Проведён рентген-контроль при помощи ЭОП в двух проекциях, подтверждено правильное положение имплантатов (рис. 4d, e, f). Рана промыта раствором антисептика, послойно ушита, выполнен внутрикожный косметический шов. Кровопотеря составила 50 мл. Послеоперационное течение без особенностей. Пациентка вертикализирована в первые сутки после операции. Отмечала умеренные боли в области послеоперационной раны, которые купированы приёмом нестероидных противовоспалительных препаратов в течение 3 дней. Выполнено контрольное КТ-исследование, подтверждены правильное положение имплантатов и фиксация зоны спондилолиза. На пятые сутки после операции пациентка выписана под амбулаторное наблюдение. Рана зажила первичным натяжением.

Через 1 месяц осуществлён контрольный осмотр. Пациентка уже приступила к умеренным физическим нагрузкам в гимнастическом зале, однако отмечала незначительный болевой синдром в поясничном отделе (2 балла по VAS). По данным рентгенографии, положение металлоконструкции корректное. Движения в поясничном отделе позвоночника в полном объёме (рис. 5).

Через 3 месяца с момента операции пациентка возобновила тренировочный процесс в полном объёме и приняла участие в соревнованиях. Болевых ощущений в поясничном отделе позвоночника не отмечает (Ped's QL — 98 баллов, ODI — 10%, VAS — 0 баллов). Через 6 месяцев после операции прошла все квалификационные испытания и получила звание «мастер спорта»,

выступала на Чемпионате России и Кубке России по спортивной гимнастике.

На контрольных КТ и постуральных рентгенограммах через 2 года — положение конструкции правильное, фиксация зоны спондилолиза стабильная, по данным КТ определяются лишь незначительные участки консолидации зон спондилолиза, полное сращение с закрытием спондилолизных дефектов отсутствует (рис. 6).

ОБСУЖДЕНИЕ

Спондилолиз является одной из наиболее частых причин боли в области поясницы у спортсменов [1, 5]. Отмечается, что спондилолиз чаще наблюдается при занятиях видами спорта, которые связаны с повторной осевой нагрузкой и/или гиперэкстензией поясничного отдела позвоночника с ротацией. Эти виды спорта включают гимнастику, танцы, футбол, плавание баттерфляем и брассом и др. [6, 7]. У подростков, занимающихся спортом, выше риск развития спондилолиза, при этом в среднем диагноз устанавливается в возрасте 15 лет [2, 8].

Диагностика спондилолиза, как правило, не представляет трудностей: при наличии жалоб на боли в пояснице выполняется рентгенография пояснично-крестцового отдела позвоночника с функциональными пробами (сгибание и разгибание туловища), на которой в ряде случаев можно визуализировать щель межсуставной части дужки. Более информативными для выявления спондилолизного дефекта являются рентгенограммы, выполненные в трёхчетвертной проекции. Безусловно, на современном этапе для верификации диагноза выполняются МРТ- и КТ-исследования. По данным КТ достоверно визуализируется дефект межсуставной части дужки и его характер. По данным МРТ определяется степень дегенеративных

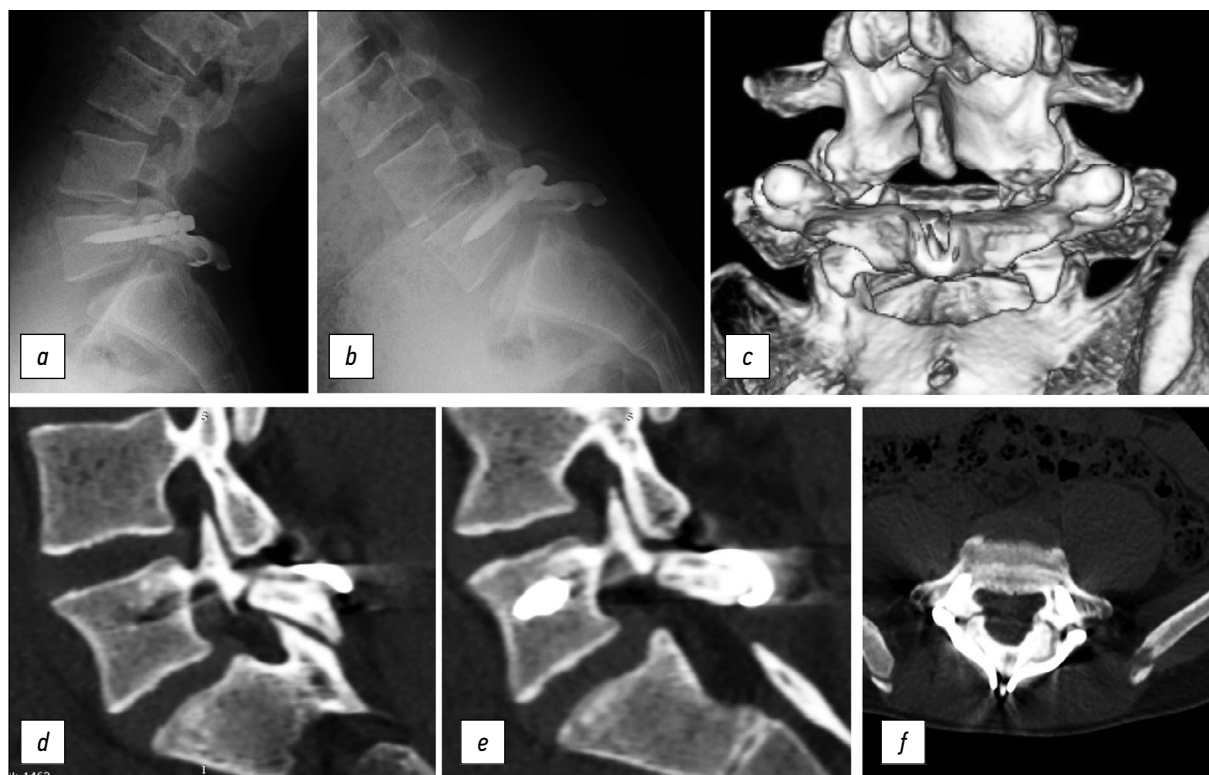


Рис. 6. Отдалённый результат через 2 года (положение конструкции правильное, фиксация зоны спондилолиза стабильная): *a, b* — рентгенография при сгибании и разгибании туловища — движения в сегменте L5-S1 сохранены, *c* — объёмная реконструкция компьютерной томографии, *d, e, f* — признаки лишь частичного сращения зон спондилолиза.

Fig. 6. 2 years follow-up (implant position is correct, fixation is stable): *a, b* — radiography flexion and extension X-ray, motion on L5-S1 level is preserved, *c* — CT reconstruction, *d, e, f* — absents of complete fusion of spondylolysis defects, fixation is stable.

изменений диска, дугоотростчатых суставов. Кроме того, по данным КТ и МРТ можно установить ряд факторов, имеющих прогностическое значение в успехе консервативного лечения. К. Fujii с соавт. определили три стадии формирования спондилолизного дефекта по КТ — раннюю, прогрессирующую и завершающуюся [9]. К. Sairyo с соавт. пришли к выводу, что ранняя стадия спондилолизного дефекта по данным КТ в сочетании с повышением уровня сигнала в корне дужки при T2-взвешенном режиме МРТ является благоприятным предиктором костного сращения дефекта у детей при консервативном лечении [10].

При спондилолизе, сопровождающемся болевыми ощущениями, в том числе у спортсменов, в первую очередь проводят консервативное лечение. Рекомендуются ограничение физических нагрузок, ношение корсета в течение 6–12 недель, физиотерапевтическое лечение, курс нестероидных противовоспалительных препаратов. Функциональное восстановительное лечение спортсменов и артистов балета включает три этапа: купирование болевого синдрома, восстановление опороспособности и стабильности позвоночника, восстановление специальных двигательных навыков. Кроме этого, при нарушениях кальций-фосфорного обмена у больных со спондилолизом назначаются препараты, содержащие активную форму витамина D, и препараты кальция [11].

По данным некоторых авторов, консервативное лечение приводит к купированию симптоматики и возвращению к спортивной активности до 98% случаев [2]. Сращение зоны спондилолизного дефекта при консервативном лечении отмечают в 50–76% случаев [2, 12].

Для профессиональных спортсменов затруднительно ограничивать физические нагрузки длительный период времени, нарушение ортопедического режима ведёт к снижению эффективности консервативной терапии [11]. При сохраняющемся дефекте межсуставной части дужки болевой синдром может возвращаться во время тренировочного процесса, что ставит вопрос об оперативном лечении.

Основным методом оперативного лечения спондилолиза является так называемая операция по прямому восстановлению целостности дужки (*direct repair of the defect in the pars interarticularis*). Были предложены различные методы операции: J.H. Scott в 1968 г. предложил фиксировать зону спондилолиза с помощью серкляжной проволоки [13], J.E. Buck в 1970 г. описал метод фиксации зоны спондилолиза с помощью канюлированных винтов, проведённых через дужку позвонка [14], E. Morscher в 1984 г. разработал устройство, представляющее собой винт, на который накручивался и фиксировался с помощью гайки субламинарный крючок [15].

В настоящее время при спондилолизе чаще всего применяют фиксацию транспедикулярными винтами

и U-образным стержнем, заведённым за остистый отросток [12], а также транспедикулярными винтами в сочетании с субламинарными крючками [13]. Кроме того, предложен ряд модификаций данных методик с использованием малоинвазивных доступов [16–21].

Важным преимуществом этих методик является возможность выполнить компрессию в зоне спондилолистного дефекта и сохранить подвижность в позвоночно-двигательном сегменте.

Тем не менее во всех применяемых на сегодняшний день методиках используются не специально изготовленные имплантаты, а серийные элементы металлоконструкций, предназначенных для выполнения сегментарной фиксации позвоночника при различных заболеваниях и повреждениях. Стержень для использования необходимо значительно изгибать, а субламинарные крючки не во всех случаях удобно и возможно установить.

Нередким при спондилолизе является наличие диспластических изменений задних элементов позвонков — *spina bifida* [22, 23]. Это, в свою очередь, может вызывать сложности при установке элементов конструкции.

Имеющийся в НМИЦ ТО им. Н.Н. Приорова опыт применения индивидуально изготовленных конструкций для оперативного лечения деформаций позвоночника [24] позволил предложить использование данного подхода и для лечения спондилолиза. Преимуществом такого решения, на наш взгляд, является полное соответствие имплантата анатомическим структурам позвонка, какие бы индивидуальные особенности или аномалии развития при этом ни присутствовали. Компьютерное моделирование позволяет выполнить проект конструкции, виртуализацию её установки во время операции. Также немаловажной является возросшая доступность использования аддитивных технологий для изготовления кастомизированных имплантатов. Публикаций о применении индивидуально изготовленных имплантатов для оперативного лечения спондилолиза в литературе нет. Приоритет и новизна предложенного способа лечения с использованием индивидуально изготовленного имплантата подтверждены соответствующим патентом Российской Федерации [25].

Отсутствие полного закрытия зон спондилолиза через 2 года по данным КТ у представленной пациентки не повлияло на клинический результат: даже при высоких спортивных нагрузках боль не беспокоит, признаков нестабильности нет. Это свидетельствует, на наш взгляд, о достаточной стабильности произведённой фиксации, необходимость удаления металлоконструкции отсутствует.

Таким образом, предложенный метод и применение индивидуально изготовленного имплантата позволили успешно провести операцию и добиться полного функционального восстановления и возвращения пациентки к тренировочному процессу и участию в соревнованиях.

Предложенная методика предусматривает вначале установку индивидуальной фиксирующей пластины и последующее проведение винтов через отверстия

в пластине, что сопряжено с необходимостью плотно удерживать пластину на дужке для сохранения ориентиров и точности проведения транспедикулярного винта. В дальнейшем планируется рассмотреть модификацию конструкции предложенного имплантата с возможностью установки в первую очередь серийных транспедикулярных винтов и установки индивидуальной пластины на винты с последующей контракцией и фиксацией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оперативное лечение спондилолиза L5 позвонка и восстановление целостности дужки позвонка без фиксации позвоночно-двигательного сегмента возможно выполнять с использованием индивидуально изготовленного имплантата. Потенциально применение кастомизированных имплантатов позволит улучшить результаты при сочетании спондилолиза с аномалиями и индивидуальными особенностями костных структур позвонка. В последующем возможно рассмотреть модификацию конструкции кастомизированного имплантата для более удобной и безопасной установки и возможности проводить редукцию позвонка при сочетании спондилолиза со спондилолистезом I–II степени.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

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

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

Информированное согласие. Авторы получили письменное согласие пациентки на публикацию её медицинских данных (31.06.2024 г.).

ADDITIONAL INFO

Author contribution. All authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Funding source. The authors state that there is no external funding when conducting the research and preparing the publication.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Consent for publication. The patient gave their written consent for publication of her medical data (June 31, 2024).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wall J., Cook D.L., Meehan W.P. 3rd, Wilson F. Adolescent athlete low back pain diagnoses, characteristics, and management: A retrospective chart review // *J Sci Med Sport*. 2024. Vol. 27, № 9. P. 618–623. doi: 10.1016/j.jsams.2024.05.004
2. Choi J.H., Ochoa J.K., Lubinus A., et al. Management of lumbar spondylolysis in the adolescent athlete: a review of over 200 cases // *Spine J*. 2022. Vol. 22, № 10. P. 1628–1633. doi: 10.1016/j.spinee.2022.04.011
3. Gamada H., Tatsumura M., Okuwaki S., et al. Characteristics of lumbar spondylolysis: L5 versus non-L5 // *BMC Musculoskelet Disord*. 2024. Vol. 25, № 1. P. 55. doi: 10.1186/s12891-024-07190-x
4. McDonald B.T., Hanna A., Lucas J.A. Spondylolysis. [Updated 2023 Aug 7]. B: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2024. Режим доступа: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK513333/>
5. Mortazavi J., Zebardast J., Mirzashahi B. Low Back Pain in Athletes // *Asian J Sports Med*. 2015. Vol. 6, № 2. P. e24718. doi: 10.5812/asjms.6(2)2015.24718
6. Миронов С.П., Бурмакова Г.М., Орлецкий А.К., Цыкунов М.Б., Андреев С.В. Пояснично-крестцовые боли у спортсменов и артистов балета: спондилолиз и спондилолистез // *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова*. 2019. № 2. С. 5–13. doi: 10.17116/vto20190215
7. Patel D.R., Kinsella E. Evaluation and management of lower back pain in young athletes // *Transl Pediatr*. 2017. Vol. 6, № 3. P. 225–235. doi: 10.21037/tp.2017.06.01
8. Hasler C.C. Back pain during growth // *Swiss Med Wkly*. 2013. Vol. 143. P. w13714. doi: 10.4414/smw.2013.13714
9. Fujii K., Katoh S., Sairyo K., Ikata T., Yasui N. Union of defects in the pars interarticularis of the lumbar spine in children and adolescents. The radiological outcome after conservative treatment // *J Bone Joint Surg Br*. 2004. Vol. 86, № 2. P. 225–31. doi: 10.1302/0301-620x.86b2.14339
10. Sairyo K., Sakai T., Yasui N. Conservative treatment of lumbar spondylolysis in childhood and adolescence: the radiological signs which predict healing // *J Bone Joint Surg Br*. 2009. Vol. 91, № 2. P. 206–9. doi: 10.1302/0301-620x.91B2.21256
11. Миронов С.П., Цыкунов М.Б., Бурмакова Г.М., Андреев С.В. Пояснично-крестцовые боли у спортсменов и артистов балета: спондилолиз и спондилолистез. Консервативное лечение // *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова*. 2020. Т. 27, № 1. С. 11–18. doi: <https://doi.org/10.17816/vto202027111-18>
12. Tatsumura M., Gamada H., Okuwaki S., et al. Union evaluation of lumbar spondylolysis using MRI and CT in adolescents treated conservatively // *J Orthop Sci*. 2022. Vol. 27, № 2. P. 317–322. doi: 10.1016/j.jos.2021.01.002
13. Nicol R.O., Scott J.H. Lytic spondylolysis. Repair by wiring // *Spine (Phila Pa 1976)*. 1986. Vol. 11, № 10. P. 1027–30. doi: 10.1097/00007632-198612000-00011
14. Buck J.E. Direct repair of the defect in spondylolisthesis. Preliminary report // *J Bone Joint Surg Br*. 1970. Vol. 52, № 3. P. 432–7.
15. Morscher E., Gerber B., Fasel J. Surgical treatment of spondylolisthesis by bone grafting and direct stabilization of spondylolysis by means of a hook screw // *Arch Orthop Trauma Surg* (1978). 1984. Vol. 103, № 3. P. 175–8. doi: 10.1007/BF00435550
16. Gillet P., Petit M. Direct repair of spondylolysis without spondylolisthesis, using a rod-screw construct and bone grafting of the pars defect // *Spine (Phila Pa 1976)*. 1999. Vol. 24, № 12. P. 1252–6. doi: 10.1097/00007632-199906150-00014
17. Tokuhashi Y., Matsuzaki H. Repair of defects in spondylolysis by segmental pedicular screw hook fixation. A preliminary report // *Spine (Phila Pa 1976)*. 1996. Vol. 21, № 17. P. 2041–5. doi: 10.1097/00007632-199609010-00023
18. Gillis C.C., Eichholz K., Thoman W.J., Fessler R.G. A minimally invasive approach to defects of the pars interarticularis: Restoring function in competitive athletes // *Clin Neurol Neurosurg*. 2015. Vol. 139. P. 29–34. doi: 10.1016/j.clineuro.2015.08.024
19. Ghobrial G.M., Crandall K.M., Lau A., Williams S.K., Levi A.D. Minimally invasive direct pars repair with cannulated screws and recombinant human bone morphogenetic protein: Case series and review of the literature // *Neurosurg Focus*. 2017. Vol. 43, № 2. P. E6. doi: 10.3171/2017.5.FOCUS17153
20. Syundukov A.R., Nikolayev N.S., Kuzmina V.A., et al. Minimally invasive reconstruction of vertebral arch in spondylolisthesis in children and adolescents // *Sovremennye Tehnologii v Medicine*. 2021. Vol. 13, № 5. P. 62–8. doi: 10.17691/stm2021.13.5.08
21. Tatsumura M., Okuwaki S., Gamada H., et al. A Novel Technique for Pars Defect Direct Repair with a Modified Smiley Face Rod for Spondylolysis and Isthmic Spondylolisthesis // *Spine Surg Relat Res*. 2023. Vol. 7, № 4. P. 396–401. doi: 10.22603/ssrr.2023-0021
22. Urrutia J., Zamora T., Cuellar J. Does the Prevalence of Spondylolysis and Spina Bifida Occulta Observed in Pediatric Patients Remain Stable in Adults? // *Clin Spine Surg*. 2017. Vol. 30, № 8. P. E1117–E1121. doi: 10.1097/BSD.0000000000000209
23. Fredrickson B.E., Baker D., McHolick W.J., Yuan H.A., Lubicky J.P. The natural history of spondylolysis and spondylolisthesis // *J Bone Joint Surg Am*. 1984. Vol. 66, № 5. P. 699–707.
24. Кулешов А.А., Ветрилэ М.С., Шкарубо А.Н., и др. Аддитивные технологии в хирургии деформаций позвоночника // *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова*. 2018. № 3–4. С. 19–29. doi: 10.17116/vto201803-04119
25. Патент РФ на изобретение № 2798704 C1/ 23.06.23. МПК А61В 17/70. Кулешов А.А., Ветрилэ М.С., Захарин В.Р., и др. Способ хирургической фиксации зоны двухстороннего спондилолиза L5 позвонка с использованием металлического фиксирующего устройства. Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/RU2798704C1/ru> EDN: IVKFIL

REFERENCES

1. Wall J, Cook DL, Meehan WP 3rd, Wilson F. Adolescent athlete low back pain diagnoses, characteristics, and management: A retrospective chart review. *J Sci Med Sport*. 2024;27(9):618–623. doi: 10.1016/j.jsams.2024.05.004
2. Choi JH, Ochoa JK, Lubinus A, et al. Management of lumbar spondylolysis in the adolescent athlete: a review of over 200 cases. *Spine J*. 2022;22(10):1628–1633. doi: 10.1016/j.spinee.2022.04.011

3. Gamada H, Tatsumura M, Okuwaki S, et al. Characteristics of lumbar spondylolysis: L5 versus non-L5. *BMC Musculoskelet Disord*. 2024;25(1):55. doi: 10.1186/s12891-024-07190-x
4. McDonald BT, Hanna A, Lucas JA. Spondylolysis. [Updated 2023 Aug 7]. In: *StatPearls* [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK513333/>
5. Mortazavi J, Zebardast J, Mirzashahi B. Low Back Pain in Athletes. *Asian J Sports Med*. 2015;6(2):e24718. doi: 10.5812/asjsm.6(2)2015.24718
6. Mironov SP, Burmakova GM, Orletsky AK, Tsykunov MB, Andreev SV. Lumbosacral pain in athletes and ballet dancers: spondylolysis and spondylolisthesis. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2019;(2):5–13. doi: 10.17116/vto20190215
7. Patel DR, Kinsella E. Evaluation and management of lower back pain in young athletes. *Transl Pediatr*. 2017;6(3):225–235. doi: 10.21037/tp.2017.06.01
8. Hasler CC. Back pain during growth. *Swiss Med Wkly*. 2013;143:w13714. doi: 10.4414/smw.2013.13714
9. Fujii K, Katoh S, Sairoy K, Ikata T, Yasui N. Union of defects in the pars interarticularis of the lumbar spine in children and adolescents. The radiological outcome after conservative treatment. *J Bone Joint Surg Br*. 2004;86(2):225–31. doi: 10.1302/0301-620x.86b2.14339
10. Sairoy K, Sakai T, Yasui N. Conservative treatment of lumbar spondylolysis in childhood and adolescence: the radiological signs which predict healing. *J Bone Joint Surg Br*. 2009;91(2):206–9. doi: 10.1302/0301-620X.91B2.1256
11. Mironov SP, Cykunov MB, Burmakova GM, Andreev SV. Lumbosacral pain in athletes and ballet dancers: spondylolysis and spondylolisthesis. Conservative treatment. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2020;27(1):11–18. doi: 10.17816/vto202027111-18
12. Tatsumura M, Gamada H, Okuwaki S, et al. Union evaluation of lumbar spondylolysis using MRI and CT in adolescents treated conservatively. *J Orthop Sci*. 2022;27(2):317–322. doi: 10.1016/j.jos.2021.01.002
13. Nicol RO, Scott JH. Lytic spondylolysis. Repair by wiring. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1986;11(10):1027–30. doi: 10.1097/00007632-198612000-00011
14. Buck JE. Direct repair of the defect in spondylolisthesis. Preliminary report. *J Bone Joint Surg Br*. 1970;52(3):432–7.
15. Morscher E, Gerber B, Fasel J. Surgical treatment of spondylolisthesis by bone grafting and direct stabilization of spondylolysis by means of a hook screw. *Arch Orthop Trauma Surg* (1978). 1984;103(3):175–8. doi: 10.1007/BF00435550
16. Gillet P, Petit M. Direct repair of spondylolysis without spondylolisthesis, using a rod-screw construct and bone grafting of the pars defect. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1999;24(12):1252–6. doi: 10.1097/00007632-199906150-00014
17. Tokuhashi Y, Matsuzaki H. Repair of defects in spondylolysis by segmental pedicular screw hook fixation. A preliminary report. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1996;21(17):2041–5. doi: 10.1097/00007632-199609010-00023
18. Gillis CC, Eichholz K, Thoman WJ, Fessler RG. A minimally invasive approach to defects of the pars interarticularis: Restoring function in competitive athletes. *Clin Neurol Neurosurg*. 2015;139:29–34. doi: 10.1016/j.clineuro.2015.08.024
19. Ghobrial GM, Crandall KM, Lau A, Williams SK, Levi AD. Minimally invasive direct pars repair with cannulated screws and recombinant human bone morphogenetic protein: Case series and review of the literature. *Neurosurg Focus*. 2017;43(2):E6. doi: 10.3171/2017.5.FOCUS17153
20. Syundukov AR, Nikolayev NS, Kuzmina VA, et al. Minimally invasive reconstruction of vertebral arch in spondylolisthesis in children and adolescents. *Sovremennye Tehnologii v Medicine*. 2021;13(5):62–8. doi: 10.17691/stm2021.13.5.08
21. Tatsumura M, Okuwaki S, Gamada H, et al. A Novel Technique for Pars Defect Direct Repair with a Modified Smiley Face Rod for Spondylolysis and Isthmic Spondylolisthesis. *Spine Surg Relat Res*. 2023;7(4):396–401. doi: 10.22603/ssr.2023-0021
22. Urrutia J, Zamora T, Cuellar J. Does the Prevalence of Spondylolysis and Spina Bifida Occulta Observed in Pediatric Patients Remain Stable in Adults? *Clin Spine Surg*. 2017;30(8):E1117–E1121. doi: 10.1097/BSD.0000000000000209
23. Fredrickson BE, Baker D, McHolick WJ, Yuan HA, Lubicky JP. The natural history of spondylolysis and spondylolisthesis. *J Bone Joint Surg Am*. 1984;66(5):699–707.
24. Kuleshov AA, Vetrile MS, Shkarubo AN, et al. Additive technologies in surgical treatment of spinal deformities. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2018;(3–4):19–29. doi: 10.17116/vto201803-04119
25. Patent RUS № 2798704 C1/ 06/23/23. IPC A61B 17/70. Kuleshov AA, Vetrile MS, Zakharin VR, et al. A method for surgical fixation of the zone of bilateral spondylolysis of the L5 vertebra using a metal fixing device. Available from: <https://patents.google.com/patent/RU2798704C1/ru> (In Russ.) EDN: IVKFIL

ОБ АВТОРАХ

* **Ветрилэ Марчел Степанович**, канд. мед. наук;
адрес: Россия, 127299, Москва, ул. Приорова, 10;
ORCID: 0000-0001-6689-5220;
eLibrary SPIN: 9690-5117;
e-mail: vetrilams@mail.ru

Кулешов Александр Алексеевич, д-р мед. наук;
ORCID: 0000-0002-9526-8274;
eLibrary SPIN: 7052-0220;
e-mail: cito-spine@mail.ru

AUTHORS' INFO

* **Marchel S. Vetrile**, MD, Cand. Sci. (Medicine);
address: 10 Priorov str., 127299 Moscow, Russia;
ORCID: 0000-0001-6689-5220;
eLibrary SPIN: 9690-5117;
e-mail: vetrilams@mail.ru

Alexander A. Kuleshov, MD, Dr. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0002-9526-8274;
eLibrary SPIN: 7052-0220;
e-mail: cito-spine@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Макаров Сергей Николаевич, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0003-0406-1997;
eLibrary SPIN: 2767-2429;
e-mail: moscow.makarov@gmail.com

Лисянский Игорь Николаевич, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0002-2479-4381;
eLibrary SPIN: 9845-1251;
e-mail: lisigornik@list.ru

Захарин Виталий Романович;
ORCID: 0000-0003-1553-2782;
eLibrary SPIN: 2931-0703;
e-mail: zakhvit@gmail.com

Кокорев Алексей Иванович, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0002-5829-6372;
eLibrary SPIN: 7734-8476;
e-mail: leo-strelec@mail.ru

Аганесов Николай Александрович;
ORCID: 0000-0001-5383-6862;
eLibrary SPIN: 1805-5790;
e-mail: kolyanzer@yandex.ru

Sergey N. Makarov, MD, Cand. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0003-0406-1997;
eLibrary SPIN: 2767-2429;
e-mail: moscow.makarov@gmail.com

Igor N. Lisyansky, MD, Cand. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0002-2479-4381;
eLibrary SPIN: 9845-1251;
e-mail: lisigornik@list.ru

Vitaly R. Zakharin, MD;
ORCID: 0000-0003-1553-2782;
eLibrary SPIN: 2931-0703;
e-mail: zakhvit@gmail.com

Alexey I. Kokorev, MD, Cand. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0002-5829-6372;
eLibrary SPIN: 7734-8476;
e-mail: leo-strelec@mail.ru

Nikolay A. Aganesov, MD;
ORCID: 0000-0001-5383-6862;
eLibrary SPIN: 1805-5790;
e-mail: kolyanzer@yandex.ru

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto623878>

Коллапс костного аутотрансплантата. Клиническое наблюдение осложнения и одного из вариантов решения данной проблемы

В.В. Чеботарёв, А.А. Очкуренко, Г.В. Коробушкин

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Вопрос замещения полнослойных остеохондральных дефектов таранной кости крайне актуален. Костная аутопластика хорошо зарекомендовала себя при лечении пациентов с данной патологией, но у этой методики имеются и недостатки. Имплантация двух и более костных аутотрансплантатов при больших остеохондральных дефектах может сопровождаться снижением прочности контакта донорской кости с реципиентной окружающей костью, приводит к формированию кист и нестабильности аутотрансплантата.

Описание клинического случая. Вашему вниманию представлено два клинических случая. В одном наблюдении выполнена хондропластика таранной кости с мозаичной установкой костных аутотрансплантатов. Через 6 месяцев по поводу нестабильности костного аутотрансплантата, сопровождающейся болевым синдромом, выполнен артродез голеностопного сустава. Через 6 месяцев после операции болевой синдром по шкале VAS уменьшился с 7/10 до 3/10, по AOFAS составил 74/100 баллов, по FAAM — 70/84 баллов. Во втором клиническом наблюдении выполнена модифицированная мозаичная хондропластика с применением AMIC-технологии, с провизорной фиксацией спицей костных аутотрансплантатов. Через 6 месяцев по данным КТ определялась остеоинтеграция костных аутотрансплантатов без образования субхондральных кист. По данным опросников также прослеживалась положительная динамика: показатель VAS уменьшился с 7/10 до 1/10, AOFAS улучшился с 70/100 до 90/100 баллов, FAAM — с 72/100 до 83/84 баллов.

Заключение. Ведущим критерием хорошего результата костной аутопластики является стабильность аутотрансплантата, что достигается достаточной длиной трансплантата и прочностью фиксации. Предложенный способ провизорной фиксации костного аутотрансплантата спицей при мозаичной хондропластике является воспроизводимым, эффективным и малозатратным методом, позволяющим сохранять стабильность костного аутотрансплантата, его press-fit контакт с таранной костью.

Ключевые слова: костный аутотрансплантат; мозаичная хондропластика; остеохондральный дефект таранной кости; нестабильность аутотрансплантата.

Как цитировать:

Чеботарёв В.В., Очкуренко А.А., Коробушкин Г.В. Коллапс костного аутотрансплантата. Клиническое наблюдение осложнения и одного из вариантов решения данной проблемы // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2024. Т. 31, № 3. С. 407–414. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto623878>

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto623878>

Bone autograft collapse. Clinical case of the complication and clinical case of the solutions to this problem

Vitaliy V. Chebotarev, Aleksandr A. Ochkurenko, Gleb V. Korobushkin

N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The issue of full-thickness osteochondral defect replacement in the talus is highly relevant. Bone autografting has proven effective in treating patients with this pathology, but the method has its drawbacks. The implantation of two or more bone autografts in large osteochondral defects may result in reduced contact strength between the donor bone and the recipient's surrounding bone, leading to the formation of cysts and autograft instability.

CLINICAL CASES DESCRIPTION: We present two clinical cases for your consideration. In the first case, chondroplasty of the talus was performed with mosaic implantation of bone autografts. Six months later, due to instability of the bone autograft accompanied by pain, ankle joint arthrodesis was performed. Six months postoperatively, the pain score on the VAS scale decreased from 7/10 to 3/10, the AOFAS score was 74/100, and the FAAM score was 70/84. In the second clinical case, a modified mosaic chondroplasty using AMIC technology with provisional fixation of bone autografts with a pin was performed. Six months later, CT scans showed osteointegration of the bone autografts without the formation of subchondral cysts. The questionnaires also demonstrated positive dynamics: the VAS score decreased from 7/10 to 1/10, the AOFAS score improved from 70/100 to 90/100, and the FAAM score increased from 72/100 to 83/84.

CONCLUSION: The leading criterion for a successful bone autograft procedure is the stability of the autograft, which is achieved through adequate graft length and secure fixation. The proposed method of provisional fixation of the bone autograft with a pin during mosaic chondroplasty is a reproducible, effective, and cost-efficient technique that ensures the stability of the bone autograft and maintains its press-fit contact with the talus.

Keywords: bone autotransplantat; mosaic bone plastic; osteochondral defect of talar dome; collapse bone autograft.

To cite this article:

Chebotarev VV, Ochkurenko AA, Korobushkin GV. Bone autograft collapse. Clinical case of the complication and clinical case of the solutions to this problem. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2024;31(3):407–414. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto623878>

ВВЕДЕНИЕ

Костная аутопластика является одним из самых распространённых методов замещения полнослойных остеохондральных дефектов таранной кости [1]. Она зарекомендовала себя как широко воспроизводимая методика с хорошими и отличными результатами. Показаниями к применению костной аутопластики являются остеохондральный дефект площадью более 1 см², субхондральные кисты, а также повторные операции после изолированной стимуляции зоны остеохондрального дефекта. Методика костной аутопластики включает удаление поражённого хряща и субхондральной кости с последующей установкой в подготовленное ложе костного аутооттрансплантата [2, 3]. Несмотря на распространённость и популярность костной аутопластики остеохондральных дефектов таранной кости, образование субхондральных кист является негативным эффектом, который может оказать влияние на долгосрочные результаты [4]. Субхондральные кисты после хондропластики могут быть связаны с особенностями имплантации костного аутооттрансплантата, такими как длина трансплантата, особенность установки (контакт «донорская кость/таранная кость»), между костной тканью аутооттрансплантата и таранной костью может образовываться щель, что под воздействием синовиальной жидкости приводит к последующему формированию субхондральных кист. При краткосрочных и среднесрочных наблюдениях данное осложнение протекает бессимптомно, однако не может оставаться без внимания [5]. Одним из ведущих факторов, влияющих на состоятельность костного аутооттрансплантата и стабильность коллагеновой матрицы, является стабильность костного аутооттрансплантата, которая достигается только с помощью его надёжной фиксации и достаточного press-fit эффекта. Нестабильный костный аутооттрансплантат сопровождается болевым синдромом, нарушением опорной функции стопы и ограничением движений в голеностопном суставе. Данное осложнение встречается достаточно редко, однако имеет крайне негативные последствия, требующие последующих ревизионных операций.

В работе представлена модификация уже известной методики мозаичной аутохондропластики, позволяющая создать более надёжную фиксацию костного аутооттрансплантата, что направлено на снижение риска формирования субхондральных кист и несостоятельности аутооттрансплантата (патент РФ № RU2802399 «Способ мозаичной аутохондропластики полнослойных костно-хрящевых дефектов суставной поверхности таранной кости у пациентов с хондропатией и асептическим некрозом»).

Нами представлены клинический случай с несостоятельностью костного аутооттрансплантата и клинический случай с применением модифицированной техники мозаичной костной аутохондропластики таранной кости.

ОПИСАНИЕ КЛИНИЧЕСКИХ СЛУЧАЕВ

Клинический случай 1

Пациент А., 58 лет, имеющий ожирение, боли беспокоят с 2018 года, после подворота стопы, с 2021 года болевой синдром усилился, консервативная терапия без существенного положительного эффекта. По данным опросников, показатель AOFAS составил 59 баллов, FAAM — 66 баллов, VAS — 7 баллов. Пациент обследован рентгенологически, выполнено МРТ-исследование голеностопного сустава. По данным МРТ определялся остеохондральный дефект в латеральном отделе купола таранной кости (рис. 1), по поводу чего пациенту из латерального доступа выполнена мозаичная костная аутопластика с применением коллагеновой мембраны (рис. 2).

Через 4 месяца после операции пациент стал отмечать усиление болевого синдрома. По данным КТ

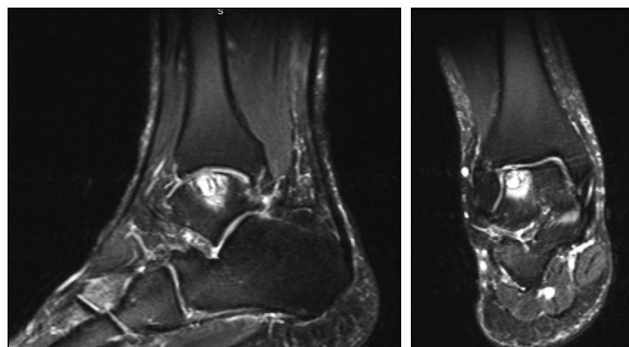


Рис. 1. Пациент А., 58 лет, данные обследований перед операцией. МРТ голеностопного сустава (T2-режим). Полнослойный остеохондральный дефект с зоной отёка костного мозга размерами 16,2 мм (продольно), 10,9 мм (поперечно), 11 мм (глубина).

Fig. 1. Patient A., 58 years old, before surgery. MRI of the ankle joint (T2 mode). A full-layered osteochondral defect, with a zone of bone marrow edema, measuring 16.2 mm (longitudinally), 10.9 mm (transversely), 11 mm (depth).



Рис. 2. Пациент А., 58 лет, рентгенологический контроль после выполнения хондропластики.

Fig. 2. Patient A., 58 years old, X-ray after chondroplasty.



Рис. 3. Пациент А., 58 лет, КТ-картина через 6 месяцев после операции. Определялись нестабильность костных столбиков, лизис вокруг костных аутоотрансплантатов.

Fig. 3. Patient A., 58 years old, CT control 6 months after surgery. Bone grafts collapse, lysis around bone autografts was determined.

через 6 месяцев после операции определялась нестабильность костного аутоотрансплантата (рис. 3). В связи с персистирующим болевым синдромом, снижением двигательной активности и отсутствием значительной положительной динамики по данным опросников в рамках ревизионной операции, направленной на купирование болевого синдрома, пациенту был выполнен артродез голеностопного сустава (рис. 4).

Через 8 месяцев после операции пациент отмечал положительную динамику, болевой синдром по шкале VAS с 7/10 уменьшился до 3/10, показатель AOFAS составил 74/100 баллов, FAAM — 70/84 баллов.

Учитывая нестабильность костного аутоотрансплантата, нами предложен способ мозаичной хондропластики, позволяющий усилить фиксацию костного аутоотрансплантата.

Клинический случай 2

Пациент Б., 36 лет, отмечал рецидивирующие подвывихи в голеностопном суставе, болевой синдром в течение 6 месяцев, по данным МРТ — остеохондральный дефект таранной кости (рис. 5). По данным опросников: VAS — 6/10 баллов, AOFAS — 55/100 баллов, FAAM — 44/84 баллов.

Пациенту выполнена модифицированная методика мозаичной хондропластики с провизорной фиксацией спицей и применением коллагеновой мембраны (патент РФ № RU2802399 «Способ мозаичной аутохондропластики полнослойных костно-хрящевых дефектов суставной поверхности таранной кости у пациентов с хондропатией и асептическим некрозом») (рис. 6).

Доступ к остеохондральному дефекту осуществлялся с помощью остеотомии медиальной лодыжки. Костным заборщиком под контролем электронно-оптического преобразователя удалена склерозированная, асептически



Рис. 4. Пациент А., 58 лет, рентгенограмма после артродеза голеностопного сустава.

Fig. 4. Patient A., 58 years old, X-ray after ankle fusion.

изменённая ткань в пределах здоровой кости и хрящевой ткани. Далее из ската пяточной кости забирался структурный костный аутоотрансплантат. Методом press-fit костный аутоотрансплантат установлен в сформированное ложе таранной кости. Имплантированный костный аутоотрансплантат фиксирован спицей к нижележащей таранной кости (рис. 6a). В нашем клиническом наблюдении для полного удаления изменённой хрящевой и костной ткани сформировано второе ложе для мозаичной имплантации костного аутоотрансплантата (рис. 6b). В подготовленное ложе произведена имплантация костного аутоотрансплантата (рис. 6c). После мозаичной имплантации костных аутоотрансплантатов спица удалена, на костные аутоотрансплантаты фиксирована коллагеновая мембрана с помощью фибринового геля с клеящей способностью.

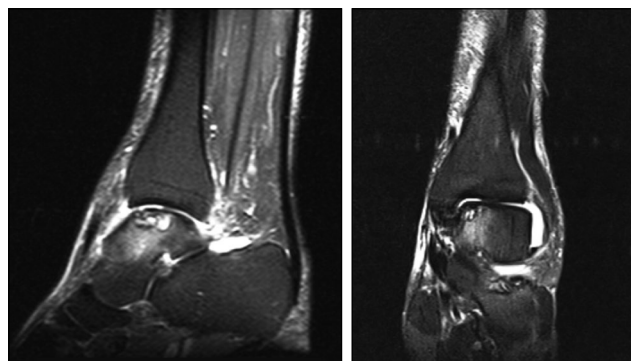


Рис. 5. Пациент Б., 36 лет, МРТ голеностопного сустава (T2-режим). Полнослойный оформленный остеохондральный дефект с кистозной перестройкой и зоной отёка костного мозга размерами 19,4 мм (продольно), 13,1 мм (поперечно), 10,3 мм (глубина).

Fig. 5. Patient B., 36 years old, MRI of the ankle joint (T2 mode). A full-layered decorated osteochondral defect, with cystic rearrangement and a zone of bone marrow edema, measuring 19.4 mm (longitudinally), 13.1 mm (transversely), 10.3 mm (depth).

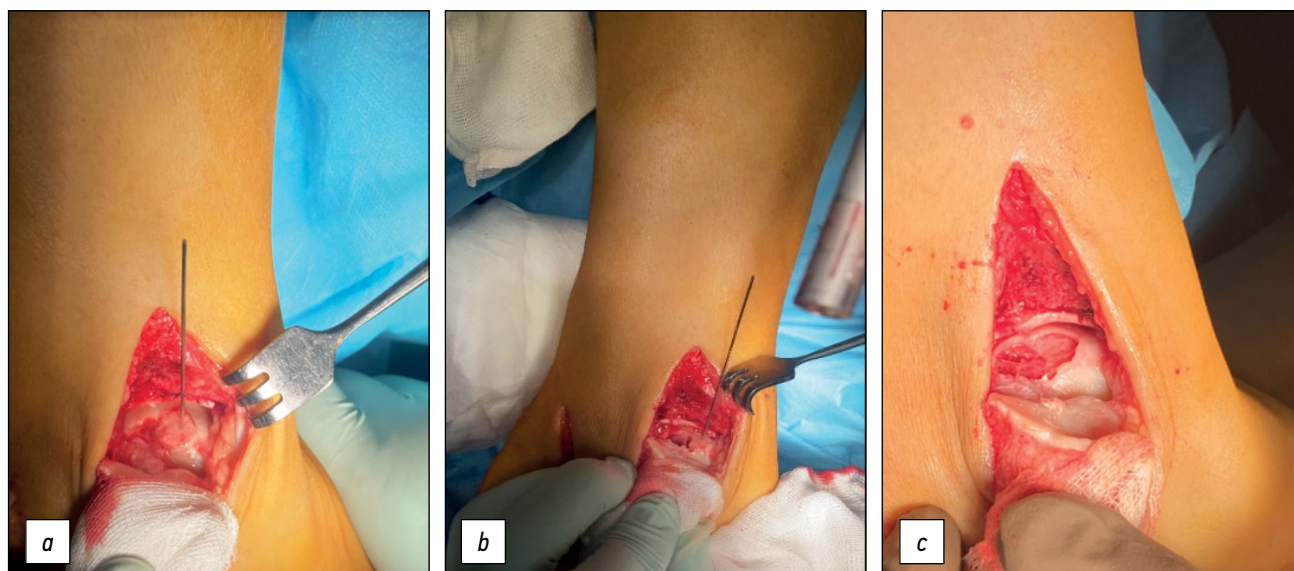


Рис. 6. Пациент Б., 36 лет, этапы выполнения мозаичной аутохондропластики: *a* — интраоперационная картина костного ауто-трансплантата, фиксированного спицей к таранной кости, *b* — интраоперационная картина перед установкой второго костного ауто-трансплантата, *c* — интраоперационная картина после установки двух костных ауто-трансплантатов.

Fig. 6. Patient B., 36 years old, stages of mosaic autochondroplasty: *a* — the impacted bone autograft is fixed with a k-wire to the underlying bone, *b* — intraoperative picture of the formed bed after removal of osteochondral defect, *c* — intraoperative picture after the impaction of two bone autografts and removal of a spoke.

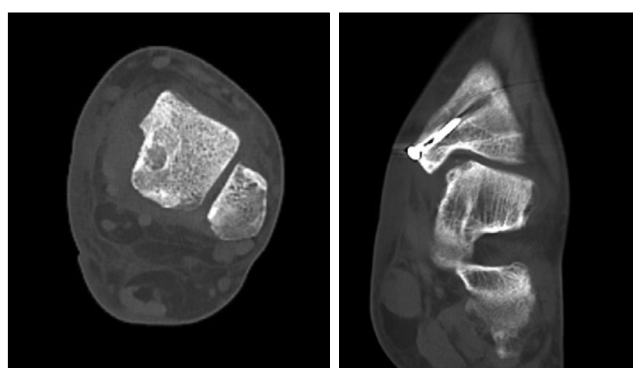


Рис. 7. Пациент Б., 36 лет, результат лечения через 6 месяцев после операции. КТ-исследование: прослеживается пара структурированных ауто-трансплантатов без признаков лизиса или нестабильности.

Fig. 7. Patient B., 36 years old, outcome 6 months after surgery. CT examination: 2 of structured autografts are traced, stable, without signs of lysis or instability.

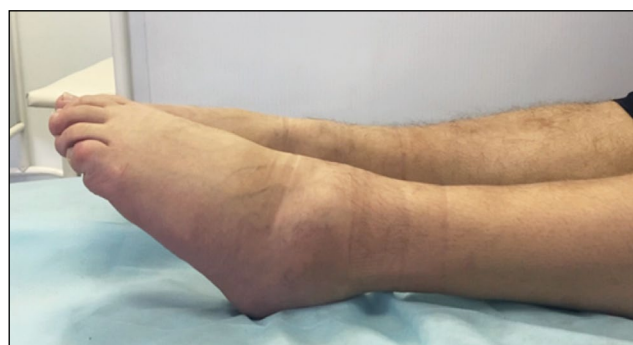


Рис. 8. Пациент Б., 36 лет, данные клинического осмотра.

Fig. 8. Patient B., 36 years old, clinical examination data.

Медиальная лодыжка фиксирована двумя винтами, раны послойно ушиты.

Через 6 месяцев по данным КТ прослеживались два структурированных ауто-трансплантата без признаков лизиса или нестабильности (рис. 7). По данным опросников показатель VAS составил 1/10 баллов, AOFAS — 90/100 баллов, FAAM — 83/84 баллов (рис. 8). Пациент вернулся к своему прежнему уровню двигательной активности.

ОБСУЖДЕНИЕ

Популярность костной аутопластики обусловлена доступностью, воспроизводимостью и предсказуемостью, что нашло своё отражение в хороших среднесрочных результатах лечения пациентов с полнослойными остеохондральными дефектами таранной кости. Несмотря на широкую распространённость и популярность при лечении пациентов с крупными остеохондральными дефектами, методика костной аутопластики не лишена недостатков. Так, зарубежные коллеги отмечают хорошие и отличные долгосрочные результаты ($47,7 \pm 32,68$ месяца) у 797 пациентов (метаанализ 23 публикаций) со средним размером дефекта $135,5 \text{ мм}^2$. При анализе осложнений у 13 пациентов отмечались формирования субхондральных кист в месте проведения хондропластики [6]. I. Savage-Elliott и соавт. в своём исследовании особое внимание уделили оценке образования субхондральных кист. У 24 из 37 пациентов (64,8%) по данным МРТ определялось наличие кист в месте хондропластики при стандартной установке структурных костных ауто-трансплантатов методом

press-fit. Статистически значимой причиной появления кист являлся возраст пациентов; так, в старшей возрастной группе (средний возраст 42,7 года) данное осложнение встречалось чаще, чем у лиц более молодой возрастной группы (32,7 года) [4]. Y. Shimozono и соавт. проанализировали результаты лечения 500 пациентов с остеохондральными дефектами таранной кости. Осложнения встречались в 10,8% случаев, в частности болезненность донорского места, инфекционные осложнения, повреждение поверхностного малоберцового и икроножного нервов, передний таранно-большеберцовый импиджмент, отсутствие интеграции костного ауто-трансплантата и зоны остеотомии [7]. В работе P.C. Kreuz и соавт. отмечалось отсутствие интеграции костного ауто-трансплантата у одного из 35 пациентов [8]. K.M. Feeney и соавт. проанализировали 23 работы и 797 пациентов и отметили нестабильность костного аутоотрансплантата в 1,9% случаев [6]. Согласно консенсусу по восстановлению хрящевой ткани голеностопного сустава, составляющими успешной костной аутопластики таранной кости являются следующие критерии: восстановление конгруэнтности таранной кости, костный аутоотрансплантат должен быть достаточной длины (оптимально — 12–15 мм), а также количество костных трансплантатов более двух может негативно сказываться на результатах. В случаях, когда костный дефект превышает размер одного костного трансплантата, целесообразно использование двух костных трансплантатов, имплантированных в форме полумесяца [1]. По нашему мнению, при использовании двух и более костных аутоотрансплантатов в виде столбиков для лучшего восстановления однородного хрящевого покрытия таранной кости целесообразно покрытие костных аутоотрансплантатов коллагеновой мембраной. Недостаточно плотная посадка костного аутоотрансплантата является основной причиной образования субхондральных кист и нестабильности аутоотрансплантатов [1]. Немаловажной составляющей успешной аутопластики является и уровень посадки аутоотрансплантата: так, возвышение костного аутоотрансплантата над поверхностью таранной кости на 1 мм усиливает давление на трансплантат на 675% при латерально расположенном дефекте и на 255% в медиально расположенном дефекте. Kosc и соавт. определили, что длина костного аутоотрансплантата 12–16 мм обеспечивает значительно лучшую стабильность, чем костный аутоотрансплантат длиной 8 мм [9]. Для снижения риска данного осложнения мы имплантируем костный аутоотрансплантат в один уровень с поверхностью таранной кости и используем провизорную фиксацию спицей костного аутоотрансплантата (длина которого составляет 10–12 мм) к подлежащему губчатому слою таранной кости. Для лучшего восстановления хрящевой поверхности мы укладываем на костный аутоотрансплантат коллагеновую мембрану, фиксируемую фибриновым гелем с клеящей способностью. Провизорная фиксация спицей является доступным

и воспроизводимым методом, позволяющим устанавливать костные столбики с нахлёстом до 50% без потери прочности press-fit фиксации. Также условием успешного результата, наряду с механической прочностью аутоотрансплантатов, является улучшение регенеративной способности тканей посредством использования PRP (плазма, обогащённая тромбоцитами) [10]. Для предотвращения костной резорбции вокруг аутоотрансплантата и оказания стабилизирующего влияния на остеоинтеграцию возможно применение антирезорбтивной терапии [11]. Также необходимо учитывать факторы риска со стороны пациента: его возраст, индекс массы тела, «целующиеся» остеохондральные поражения, наличие остеоартроза, деформации заднего отдела стопы, нестабильность голеностопного сустава. А ревизионными операциями при осложнениях являются повторная хондропластика, эндопротезирование и артродез голеностопного сустава [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Костная аутопластика является одним из самых воспроизводимых и эффективных методов восполнения остеохондральных дефектов таранной кости. Однако имплантация двух и более костных аутоотрансплантатов может сопровождаться снижением прочности контакта «донорская кость/реципиентная окружающая кость», приводить к формированию кист и нестабильности аутоотрансплантата. Ведущим критерием хорошего результата костной аутопластики является стабильность аутоотрансплантата, которая достигается достаточной длиной трансплантата и прочностью фиксации. Предложенный способ провизорной фиксации костного аутоотрансплантата спицей при мозаичной хондропластике является воспроизводимым, эффективным и малозатратным методом, позволяющим сохранять стабильность костного аутоотрансплантата, его press-fit контакт с таранной костью при выполнении мозаичной костной аутопластики.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

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

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

Информированное согласие. Авторы получили письменное согласие пациентов на публикацию их медицинских данных (22.12.2022).

ADDITIONAL INFO

Author contribution. All authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Funding source. The authors state that there is no external funding when conducting the research and preparing the publication.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Consent for publication. The patients gave their written consent for publication of their medical data (December 22, 2022).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hurley E.T., Murawski C.D., Paul J., et al.; International Consensus Group on Cartilage Repair of the Ankle. Osteochondral Autograft: Proceedings of the International Consensus Meeting on Cartilage Repair of the Ankle // *Foot Ankle Int.* 2018. Vol. 39, suppl 1. P. 28S–34S. doi: 10.1177/1071100718781098
2. de l'Escalopier N., Barbier O., Mainard D., et al. Outcomes of talar dome osteochondral defect repair using osteochondral autografts: 37 cases of Mosaicplasty® // *Orthop Traumatol Surg Res.* 2015. Vol. 101, № 1. P. 97–102. doi: 10.1016/j.otsr.2014.11.006
3. Guney A., Yurdakul E., Karaman I., et al. Medium-term outcomes of mosaicplasty versus arthroscopic microfracture with or without platelet-rich plasma in the treatment of osteochondral lesions of the talus // *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2016. Vol. 24, № 4. P. 1293–1298. doi: 10.1007/s00167-015-3834-y
4. Savage-Elliott I., Smyth N.A., Deyer T.W., et al. Magnetic Resonance Imaging Evidence of Postoperative Cyst Formation Does Not Appear to Affect Clinical Outcomes After Autologous Osteochondral Transplantation of the Talus // *Arthroscopy.* 2016. Vol. 32, № 9. P. 1846–54. doi: 10.1016/j.arthro.2016.04.018
5. Wan D.D., Huang H., Hu M.Z., Dong Q.Y. Results of the osteochondral autologous transplantation for treatment of osteochondral lesions of the talus with harvesting from the ipsilateral talar articular facets // *Int Orthop.* 2022. Vol. 46, № 7. P. 1547–1555. doi: 10.1007/s00264-022-05380-7
6. Feeney K.M. The Effectiveness of Osteochondral Autograft Transfer in the Management of Osteochondral Lesions of the Talus: A Systematic Review and Meta-Analysis // *Cureus.* 2022. Vol. 14, № 11. P. e31337. doi: 10.7759/cureus.31337
7. Shimozone Y., Hurley E.T., Myerson C.L., Kennedy J.G. Good clinical and functional outcomes at mid-term following autologous osteochondral transplantation for osteochondral lesions of the talus // *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2018. Vol. 26, № 10. P. 3055–3062. doi: 10.1007/s00167-018-4917-3
8. Kreuz P.C., Steinwachs M., Erggelet C., et al. Mosaicplasty with Autogenous Talar Autograft for Osteochondral Lesions of the Talus after Failed Primary Arthroscopic Management // *The American Journal of Sports Medicine.* 2006. Vol. 34, № 1. P. 55–63. doi: 10.1177/0363546505278299
9. Latt L.D., Glisson R.R., Montijo H.E., Uselli F.G., Easley M.E. Effect of graft height mismatch on contact pressures with osteochondral grafting of the talus // *Am J Sports Med.* 2011. Vol. 39, № 12. P. 2662–2669. doi: 10.1177/0363546511422987
10. Мурадян Д.Р., Кесян Г.А., Левин А.Н., и др. Хирургическое лечение остеохондральных поражений таранной кости с использованием плазмы, обогащенной тромбоцитами // *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова.* 2013. Т. 20, № 3. С. 46–50. doi: 10.17816/vto201320346-50
11. Родионова С.С., Лекишвили М.В., Сляничук Е.Д., и др. Перспективы локального применения антирезорбтивных препаратов при повреждениях и заболеваниях костей скелета // *Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова.* 2014. Т. 21, № 4. С. 83–89. doi: 10.17816/vto20140483-89
12. Mittweide P.N., Murawski C.D., Ackermann J., et al.; International Consensus Group on Cartilage Repair of the Ankle. Revision and Salvage Management: Proceedings of the International Consensus Meeting on Cartilage Repair of the Ankle // *Foot Ankle Int.* 2018. Vol. 39, suppl 1. P. 54S–60S. doi: 10.1177/1071100718781863

REFERENCES

1. Hurley ET, Murawski CD, Paul J, et al.; International Consensus Group on Cartilage Repair of the Ankle. Osteochondral Autograft: Proceedings of the International Consensus Meeting on Cartilage Repair of the Ankle. *Foot Ankle Int.* 2018;39(1_suppl):28S–34S. doi: 10.1177/1071100718781098
2. de l'Escalopier N, Barbier O, Mainard D, et al. Outcomes of talar dome osteochondral defect repair using osteochondral autografts: 37 cases of Mosaicplasty®. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2015;101(1):97–102. doi: 10.1016/j.otsr.2014.11.006
3. Guney A, Yurdakul E, Karaman I, et al. Medium-term outcomes of mosaicplasty versus arthroscopic microfracture with or without platelet-rich plasma in the treatment of osteochondral lesions of the talus. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2016;24(4):1293–1298. doi: 10.1007/s00167-015-3834-y
4. Savage-Elliott I, Smyth NA, Deyer TW, et al. Magnetic Resonance Imaging Evidence of Postoperative Cyst Formation Does Not Appear to Affect Clinical Outcomes After Autologous Osteochondral Transplantation of the Talus. *Arthroscopy.* 2016;32(9):1846–54. doi: 10.1016/j.arthro.2016.04.018
5. Wan DD, Huang H, Hu MZ, Dong QY. Results of the osteochondral autologous transplantation for treatment of osteochondral lesions of the talus with harvesting from the ipsilateral talar articular facets. *Int Orthop.* 2022;46(7):1547–1555. doi: 10.1007/s00264-022-05380-7
6. Feeney KM. The Effectiveness of Osteochondral Autograft Transfer in the Management of Osteochondral Lesions of the Talus: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Cureus.* 2022 Nov;14(11):e31337. doi: 10.7759/cureus.31337
7. Shimozone Y, Hurley ET, Myerson CL, Kennedy JG. Good clinical and functional outcomes at mid-term following autologous osteochondral transplantation for osteochondral lesions of the talus. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2018;26(10):3055–3062. doi: 10.1007/s00167-018-4917-3

8. Kreuz PC, Steinwachs M, Erggelet C, et al. Mosaicplasty with Autogenous Talar Autograft for Osteochondral Lesions of the Talus after Failed Primary Arthroscopic Management. *The American Journal of Sports Medicine*. 2006;34(1):55–63. doi: 10.1177/0363546505278299
9. Latt LD, Glisson RR, Montijo HE, Usulli FG, Easley ME. Effect of graft height mismatch on contact pressures with osteochondral grafting of the talus. *Am J Sports Med*. 2011;39(12):2662–2669. doi: 10.1177/0363546511422987
10. Muradyan DR, Kesyan GA, Levin AN, et al. Surgical Treatment of Talus Osteochondral Lesions with Platelet-Rich Plasma.

N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics. 2013;20(3):46–50. doi: 10.17816/vto201320346-50

11. Rodionova SS, Lekishvili MV, Sklyanchuk ED, et al. Prospects for Local Application of Antiresorptive Drugs in Skeleton Bone Injuries and Diseases. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2014;21(4):83–89. doi: 10.17816/vto20140483-89
12. Mittwede PN, Murawski CD, Ackermann J, et al.; International Consensus Group on Cartilage Repair of the Ankle. Revision and Salvage Management: Proceedings of the International Consensus Meeting on Cartilage Repair of the Ankle. *Foot Ankle Int*. 2018;39(1_suppl):54S–60S. doi: 10.1177/1071100718781863

ОБ АВТОРАХ

* Чеботарёв Виталий Витальевич;

адрес: Россия, 127299, Москва, ул. Приорова, 10;

ORCID: 0009-0001-6483-3162;

e-mail: chebotarew.vitaly@gmail.com

Очкуренко Александр Алексеевич, д-р мед. наук, профессор;

ORCID: 0000-0002-1078-9725;

eLibrary SPIN: 8324-2383;

e-mail: cito-omo@mail.ru

Коробушкин Глеб Владимирович, д-р мед. наук;

ORCID: 0000-0002-9960-2911;

eLibrary SPIN: 9715-1063;

e-mail: kgleb@mail.ru

AUTHORS' INFO

* Vitaliy V. Chebotarev, MD;

address: 10 Priorov str., 127299 Moscow, Russia;

ORCID: 0009-0001-6483-3162;

e-mail: chebotarew.vitaly@gmail.com

Aleksandr A. Ochkurenko, MD, Dr. Sci. (Medicine), professor;

ORCID: 0000-0002-1078-9725;

eLibrary SPIN: 8324-2383;

e-mail: cito-omo@mail.ru

Gleb V. Korobushkin, MD, Dr. Sci. (Medicine);

ORCID: 0000-0002-9960-2911;

eLibrary SPIN: 9715-1063;

e-mail: kgleb@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto629012>

Кифосколиотические деформации позвоночника, ассоциированные с высоким риском развития неврологического дефицита. Обзор литературы

А.Г. Назаренко, А.А. Кулешов, И.М. Милица, М.С. Ветрилэ, И.Н. Лисянский, С.Н. Макаров

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

АННОТАЦИЯ

Представлен обзор литературы, посвящённой кифосколиотическим деформациям с высоким риском грубого первичного неврологического дефицита. Обзор носит интегративный характер и проведён с использованием баз данных медицинской литературы и поисковых ресурсов PubMed, Google Scholar и eLibrary. В обзоре затронуты следующие аспекты: этиология и патогенез неврологического дефицита, вызванного естественным течением деформации, основные принципы и направления хирургического лечения неврологически осложнённых деформаций позвоночника. В научной литературе описаны основные механизмы развития неврологического дефицита: механическая компрессия спинного мозга и его тракция, нарушение кровообращения на вершине деформации. Методы хирургического лечения неврологически осложнённых кифотических и сколиотических деформаций менялись согласно развитию инструментария и подходов в вертебрологии. В первой половине XX века были описаны различные методы декомпрессии позвоночного канала, такие как ламинэктомия, кострэнсверзэктомия, мобилизация спинного мозга и моделирование позвоночного канала. Развитие и активное применение во второй половине XX века в практике инструментария (субламинарные крючки, транспедикулярные винты) позволило выполнять одновременно с декомпрессией позвоночного канала фиксацию, стабилизацию и коррекцию деформации позвоночника. Сочетание различных методов стабилизации и коррекции деформации с одновременной декомпрессией позвоночного канала обеспечивает условия для восстановления функции повреждённого спинного мозга, приводя к регрессу неврологического дефицита и недопущению тяжёлой инвалидизации пациента.

Ключевые слова: кифоз; сколиоз; неврологический дефицит; вертебротомия; декомпрессия.

Как цитировать:

Назаренко А.Г., Кулешов А.А., Милица И.М., Ветрилэ М.С., Лисянский И.Н., Макаров С.Н. Кифосколиотические деформации позвоночника, ассоциированные с высоким риском развития неврологического дефицита. Обзор литературы // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2024. Т. 31, № 3. С. 415–425. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto629012>

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto629012>

Kyphoscoliotic spinal deformities associated with high risk of developing neurological deficits. Literature review

Anton G. Nazarenko, Alexander A. Kuleshov, Igor M. Militsa, Marchel S. Vetrile, Igor N. Lisyansky, Sergey N. Makarov

N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russia

ABSTRACT

This is a literature review on kyphoscoliotic deformities with a high risk of severe primary neurological deficit. The review is integrative in nature and was conducted using medical literature databases and search resources such as PubMed, Google Scholar, and eLibrary. The following aspects are covered: the etiology and pathogenesis of neurological deficits caused by the natural progression of deformities, the main principles, and directions of surgical treatment for neurologically complicated spinal deformities. The scientific literature describes the primary mechanisms of neurological deficit development: mechanical compression and traction of the spinal cord, as well as impaired circulation at the apex of the deformity. Surgical methods for treating neurologically complicated kyphotic and scoliotic deformities have evolved with advancements in spinal instrumentation and approaches. In the first half of the 20th century, various spinal canal decompression methods were described, including laminectomy, costotransversectomy, spinal cord mobilization, and spinal canal remodeling. In the second half of the 20th century, the development and active use of spinal instrumentation (sublaminar hooks, pedicle screws) enabled simultaneous decompression, fixation, stabilization, and correction of spinal deformities. Combining different stabilization and deformity correction methods with concurrent spinal canal decompression creates the conditions for restoring spinal cord function, leading to a regression of neurological deficits and preventing severe patient disability.

Keywords: kyphosis; scoliosis; neurological deficit; vertebrotoomy; decompression.

To cite this article:

Nazarenko AG, Kuleshov AA, Militsa IM, Vetrile MS, Lisyansky IN, Makarov SN. Kyphoscoliotic spinal deformities associated with high risk of developing neurological deficits. Literature review. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2024;31(3):415–425. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto629012>

ВВЕДЕНИЕ

Сколиотические и кифотические деформации позвоночника при естественном течении прогрессируют, приводя не только к нарушению глобальных параметров баланса и биомеханики позвоночника, но и к нарушению неврологического статуса. Сочетание сколиотической и кифотической деформации в литературе встречается под термином «кифосколиоз» [1].

Одной из важных проблем естественного течения деформаций позвоночника являются манифестация и прогрессирующее развитие дисфункции спинного мозга, клинически проявляющиеся неврологическим дефицитом. Неврологический дефицит, связанный с деформацией позвоночника, может быть малозаметным в клинической картине [2].

Несмотря на усовершенствование хирургических методов лечения деформаций позвоночника с компрессией спинного мозга, оптимальный хирургический подход к деформациям с высоким риском развития неврологического дефицита остаётся спорным.

МЕТОДОЛОГИЯ ПОИСКА ИСТОЧНИКОВ

Исследование представлено интегративным обзором литературы. Проведено с использованием баз данных медицинской литературы и поисковых ресурсов PubMed, Google Scholar и eLibrary по ключевым словам «neurological deficit», «myelopathy», «neurologically complicated deformities». Проанализировано 180 исследований. Все исследования в литературе представлены единичными наблюдениями или сериями клинических случаев в формате «случай-контроль», что говорит о высокой актуальности и недостаточной разработанности данной темы. За последние 5 лет было опубликовано 17 работ по данной тематике.

ОБСУЖДЕНИЕ

Патогенез неврологического дефицита

Патогенез неврологического дефицита у больных с деформациями позвоночника является не до конца изученным. В научной литературе, как отечественной, так и зарубежной, описывают ряд основных механизмов: механическую компрессию спинного мозга на вершине деформации, повреждение спинного мозга в результате его механического растяжения, а также их сочетания. Сочетание механической компрессии и тракции спинного мозга в условиях кифосколиотической деформации приводит к нарушению кровообращения в спинном мозге [3].

Кифотические деформации позвоночника встречаются реже, чем сколиотические, но при этом частота компрессии спинного мозга и неврологический дефицит при них возникают чаще [4, 5]. Наиболее значимым осложнением компрессии спинного мозга на вершине деформации

является миелопатия. Средняя частота развития вертеброгенной миелопатии при кифосколиотических деформациях позвоночника составляет 21,1% и клинически проявляется различными вариантами неврологического дефицита [6]. Клинические проявления варьируют от функционально незначимых до грубых нарушений неврологического статуса — парапареза и пlegии [7].

Компрессия спинного мозга в большинстве случаев прямо пропорциональна величине угла кифосколиотической деформации и приводит к недостаточности кровоснабжения спинного мозга, его демиелинизации и атрофии [7]. Взаимосвязь компрессии спинного мозга и угловой деформации позвоночника, приводящей к миелопатии, описали в эксперименте Masini и Maranhao. Авторы изготовили экспериментальную модель дурального мешка из широкой фасции бедра, в которую поместили баллон, равный среднему диаметру спинного мозга, наполненный водой, подключённый к манометру с исходным давлением 20 мм вод. ст. Во время эксперимента воспроизводилась угловая деформация (кифоз) модели до 110° с замерами переднезаднего и латеро-латерального диаметра. При деформации 50° диаметр модели дурального мешка был равен диаметру модели спинного мозга (баллона). При деформации 60° давление в баллоне начало превышать 30 мм вод. ст. — среднее венозное давление. При 90° давление увеличивалось в два раза. Авторы делают акцент на том, что при 60° в спинном мозге происходит венозный застой, при деформации более 90° возникают риски развития ишемии.

S. Kleinberg и A. Kaplan (1952 г.) описывали механическое повреждение спинного мозга в результате тракции при кифосколиотической деформации позвоночника. Авторы объясняют такой механизм повреждения малоподвижностью спинного мозга из-за его фиксирующего аппарата: твёрдой мозговой оболочки (ТМО), зубчатых связок, спинномозговых нервов [8]. На вершине кифоза спинной мозг плотно прилегает к задней поверхности тел позвонков. Кроме того, спинной мозг сдавливается в переднезаднем направлении ТМО, которая фиксирована к черепу и крестцу, но имеет небольшую эластичность, наибольшее натяжение которой формируется по задней стенке [9] (рис. 1).

При рассечении ТМО её давление на спинной мозг уменьшается. Этим объясняется регресс неврологического дефицита, который может наступить после ламинэктомии с рассечением твёрдой мозговой оболочки (дуротомии) [9, 10].

Кровоснабжение спинного мозга изменяется при его компрессии и тракции. Кровообращение спинного мозга хорошо описал G. Dommissie (1974 г.), который подчёркивал важность сегментарного кровоснабжения и анастомозов. При компрессии и тракции спинного мозга происходит сдавление сосудов, что приводит к венозной обструкции и уменьшению кровотока. При усилении обструкции артериальный кровоток соответственно уменьшается. Гипоксия

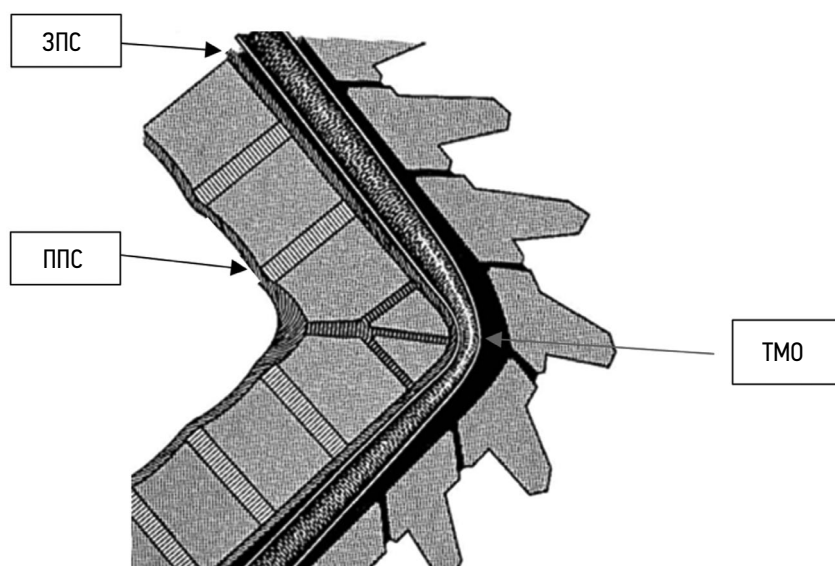


Рис. 1. Схематическое изображение кифоза, показывающее компрессию спинного мозга в области вершины деформации. Твёрдая оболочка натянута и сдавливает спинной мозг относительно передней поверхности тела позвонка в области вершины кифоза.

Примечание. ППС — передняя продольная связка, ЗПС — задняя продольная связка, ТМО — твёрдая мозговая оболочка.

Fig. 1. A schematic representation of kyphosis showing compression of the spinal cord in the area of the apex of the deformity. The dura is stretched and compresses the spinal cord relative to the anterior surface of the vertebral body in the area of the apex of the kyphosis.

Note. ППС — anterior longitudinal ligament, ЗПС — posterior longitudinal ligament, ТМО — dura mater.

приводит к снижению функции спинного мозга и появлению неврологической симптоматики. Кровоснабжение в верхнегрудном отделе позвоночника имеет наименьшее количество артерий, питающих сегменты спинного мозга на данном уровне. Кроме того, перфорантные артерии, отходящие от передней спинномозговой артерии, в этой области имеют меньший калибр [11]. Любое усиленное натяжение спинного мозга в условиях кифосколиотической деформации приведёт к повреждению нервной ткани. При нарастании деформации, особенно если она происходит за короткий период времени, как при скачке роста в подростковом возрасте, спинной мозг быстро подвергается действию тракционных сил, при этом механизмы адаптации не успевают развиваться для компенсации повреждений [12].

В 2006 г. С.П. Миронов, С.Т. Ветрилэ и соавт. представили исследование, в котором изучались особенности спинального кровообращения и микроциркуляции в оболочках спинного мозга при кифосколиотических деформациях позвоночника. В исследовании подчёркивается возможность коллатерального кровообращения в системе спинальных артерий. Авторами выявлено, что при постепенном развитии кифосколиотической деформации происходит адаптация системы спинального кровоснабжения за счёт увеличения кровотока в системе задней спинальной артерии. При возникновении стеноза позвоночного канала происходит компенсация кровотока в спинном мозге по передним и задним радикуло-медуллярным артериям. При коррекции кифосколиотической деформации происходит улучшение спинального кровообращения в системе артерии Адамкевича из-за

уменьшения натяжения межрёберных сосудов. В сосудах спинного мозга выявлено улучшение показателей микроциркуляции после коррекции сколиотической деформации III и IV степени (до 75–90°), но при коррекции более тяжёлых деформаций позвоночника (120–140°) показатели микроциркуляции в глубоких слоях оболочек спинного мозга были снижены [13].

Методы оперативного лечения

Хирургические подходы к лечению неврологически осложнённых деформаций позвоночника изменялись пропорционально развитию хирургических подходов, инструментария и идей вертебрологических школ определённого периода времени.

Ламинэктомия, кострэнсверзэктомия

Варианты хирургического лечения кифосколиотических деформаций позвоночника, ассоциированных с неврологическим дефицитом, были предложены в начале прошлого века [14]. Большое распространение получили методы декомпрессии позвоночного канала на основе ламинэктомии на вершине кифосколиотической деформации, кострэнсверзэктомии и вентральной декомпрессии. В 1900 году V. Ménard сообщил об использовании кострэнсверзэктомии трансторакальным доступом [15]. В 1995 году B. Ahlgren и H. Herkowitz описали заднебоковой доступ к грудному отделу позвоночника с вогнутой стороны с целью выполнения кострэнсверзэктомии [16]. J. Lonstein, R. Winter, J. Moe и соавт. (1980 г.) опубликовали сравнительный отчёт о 43 клинических случаях оперативного лечения неврологически осложнённых

деформаций позвоночника. Хирургические методики включали вентральную декомпрессию спинного мозга и ламинэктомию. Ламинэктомию показала наилучшие результаты: у 6 из 10 пациентов наблюдалось прогрессирование неврологии. Передняя декомпрессия спинного мозга дала наилучшие результаты: улучшение наблюдалось у 16 из 25 пациентов [17]. Операции с использованием ламинэктомии не приводили к регрессу неврологической симптоматики, поскольку механизм компрессии спинного мозга обусловлен кпереди лежащими от него структурами. Удаление задних структур дестабилизирует позвоночник, что приводит к более быстрому прогрессированию кифотического компонента деформации и ещё большей компрессии спинного мозга [5, 18, 19].

Мобилизация спинного мозга и моделирование позвоночного канала

В 1947 году O. Nyndman сообщил о первом случае латеральной транспозиции спинного мозга у больного с идиопатическим кифосколиозом и компрессией спинного мозга. Помимо ламинэктомии предложена резекция корней дуг позвонков, поперечных отростков и головок рёбер на вогнутой стороне деформации. После резекции вышеописанных костных структур выполнялась невротомия грудных спинномозговых нервов, при этом спинной мозг смещался в сторону вогнутой стороны деформации, принимая новое положение. Через 3 месяца отмечено полное восстановление неврологического статуса [18]. Аналогичные результаты положительной динамики в неврологическом статусе при данном типе операций представили в 1949 г. K. McKenzie и F. Dewar, в 1956 г. — J. Grafton Love и соавт., в 1960 г. — J. Barber и C. Epps, в 1989 г. — G. Cantore и соавт., в 2006 г. — E. Shenouda и соавт. [9, 17, 20–24].

Мобилизация спинного мозга и моделирование позвоночного канала, описываемые в литературе как транспозиция спинного мозга, позволили добиться значительного увеличения объёма декомпрессии и исправления геометрии позвоночного канала, обеспечив стойкий регресс неврологической симптоматики. Это даёт возможность выполнить необходимую стабилизацию кифосколиотической деформации позвоночника, снизить риск прогрессирования деформации и несостоятельности спондилодеза в отдалённые сроки после операции (рис. 2).

Аналогичный случай применения транспозиции спинного мозга представили в отечественной литературе В.В. Новиков и соавт. в 2016 году. Пациентке с ригидным грудным кифосколиозом IV степени, осложнённым миелопатией грудного отдела в виде нижнего спастического парапареза без нарушения функции тазовых органов, выполнена переднебоковая транспозиция спинного мозга на уровне Th7–Th11 позвонков из правостороннего торакального доступа с клиновидной вертебротомией на уровне Th7–Th11, коррекцией деформации позвоночника с помощью транспедикулярной фиксации и задним спондилодезом аутотрансплантатом. Авторы подчёркивают положительный клинический и косметический результат с улучшением неврологического статуса (регресс нижнего спастического парапареза) [26].

Передняя декомпрессия с инструментальной коррекцией и фиксацией деформации

Устранение стеноза позвоночного канала путём резекции костных структур, сдавливающих спинной мозг, позволяет лишь купировать имеющийся неврологический дефицит. Методы одномоментной декомпрессии, фиксации и/или коррекции тяжёлых кифосколиотических деформаций с использованием дорсальной фиксации стали

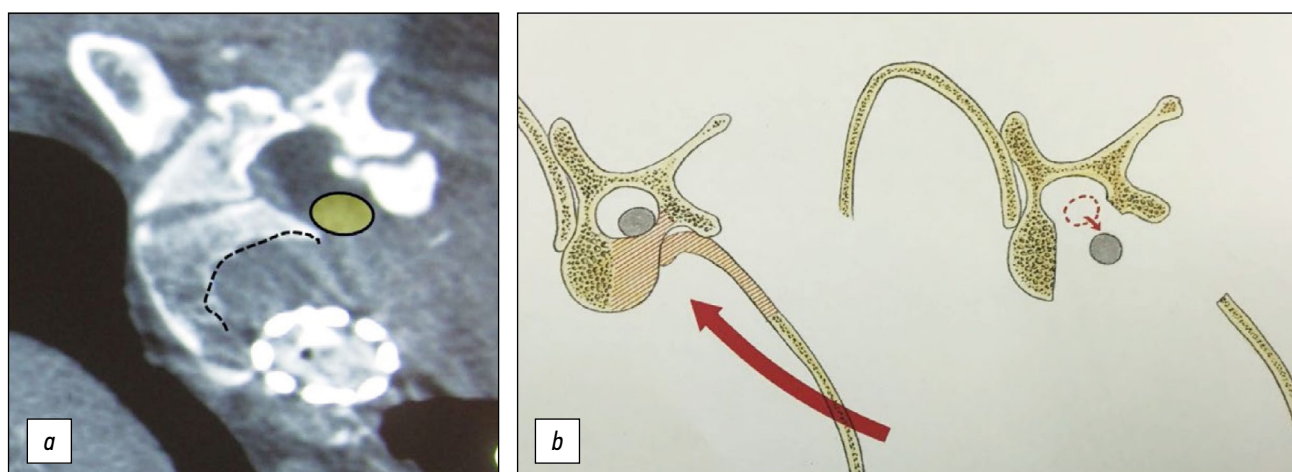


Рис. 2. *a* — компьютерная томография позвоночника после выполнения кострэнсверзэктомии (из личного архива автора): пунктир — зона резекции, жёлтый овал — новое положение спинного мозга после операции; *b* — схематичное изображение области резекции при моделировании позвоночного канала [25].

Fig. 2. *a* — computed tomography of the spine after bone transversectomy (from the author's personal archive): dotted line — resection zone, yellow oval — new position of the spinal cord after surgery; *b* — schematic representation of the resection area when modeling the spinal canal [25].

возможными после внедрения транспедикулярной фиксации [27–30].

В 2013 г. L. Lenke представил ретроспективный мультицентровой обзор 147 клинических случаев, в которых была выполнена резекция позвоночного столба (vertebral column resection, VCR) как изолированным задним, так и комбинированным переднезадним доступом. У 39 из 147 пациентов (27%) отмечалось интраоперационное неврологическое осложнение (изменение соматосенсорных потенциалов мониторинга спинного мозга или отрицательный wake-up тест). Выбор оперативного доступа VCR не оказывал значимого влияния на развитие осложнений [22]. В 2005 г. J. Smith и соавт. использовали только задний доступ при выполнении VCR в сочетании с кострассектомией при оперативном лечении кифосколиоза, ассоциированного с неврологическим дефицитом. Этот доступ обеспечивает визуализацию дурального мешка и коррекцию деформации [28, 31–33].

В 2008 г. K. Song и соавт. представили исследование результатов оперативного лечения пациентов с прогрессирующей миелопатией, которым была проведена передняя декомпрессия, дорсальная транспедикулярная стабилизация без коррекции деформации. В 7 случаях была выполнена одноэтапная операция, в остальных 9 — двухэтапная. При динамическом наблюдении положительная динамика неврологического статуса отмечена у 14 из 16 пациентов. В случае с тяжёлой предоперационной неврологией (класс А по Frankel) изменений в неврологическом статусе не наблюдалось [34]. Аналогичные результаты получили в 2010 г. L. Lenke и K. Ishida и в 2015 г.

P. Chen, C. Chang, H. Chen и соавт. [35–37]. Однако показания для VCR (6-й тип по Schwab) (рис. 3) не были подробно описаны в литературе. B. Shi и соавт. в проведённом двухлетнем ретроспективном исследовании показали, что потенциальными показаниями к остеотомии 6-го типа по Schwab должны быть пациенты с врождённым кифосколиозом, с клиновидными полупозвонками или многоуровневым передним синостозом тел позвонков в области вершины деформации. Требуемая к технике остеотомии VI типа по Schwab при наличии надлежащих показаний может обеспечить удовлетворительную коррекцию деформации с улучшением неврологического статуса [39].

Для коррекции тяжёлых ригидных деформаций с использованием заднего доступа и остеотомии на одном уровне в литературе описаны модификации традиционных остеотомий, такие как апикальная лордозизирующая остеотомия (apical spinal osteotomy, ASO) [40], модифицированная VCR (mVCR) [41], апикальная сегментарная резекционная остеотомия [42], закрывающе-открывающаяся клиновидная остеотомия (closing-opening wedge osteotomy, COWO) и закрывающаяся клиновидная остеотомия (closing wedge osteotomy, CWO) [28, 43].

A. Patel и соавт. (2018 г.) представили исследование, в котором описывали эффективность модификации апикальной остеотомии позвоночника (ASO) — одноуровневой асимметричной закрывающей остеотомии из заднего доступа. Неврологический дефицит был диагностирован до операции у 9 пациентов (класс А по Frankel — у 1, В — у 3, С — у 5, Е — у 17). При наблюдении в послеоперационном периоде оценка по Frankel улучшилась с А до В

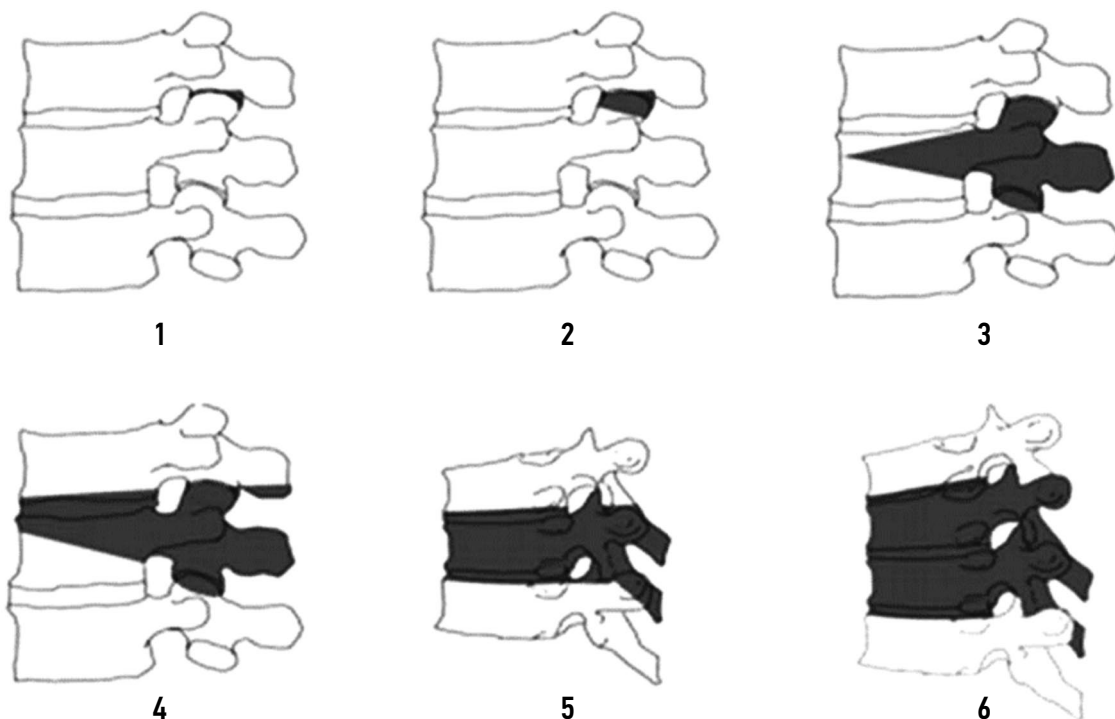


Рис. 3. Типы остеотомий по Schwab [38].

Fig. 3. Types of osteotomies according to Schwab [38].

в 1 случае, с В до D — в 2 случаях и до E — в 1 случае; во всех 5 случаях, в которых предоперационная оценка по Frankel соответствовала классу C, оценка улучшилась до класса E. Через 2 года у всех пациентов неврологический статус остался на прежнем уровне или улучшился, за исключением одного пациента, у которого сразу после операции развилась параплегия. Авторы пришли к выводу, что данная модификация показывает хорошие клинические и рентгенологические результаты с удовлетворительными показателями коррекции [44]. Несмотря на то, что операция VCR приводит к резкой коррекции кифотической деформации позвоночника, последующие среднесрочные и долгосрочные исследования показали высокий уровень осложнений в виде перелома стержней [45–49].

Передняя декомпрессия и передняя стабилизация

При врождённых кифосколиотических деформациях могут отмечаться множественные пороки развития позвоночника. В таких случаях установка дорсальной системы фиксации технически затруднена. Подобный случай представили в 2016 г. А.А. Кулешов и соавт. в клиническом примере пациента с врождённой деформацией позвоночника, аплазией корней дуг грудных и поясничных позвонков, компрессионным спинальным синдромом (грудная миелопатия, нижний спастический глубокий парализ с нарушением функции тазовых органов (класс C по Frankel; ASIA: движение — 81 балл, укол иглой — 84 балла, прикосновение — 84 балла). Выполнена резекция позвонков на вершине деформации трансостальным доступом через ложе IV ребра. После достижения декомпрессии спинного мозга выполнено введение транспедикулярных винтов в тела позвонков, во фронтальной плоскости спереди к металлоконструкции с помощью лавсана подвязан уложенный на боковую поверхность тел позвонков рёберный аутотрансплантат. Через 6 месяцев зафиксирована положительная динамика. Пациент передвигается самостоятельно, без дополнительной опоры. Восстановление мышечной силы в конечностях до 5 баллов (класс E по Frankel; ASIA: движение — 100 баллов, укол иглой — 112 баллов, прикосновение — 112 баллов) [50].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В патогенезе развития повреждения спинного мозга в условиях деформации ключевую роль играет нарушение кровообращения в спинном мозге на вершине деформации, а также механическая тракция в условиях анатомической малоподвижности спинного мозга в позвоночном канале. Лучшие результаты в отношении восстановления функций спинного мозга описаны при ранней декомпрессии невральных структур и стабилизации без коррекции деформации.

Развитие методов транспедикулярной фиксации позвоночника обеспечило одномоментную декомпрессию

спинного мозга и коррекцию кифосколиотических деформаций. При тяжёлых кифосколиотических деформациях с длительно протекающим неврологическим дефицитом, развившимся в результате компрессии спинного мозга, мобилизация спинного мозга из заднебокового доступа с дорсальной фиксацией показала лучший потенциал регресса неврологического дефицита. Однако в клинической практике встречаются деформации позвоночника, при которых задний или заднебоковой метод декомпрессии и фиксации неприменим. Данная особенность связана с технической невозможностью установки дорсальных систем фиксации, обусловленной анатомическими особенностями позвоночника. В таких случаях вентральная декомпрессия и стабилизация являются единственно возможным способом оперативного лечения, обеспечивая регресс неврологического дефицита.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: И.М. Милица — сбор и анализ литературных источников, написание текста статьи; А.Г. Назаренко, А.А. Кулешов — редактирование и написание текста статьи; М.С. Ветрилэ — редактирование текста статьи; И.Н. Лисянский — сбор литературных источников, редактирование текста статьи; С.Н. Макаров — сбор литературных источников, редактирование текста статьи.

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

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

ADDITIONAL INFO

Author contribution. All authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication). The greatest contribution is distributed as follows: I.M. Milita — collection and analysis of literary sources, writing the text of the article; A.G. Nazarenko, A.A. Kuleshov — editing and writing the text of the article; M.S. Vetrile — editing the text of the article; I.N. Lisyansky — collecting literary sources, editing the text of the article; S.N. Makarov — collecting literary sources, editing the text of the article.

Funding source. The authors state that there is no external funding when conducting the research and preparing the publication.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Papaliodis D.N., Bonanni P.G., Roberts T.T., et al. Computer assisted Cobb angle measurements: A novel algorithm // *International Journal of Spine Surgery*. 2017. Vol. 11, № 3. P. 167–172. doi: 10.14444/4021
2. Goel S.A., Neshar A.M., Chhabra H.S. A rare case of surgically managed multiple congenital thoraco-lumbar and lumbar block vertebrae with kypho-scoliosis and adjacent segment disease with myelopathy in a young female // *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*. 2020. Vol. 11, № 2. P. 291–294. doi: 10.1016/j.jcot.2019.04.017
3. Sugimoto Y., Ito Y., Tanaka M., et al. Cervical cord injury in patients with ankylosed spines: progressive paraplegia in two patients after posterior fusion without decompression // *Spine*. 2009. Vol. 34, № 23. P. E861–3. doi: 10.1097/BRS.0b013e3181bb89fc
4. Winter R.B., Moe J.H., Wang J.F. Congenital kyphosis: its natural history and treatment as observed in a study of one hundred and thirty patients // *JBJS*. 1973. Vol. 55, № 2. P. 223–274.
5. McMaster M.J., Singh H. Natural history of congenital kyphosis and kyphoscoliosis. A study of one hundred and twelve patients // *The Journal of bone and joint surgery. American volume*. 1999. Vol. 81, № 10. P. 1367–1383. doi: 10.2106/00004623-199910000-00002
6. Ульрих Э.В., Мушкин А.Ю., Рубин А.В. Врожденные деформации позвоночника у детей: прогноз эпидемиологии и тактика ведения // *Хирургия позвоночника*. 2009. № 2. С. 55–61. doi: 10.14531/ss2009.2.55-61
7. Singh K., Samartzis D., An H.S. Neurofibromatosis type I with severe dystrophic kyphoscoliosis and its operative management via a simultaneous anterior-posterior approach: A case report and review of the literature // *Spine Journal*. 2005. Vol. 5, № 4. P. 461–466.
8. Kleinberg S., Kaplan A. Scoliosis complicated by paraplegia // *J Bone Joint Surg Am*. 1952. Vol. 34-A, № 1. P. 162–7.
9. Maxwell J.A., Kahn E.A. Spinal cord traction producing an ascending, reversible, neurological deficit // *Case Report*. 1969. № 31. С. 459–461.
10. Maxwell A.K.E. Spinal cord traction producing an ascending, reversible, neurological deficit. Case report // *Verhandlungen der Anatomischen Gesellschaft*. 1967. № 115. P. 49–69.
11. Dommissie G. The blood supply of the spinal cord. A critical vascular zone in spinal surgery // *J Bone Joint Surg Br*. 1974. Vol. 56, № 2. P. 225–35.
12. Breig A., Braxton V. Biomechanics of the central nervous system: some basic normal and pathologic phenomena. Stockholm: Almqvist & Wiksell, 1960. 183 p.
13. Миронов С.П., Ветрилэ С.Т., Нацвлишвили З.Г., Морозов А.К., Крупаткин А.И. Оценка особенностей спинального кровообращения, микроциркуляции в оболочках спинного мозга и нейровегетативной регуляции при сколиозе // *Хирургия позвоночника*. 2006. № 3. С. 38–48. doi: 10.14531/SS2006.3.38-48
14. Pilcher J.E. The Surgery of the Brain and Spinal Cord // *Annals of surgery*. 1888. Vol. 8, № 4. P. 261–283. doi: 10.1097/00000658-188807000-00124
15. Ménard D.V. Étude pratique sur le mal de Pott, par le Dr V. Ménard... Paris: Masson, 1900.
16. Ahlgren B.D., Herkowitz H.N. A modified posterolateral approach to the thoracic spine // *Journal of spinal disorders*. 1995. Vol. 8, № 1. P. 69–75.
17. Lonstein J.E., Winter R.B., Moe J.H., et al. Neurologic deficits secondary to spinal deformity: A review of the literature and report of 43 cases // *Spine*. 1980. Vol. 5, № 4. P. 331–355. doi: 10.1097/00007632-198007000-00007
18. Hyndman O.R. Transplantation of the spinal cord; The problem of kyphoscoliosis with cord sign // *Surg Gynec Obstet*. 1947. Vol. 84, № 4. P. 460–464.
19. Love J.G. Transplantation of the spinal cord for the relief of paraplegia // *AMA Archives of Surgery*. 1956. Vol. 73, № 5. P. 757–763. doi: 10.1001/archsurg.1956.01280050025006
20. Barber J.B., Epps C.H. Antero-lateral transposition of the spinal cord for paraparesis due to congenital scoliosis // *Journal of the National Medical Association*. 1968. Vol. 60, № 3. P. 169–72.
21. Cantore G.P., Ciappetta P., Costanzo G., Raco A., Salvati M. Neurological deficits secondary to spinal deformities: their treatment and results in 13 patients // *European neurology*. 1989. Vol. 29, № 4. P. 181–185. doi: 10.1159/000116407
22. Lenke L.G., Newton P.O., Sucato D.J., et al. Complications after 147 consecutive vertebral column resections for severe pediatric spinal deformity: A multicenter analysis // *Spine*. 2013. Vol. 38, № 2. P. 119–132. doi: 10.1097/BRS.0b013e318269fab1
23. McKenzie K.G., Dewar F.P. Scoliosis with paraplegia // *The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume*. 1949. Vol. 31B, № 2. P. 162–174.
24. Shenouda E.F., Nelson I.W., Nelson R.J. Anterior transvertebral transposition of the spinal cord for the relief of paraplegia associated with congenital cervicothoracic kyphoscoliosis: Technical note // *Journal of Neurosurgery: Spine*. 2006. Vol. 5, № 4. P. 374–379. doi: 10.3171/spi.2006.5.4.374
25. Loniewski de Ninina X., Dubousset J.F. Place de la traction et du temps antérieur dans le traitement chirurgical des cyphoses et cypho-scolioses avec l'instrumentation «C.D.» chez l'enfant // *International Orthopaedics*. 1994. Vol. 18, № 4. P. 195–203. doi: 10.1007/BF00188322
26. Novikov V.V., Vasyura A.S., Lebedeva M.N., Mikhaylovskiy M.V., Sadovoy M.A. Surgical management of neurologically complicated kyphoscoliosis using transposition of the spinal cord: Case report // *International Journal of Surgery Case Reports*. 2016. Vol. 27. P. 13–17. doi: 10.1016/j.ijscr.2016.07.037
27. Delecron J., et al. Various mechanisms of spinal cord injury during scoliosis surgery. In: *Neurological Complications of Spinal Surgery. Proceedings of the 11th GICD Congress*. Arcachon, France, 1994. P. 13–14.
28. Kawahara N., Tomita K., Baba H., et al. Closing-opening wedge osteotomy to correct angular kyphotic deformity by a single posterior approach // *Spine*. 2001. Vol. 26, № 4. P. 391–402. doi: 10.1097/00007632-200102150-00016
29. Shimode M., Kojima T., Sowa K. Spinal wedge osteotomy by a single posterior approach for correction of severe and rigid kyphosis

or kyphoscoliosis // *Spine*. 2002. Vol. 27, № 20. P. 2260–2267. doi: 10.1097/00007632-200210150-00015

30. Shono Y., Abumi K., Kaneda K. One-stage posterior hemivertebra resection and correction using segmental posterior instrumentation // *Spine*. 2001. Vol. 26, № 7. P. 752–757. doi: 10.1097/00007632-200104010-00011

31. Leatherman K.D. The management of rigid spinal curves // *Clinical Orthopaedics and Related Research®*. 1973. № 93. P. 215–224. doi: 10.1097/00003086-197306000-00021

32. Roberson J.R., Whitesides T.E. Jr. Surgical reconstruction of late post-traumatic thoracolumbar kyphosis // *Spine*. 1985. Vol. 10, № 4. P. 307–312. doi: 10.1097/00007632-198505000-00003

33. Smith J.T., Golligly S., Dunn H.K. Simultaneous anterior-posterior approach through a costotransversectomy for the treatment of congenital kyphosis and acquired kyphoscoliotic deformities // *Journal of Bone and Joint Surgery*. 2005. Vol. 87, № 10. P. 2281–2289. doi: 10.2106/JBJS.D.01795

34. Song K.S., Chang B.S., Yeom J.S., et al. Surgical treatment of severe angular kyphosis with myelopathy: Anterior and posterior approach with pedicle screw instrumentation // *Spine*. 2008. Vol. 33, № 11. P. 1229–1235. doi: 10.1097/BRS.0b013e31817152b3

35. Chen P.C., Chang C.C., Chen H.T., et al. The Accuracy of 3D Printing Assistance in the Spinal Deformity Surgery // *BioMed Research International*. 2019. P. 7196528. doi: 10.1155/2019/7196528

36. Ishida K., Aota Y., Uesugi M., et al. Late Onset of Thoracic Myelopathy with Type 2 Congenital Deformity: A Case Report // *The Open Spine Journal*. 2010. Vol. 2. P. 21–23.

37. Lenke L.G., Sides B.A., Koester L.A., Hensley M., Blanke K.M. Vertebral column resection for the treatment of severe spinal deformity // *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 2010. Vol. 468, № 3. P. 687–699. doi: 10.1007/s11999-009-1037-x

38. Schwab F., Blondel B., Chay E., et al. The comprehensive anatomical spinal osteotomy classification // *Neurosurgery*. 2015. Vol. 76, № 1 suppl. P. S33–S41. doi: 10.1227/NEU.0000000000000182o

39. Shi B., Shi B., Liu D., et al. Scoliosis research society-schwab grade 6 osteotomy for severe congenital angular kyphoscoliosis: An analysis of 17 cases with a minimum 2-year follow-up // *Neurosurgery*. 2020. Vol. 87, № 5. P. 925–930. doi: 10.1093/neuros/nyaa055

40. Chang K.-W., Chen Y.Y., Lin C.C., Hsu H.L., Pai K.C. Apical lordosating osteotomy and minimal segment fixation for the treatment of thoracic or thoracolumbar osteoporotic kyphosis // *Spine*. 2005. Vol. 30, № 14. P. 1674–1681. doi: 10.1097/01.brs.0000170450.77554.bc

41. Wang Y., Zhang Y., Zhang X., et al. A single posterior approach for multilevel modified vertebral column resection in adults with severe rigid congenital kyphoscoliosis: a retrospective study of 13 cases // *European Spine Journal*. 2008. Vol. 17, № 3. P. 361–372. doi: 10.1007/s00586-007-0566-9

42. Chen Z., Zeng Y., Li W., et al. Apical segmental resection osteotomy with dual axial rotation corrective technique for severe focal kyphosis of the thoracolumbar spine // *Journal of Neurosurgery: Spine*. 2011. Vol. 14, № 1. P. 106–113. doi: 10.3171/2010.9.SPINE10257

43. Chang K.-W., Cheng C.W., Chen H.C., Chang K.I., Chen T.C. Closing-opening wedge osteotomy for the treatment of sagittal imbalance // *Spine*. 2008. Vol. 33, № 13. P. 1470–1477. doi: 10.1097/BRS.0b013e3181753bcd

44. Patel A., Ruparel S., Dusat T., Mehta G., Kundnani V. Posterior-approach single-level apical spinal osteotomy in pediatric patients for severe rigid kyphoscoliosis: Long-term clinical and radiological outcomes // *Journal of Neurosurgery: Pediatrics*. 2018. Vol. 21, № 6. P. 606–614. doi: 10.3171/2017.12.PEDS17404

45. Akazawa T., Kotani T., Sakuma T., Nemoto T., Minami S. Rod fracture after long construct fusion for spinal deformity: clinical and radiographic risk factors // *Journal of Orthopaedic Science*. 2013. Vol. 18, № 6. P. 926–931. doi: 10.1007/s00776-013-0464-4

46. Auerbach J.D., Lenke L.G., Bridwell K.H., et al. Major complications and comparison between 3-column osteotomy techniques in 105 consecutive spinal deformity procedures // *Spine*. 2012. Vol. 37, № 14. P. 1198–1210. doi: 10.1097/BRS.0b013e31824fffd

47. Smith J.S., Shaffrey C.I., Ames C.P., et al. Assessment of symptomatic rod fracture after posterior instrumented fusion for adult spinal deformity // *Neurosurgery*. 2012. Vol. 71, № 4. P. 862–868. doi: 10.1227/NEU.0b013e3182672aab

48. Smith J.S., Shaffrey E., Klineberg E., et al. Prospective multicenter assessment of risk factors for rod fracture following surgery for adult spinal deformity // *Journal of Neurosurgery: Spine*. 2014. Vol. 21, № 6. P. 994–1003. doi: 10.3171/2014.9.SPINE131176

49. Wang F., et al. Risk factors for rod fracture in patients with severe kyphoscoliosis following posterior vertebral column resection // *Chinese Journal of Orthopaedics*. 2012. P. 946–950.

50. Кулешов А.А., Ветрилэ М.С., Лисянский И.Н., Макаров С.Н., Соколова Т.В. Хирургическое лечение пациента с врождённой деформацией позвоночника, аплазией корней дуг грудных и поясничных позвонков, компрессионным спинальным синдромом // *Хирургия позвоночника*. 2016. Т. 13, № 3. С. 41–48. doi: 10.14531/ss2016.3.41-48

REFERENCES

1. Papaliadis DN, Bonanni PG, Roberts TT, et al. Computer assisted Cobb angle measurements: A novel algorithm. *International Journal of Spine Surgery*. 2017;11(3):167–172. doi: 10.14444/4021

2. Goel SA, Neshar AM, Chhabra HS. A rare case of surgically managed multiple congenital thoraco-lumbar and lumbar block vertebrae with kypho-scoliosis and adjacent segment disease with myelopathy in a young female. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*. 2020;11(2):291–294. doi: 10.1016/j.jcot.2019.04.017

3. Sugimoto Y, Ito Y, Tanaka M, et al. Cervical cord injury in patients with ankylosed spines: progressive paraplegia in two patients after posterior fusion without decompression. *Spine*. 2009;34(23):E861–3. doi: 10.1097/BRS.0b013e3181bb89fc

4. Winter RB, Moe JH, Wang JF. Congenital kyphosis: its natural history and treatment as observed in a study of one hundred and thirty patients. *JBJS*. 1973;55(2): 223–274.

5. McMaster MJ, Singh H. Natural history of congenital kyphosis and kyphoscoliosis. A study of one hundred and twelve patients. *The Journal of bone and joint surgery. American volume*. 1999;81(10):1367–1383. doi: 10.2106/00004623-199910000-00002
6. Ulrich EV, Mushkin AY, Rubin AV. Congenital spinal deformities in children: prognosis of epidemiology and management tactics. *Hirurgiya pozvonochnika*. 2009;(2):55–61. doi: 10.14531/ss2009.2.55-61
7. Singh K, Samartzis D, An HS. Neurofibromatosis type I with severe dystrophic kyphoscoliosis and its operative management via a simultaneous anterior-posterior approach: A case report and review of the literature. *Spine Journal*. 2005;5(4):461–466.
8. Kleinberg S, Kaplan A. Scoliosis complicated by paraplegia. *J Bone Joint Surg Am*. 1952;34-A(1):162–7.
9. Maxwell JA, Kahn EA. Spinal cord traction producing an ascending, reversible, neurological deficit. *Case Report*. 1969;(31):459–461.
10. Maxwell AKE. Spinal cord traction producing an ascending, reversible, neurological deficit. Case report. *Verhandlungen der Anatomischen Gesellschaft*. 1967;(115):49–69.
11. Dommissie G. The blood supply of the spinal cord. A critical vascular zone in spinal surgery. *J Bone Joint Surg Br*. 1974;56(2):225–35.
12. Breig A, Braxton V. *Biomechanics of the central nervous system: some basic normal and pathologic phenomena*. Stockholm: Almqvist & Wiksell; 1960. 183 p.
13. Mironov SP, Vetrile ST, Natsvlshvili ZG, Morozov AK, Krupatkin AI. Assessment of the features of spinal circulation, microcirculation in the membranes of the spinal cord and neurovegetative regulation in scoliosis. *Hirurgiya pozvonochnika*. 2006;(3):38–48. doi: 10.14531/SS2006.3.38-48
14. Pilcher JE. The Surgery of the Brain and Spinal Cord. *Annals of surgery*. 1888;8(4):261–283. doi: 10.1097/0000658-188807000-00124
15. Ménard DV. *Étude pratique sur le mal de Pott, par le Dr V. Ménard...* Paris: Masson; 1900.
16. Ahlgren BD, Herkowitz HN. A modified posterolateral approach to the thoracic spine. *Journal of spinal disorders*. 1995;8(1):69–75.
17. Lonstein JE, Winter RB, Moe JH, et al. Neurologic deficits secondary to spinal deformity: A review of the literature and report of 43 cases. *Spine*. 1980;5(4):331–355. doi: 10.1097/00007632-198007000-00007
18. Hyndman OR. Transplantation of the spinal cord; The problem of kyphoscoliosis with cord sign. *Surg Gynec Obstet*. 1947;84(4):460–464.
19. Love JG. Transplantation of the spinal cord for the relief of paraplegia. *AMA Archives of Surgery*. 1956;73(5):757–763. doi: 10.1001/archsurg.1956.01280050025006
20. Barber JB, Epps CH. Antero-lateral transposition of the spinal cord for paraparesis due to congenital scoliosis. *Journal of the National Medical Association*. 1968;60(3):169–72.
21. Cantore GP, Ciappetta P, Costanzo G, Raco A, Salvati M. Neurological deficits secondary to spinal deformities: their treatment and results in 13 patients. *European neurology*. 1989;29(4):181–185. doi: 10.1159/000116407
22. Lenke LG, Newton PO, Sucato DJ, et al. Complications after 147 consecutive vertebral column resections for severe pediatric spinal deformity: A multicenter analysis. *Spine*. 2013;38(2):119–132. doi: 10.1097/BRS.0b013e318269fab1
23. McKenzie KG, Dewar FP. Scoliosis with paraplegia. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume*. 1949;31B(2):162–174.
24. Shenouda EF, Nelson IW, Nelson RJ. Anterior transvertebral transposition of the spinal cord for the relief of paraplegia associated with congenital cervicothoracic kyphoscoliosis: Technical note. *Journal of Neurosurgery: Spine*. 2006;5(4):374–379. doi: 10.3171/spi.2006.5.4.374
25. Loniewski de Ninina X, Dubousset JF. Place de la traction et du temps antérieur dans le traitement chirurgical des cyphoses et cyphoscolioses avec l'instrumentation «C.D.» chez l'enfant. *International Orthopaedics*. 1994;18(4):195–203. doi: 10.1007/BF00188322
26. Novikov VV, Vasyura AS, Lebedeva MN, Mikhaylovskiy MV, Sadovoy MA. Surgical management of neurologically complicated kyphoscoliosis using transposition of the spinal cord: Case report. *International Journal of Surgery Case Reports*. 2016;27:13–17. doi: 10.1016/j.ijscr.2016.07.037
27. Delecric J, et al. Various mechanisms of spinal cord injury during scoliosis surgery. In: *Neurological Complications of Spinal Surgery. Proceedings of the 11th GICD Congress*. Arcachon, France; 1994. P. 13–14.
28. Kawahara N, Tomita K, Baba H, et al. Closing-opening wedge osteotomy to correct angular kyphotic deformity by a single posterior approach. *Spine*. 2001;26(4):391–402. doi: 10.1097/00007632-200102150-00016
29. Shimode M, Kojima T, Sowa K. Spinal wedge osteotomy by a single posterior approach for correction of severe and rigid kyphosis or kyphoscoliosis. *Spine*. 2002;27(20):2260–2267. doi: 10.1097/00007632-200210150-00015
30. Shono Y, Abumi K, Kaneda K. One-stage posterior hemivertebra resection and correction using segmental posterior instrumentation. *Spine*. 2001;26(7):752–757. doi: 10.1097/00007632-200104010-00011
31. Leatherman KD. The management of rigid spinal curves. *Clinical Orthopaedics and Related Research*®. 1973;(93):215–224. doi: 10.1097/00003086-197306000-00021
32. Roberson JR, Whitesides TE Jr. Surgical reconstruction of late post-traumatic thoracolumbar kyphosis. *Spine*. 1985;10(4):307–312. doi: 10.1097/00007632-198505000-00003
33. Smith JT, Gollogly S, Dunn HK. Simultaneous anterior-posterior approach through a costotransversectomy for the treatment of congenital kyphosis and acquired kyphoscoliotic deformities. *Journal of Bone and Joint Surgery*. 2005;87(10):2281–2289. doi: 10.2106/JBJS.D.01795
34. Song KS, Chang BS, Yeom JS, et al. Surgical treatment of severe angular kyphosis with myelopathy: Anterior and posterior approach with pedicle screw instrumentation. *Spine*. 2008;33(11):1229–1235. doi: 10.1097/BRS.0b013e31817152b3
35. Chen PC, Chang CC, Chen HT, et al. The Accuracy of 3D Printing Assistance in the Spinal Deformity Surgery. *BioMed Research International*. 2019;7196528. doi: 10.1155/2019/7196528
36. Ishida K, Aota Y, Uesugi M, et al. Late Onset of Thoracic Myelopathy with Type 2 Congenital Deformity: A Case Report. *The Open Spine Journal*. 2010;2:21–23.
37. Lenke LG, Sides BA, Koester LA, Hensley M, Blanke KM. Vertebral column resection for the treatment of severe spinal deformity. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 2010;468(3):687–699. doi: 10.1007/s11999-009-1037-x

38. Schwab F, Blondel B, Chay E, et al. The comprehensive anatomical spinal osteotomy classification. *Neurosurgery*. 2015;76(1 suppl):S33–S41. doi: 10.1227/NEU.0000000000001820
39. Shi B, Shi B, Liu D, et al. Scoliosis research society-schwab grade 6 osteotomy for severe congenital angular kyphoscoliosis: An analysis of 17 cases with a minimum 2-year follow-up. *Neurosurgery*. 2020;87(5):925–930. doi: 10.1093/neuros/nyaa055
40. Chang K-W, Chen YY, Lin CC, Hsu HL, Pai KC. Apical lordosating osteotomy and minimal segment fixation for the treatment of thoracic or thoracolumbar osteoporotic kyphosis. *Spine*. 2005;30(14):1674–1681. doi: 10.1097/01.brs.0000170450.77554.bc
41. Wang Y, Zhang Y, Zhang X, et al. A single posterior approach for multilevel modified vertebral column resection in adults with severe rigid congenital kyphoscoliosis: a retrospective study of 13 cases. *European Spine Journal*. 2008;17(3):361–372. doi: 10.1007/s00586-007-0566-9
42. Chen Z, Zeng Y, Li W, et al. Apical segmental resection osteotomy with dual axial rotation corrective technique for severe focal kyphosis of the thoracolumbar spine. *Journal of Neurosurgery: Spine*. 2011;14(1):106–113. doi: 10.3171/2010.9.SPINE10257
43. Chang K-W, Cheng CW, Chen HC, Chang KI, Chen TC. Closing-opening wedge osteotomy for the treatment of sagittal imbalance. *Spine*. 2008;33(13):1470–1477. doi: 10.1097/BRS.0b013e3181753bcd
44. Patel A, Ruparel S, Dusad T, Mehta G, Kundhani V. Posterior-approach single-level apical spinal osteotomy in pediatric patients for severe rigid kyphoscoliosis: Long-term clinical and radiological outcomes. *Journal of Neurosurgery: Pediatrics*. 2018;21(6):606–614. doi: 10.3171/2017.12.PEDS17404
45. Akazawa T, Kotani T, Sakuma T, Nemoto T, Minami S. Rod fracture after long construct fusion for spinal deformity: clinical and radiographic risk factors *Journal of Orthopaedic Science*. 2013;18(6):926–931. doi: 10.1007/s00776-013-0464-4
46. Auerbach JD, Lenke LG, Bridwell KH, et al. Major complications and comparison between 3-column osteotomy techniques in 105 consecutive spinal deformity procedures. *Spine*. 2012;37(14):1198–1210. doi: 10.1097/BRS.0b013e31824fffdde
47. Smith JS, Shaffrey CI, Ames CP, et al. Assessment of symptomatic rod fracture after posterior instrumented fusion for adult spinal deformity. *Neurosurgery*. 2012;71(4):862–868. doi: 10.1227/NEU.0b013e3182672aab
48. Smith JS, Shaffrey E, Klineberg E, et al. Prospective multicenter assessment of risk factors for rod fracture following surgery for adult spinal deformity. *Journal of Neurosurgery: Spine*. 2014;21(6):994–1003. doi: 10.3171/2014.9.SPINE131176
49. Wang F, et al. Risk factors for rod fracture in patients with severe kyphoscoliosis following posterior vertebral column resection. *Chinese Journal of Orthopaedics*. 2012:946–950.
50. Kuleshov AA, Vetrile MS, Lisyansky IN, Makarov SN, Sokolova TV. Surgical treatment of a patient with congenital spinal deformity, aplasia of the roots of the arches of the thoracic and lumbar vertebrae, spinal compression syndrome. *Hirurgiya pozvonochnika*. 2016;13(3):41–48. doi: 10.14531/ss2016.3.41-48

ОБ АВТОРАХ

Назаренко Антон Герасимович, д-р мед. наук, профессор РАН;
ORCID: 0000-0003-1314-2887;
eLibrary SPIN: 1402-5186;
e-mail: nazarenkoag@cito-priorov.ru

Кулешов Александр Алексеевич, д-р мед. наук;
ORCID: 0000-0002-9526-8274;
eLibrary SPIN: 7052-0220;
e-mail: cito-spine@mail.ru

*** Милица Игорь Михайлович**;
адрес: Россия, 127299, Москва, ул. Приорова, 10;
ORCID: 0009-0005-9832-316X;
eLibrary SPIN: 4015-8113;
e-mail: igor.milica@mail.ru

Ветрилэ Марчел Степанович, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0001-6689-5220;
eLibrary SPIN: 9690-5117;
e-mail: vetrilams@cito-priorov.ru

Лисянский Игорь Николаевич, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0002-2479-4381;
eLibrary SPIN: 9845-1251;
e-mail: lisigornik@list.ru

Макаров Сергей Николаевич, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0003-0406-1997;
eLibrary SPIN: 2767-2429;
e-mail: moscow.makarov@gmail.com

AUTHORS' INFO

Anton G. Nazarenko, MD, Dr. Sci. (Medicine), professor of RAS;
ORCID: 0000-0003-1314-2887;
eLibrary SPIN: 1402-5186;
e-mail: nazarenkoag@cito-priorov.ru

Alexander A. Kuleshov, MD, Dr. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0002-9526-8274;
eLibrary SPIN: 7052-0220;
e-mail: cito-spine@mail.ru

*** Igor M. Militsa**;
address: 10 Priorova str., 127299 Moscow, Russia;
ORCID: 0009-0005-9832-316X;
eLibrary SPIN: 4015-8113;
e-mail: igor.milica@mail.ru

Marchel S. Vetrile, MD, Cand. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0001-6689-5220;
eLibrary SPIN: 9690-5117;
e-mail: vetrilams@cito-priorov.ru

Igor N. Lisyansky, MD, Cand. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0002-2479-4381;
eLibrary SPIN: 9845-1251;
e-mail: lisigornik@list.ru

Sergey N. Makarov, MD, Cand. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0003-0406-1997;
eLibrary SPIN: 2767-2429;
e-mail: moscow.makarov@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto627103>

Переломы дистального метаэпифиза лучевой кости: обзор литературы

Д.А. Бессонов^{1,2}, М.Е. Бурцев¹, А.В. Фролов^{1,2}, М.Е. Саутин¹, Б.М. Газимиева^{1,2},
И.А. Васильев^{1,2}, А.В. Королев^{1,2}

¹ Европейская клиника спортивной травматологии и ортопедии, Москва, Россия;

² Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Представленный обзор литературы посвящён такой насущной проблеме, как перелом дистального метаэпифиза лучевой кости. Актуальность обзора обусловлена высокой распространённостью и растущей частотой данного типа переломов, а также большим количеством противоречий, сопровождающих практически каждый аспект этой патологии. Несмотря на внушительный объём данных, посвящённых переломам дистального конца лучевой кости, в современной научной литературе отмечается отсутствие общепринятых алгоритмов лечения данной патологии верхней конечности. Подавляющее большинство научных статей по данной проблематике имеют низкую степень научной доказательности. Всё это говорит о необходимости дальнейших исследований, обладающих достаточной научной доказательностью, в первую очередь рандомизированных контролируемых испытаний. Не менее важными являются систематизация и осмысление уже известной информации, чему и посвящён этот обзор. Данный обзор носит аналитический характер и проведён с использованием баз данных медицинской литературы и поисковых ресурсов PubMed (MEDLINE), Google Scholar и eLibrary. В представленном обзоре затронуты следующие аспекты: анатомия, диагностика, классификация, консервативное и хирургическое лечение, а также послеоперационное ведение переломов дистального метаэпифиза лучевой кости. Особое внимание уделено различным техникам хирургического лечения, описаны достоинства и недостатки наиболее распространённых хирургических методик.

Ключевые слова: перелом; лучевая кость; дистальный отдел лучевой кости; кисть; ладонная пластина; остеосинтез; хирургическое лечение; консервативное лечение.

Как цитировать:

Бессонов Д.А., Бурцев М.Е., Фролов А.В., Саутин М.Е., Газимиева Б.М., Васильев И.А., Королев А.В. Переломы дистального метаэпифиза лучевой кости: обзор литературы // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2024. Т. 31, № 3. С. 427–440. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto627103>

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto627103>

Distal radius fracture: review

Dmitrii A. Bessonov^{1,2}, Mikhail E. Burtsev¹, Alexandr V. Frolov^{1,2}, Maksim E. Sautin¹,
Bella M. Gazimieva^{1,2}, Ivan A. Vasilev^{1,2}, Andrey V. Korolev^{1,2}

¹ European Clinic of Sports Traumatology and Orthopaedics, Moscow, Russia;

² Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

ABSTRACT

The presented literature review is devoted to such a pressing problem as distal radius fracture. The relevance of the review is due to the high prevalence and increasing frequency of this type of fractures, as well as a large number of controversies accompanying almost every aspect of this pathology. Despite the impressive amount of data devoted to distal radius fractures, modern scientific literature shows the absence of generally accepted algorithms for the treatment of this pathology of the upper extremity. The overwhelming majority of scientific articles on this problem have a low degree of scientific evidence. All this suggests the need for further studies with sufficient scientific evidence, primarily randomized controlled trials. Systematization and comprehension of the already known information are equally important, and this review is devoted to it. This review is analytical in nature and was conducted using medical literature databases and search resources PubMed (MEDLINE), Google Scholar and eLibrary. The following aspects are covered: anatomy, diagnosis, classification, conservative and surgical treatment, and postoperative management of fractures of the distal metaepiphysis of the radius. Special attention is paid to various surgical treatment techniques, and the advantages and disadvantages of the most common surgical methods are described.

Keywords: fracture; radius; distal radius; wrist; volar plate; osteosynthesis; surgical treatment; conservative treatment.

To cite this article:

Bessonov DA, Burtsev ME, Frolov AV, Sautin ME, Gazimieva BM, Vasilev IA, Korolev AV. Distal radius fracture: review. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2024;31(3):427–440. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto627103>

ВВЕДЕНИЕ

Переломы дистального метаэпифиза лучевой кости (ДМЭЛК) являются одними из самых распространённых переломов у взрослого населения [1], и их количество ежегодно увеличивается [2]. При этом среди взрослых до 48% случаев переломов ДМЭЛК приходится на работоспособное население [2].

В литературе нет единого мнения относительно выбора между консервативным или хирургическим методами лечения, а современные данные о превосходстве каждого из методов лечения разнятся.

Общепризнано, что хирургическое лечение обеспечивает анатомическую репозицию, стабильную фиксацию, способствующие более раннему началу реабилитации, сокращению сроков нетрудоспособности и профилактике остеоартроза. Всё это находит своё отражение в увеличении процента хирургического лечения по отношению к консервативному. Так, в 2005 г. около 86% терапии переломов дистального отдела лучевой кости приходилось на консервативное лечение, а в 2014 году этот показатель составлял уже 77,5%. В то же время количество пациентов, для лечения которых использовалась внутренняя фиксация, увеличилось с 8,75% в 2005 г. до 20,02% в 2014 г. [3].

Появляются новые подходы к классификации и хирургическому лечению переломов дистального отдела лучевой кости. В 2016 году P. Brink и D. Rikli благодаря данным компьютерной томографии создали новую классификацию "four-corner concept", где ввели понятие ключевого фрагмента [4]. В 2020 году W. Hintringer и соавт. представили классификацию, основанную на понятии ключевого фрагмента.

Понимание биомеханики переломов дистального отдела лучевой кости и основанные на этом классификации позволяют с новой стороны подойти к вопросу хирургического лечения данного типа повреждения. Всё больше внимания уделяется концепции фрагмент-специфичной фиксации при переломах ДМЭЛК [5–7]. Также популярность набирают способы мини-инвазивного остеосинтеза переломов дистального отдела лучевой кости [8–10].

Всё это указывает на необходимость более глубокого понимания современных классификаций, методов и результатов лечения переломов ДМЭЛК. Данная статья представляет собой обзор проблемы лечения переломов дистального отдела лучевой кости с учётом актуальной литературы.

МЕТОДОЛОГИЯ ПОИСКА ИСТОЧНИКОВ

Поиск и отбор источников проведены с использованием баз данных медицинской литературы и поисковых ресурсов PubMed (MEDLINE), Google Scholar и eLibrary по следующим ключевым словам: «distal radius», «distal radius fracture», «дистальный отдел лучевой кости», «дистальный метаэпифиз лучевой кости», «перелом

дистального метаэпифиза лучевой кости», «перелом дистального отдела лучевой кости». Первая часть обзора посвящена общим вопросам и анатомии дистального конца лучевой кости. Далее подробно описаны классификация, диагностика и лечение переломов ДМЭЛК.

ОБСУЖДЕНИЕ

Анатомия

Ладьевидная ямка, полулунная ямка и сигмовидная вырезка являются суставными поверхностями дистального отдела лучевой кости и вогнуты по отношению к проксимальному ряду костей запястья [11].

Передняя поверхность вогнута, наклонена вперёд, и к ней прилежит квадратный пронатор. По передней поверхности лучевой кости проходит линия водораздела (рис. 1), впервые описанная Nelson и Orbay [12]. Линия водораздела — это условная линия, обозначающая наиболее выступающий в ладонном направлении отдел лучевой кости [12]. Клиническое значение линии водораздела было описано M. Soong и соавт.: пластины, выступающие за линию водораздела, увеличивают риск повреждения сухожилий сгибателей [13, 14]. Описана также линия, расположенная на 3–5 мм проксимальнее линии водораздела и соответствующая месту прикрепления дистальной части квадратного пронатора, — линия квадратного пронатора (рис. 1) [15].

Латеральная поверхность проходит вдоль латерального края лучевой кости, образуя шиловидный отросток. Дистальная часть шиловидного отростка служит местом прикрепления суставной капсулы и капсульного утолщения коллатеральной связки. Более проксимальная область

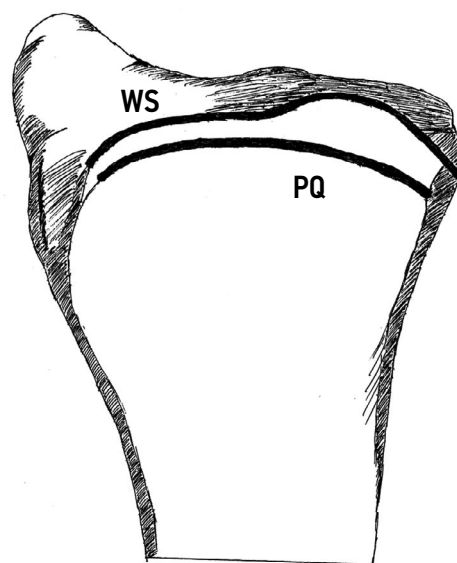


Рис. 1. Передняя поверхность дистального отдела лучевой кости с обозначением линии водораздела (WS) и линии квадратного пронатора (PQ).

Fig. 1. Anterior surface of the radius with the watershed line (WS) and pronator quadratus (PQ) line indicated.

у основания шиловидного отростка обеспечивает прикрепление плечелучевой мышцы.

Задняя поверхность дистального отдела лучевой кости неровная, выпуклая и служит точкой опоры для сухожилия разгибателя. Выступающий дорсальный бугорок (бугорок Листера) лежит в 5–10 мм от дистальной суставной поверхности. На медиальной стороне бугорка Листера имеется гладкая борозда для прохождения сухожилия длинного разгибателя большого пальца. Установлено, что расстояние между линией квадратного пронатора и вершиной бугорка Листера составляет примерно 22 мм, что может иметь клиническое значение, влияя на выбор длины винта хирургом при остеосинтезе переломов ДМЭЛК [15]. Также, согласно недавним исследованиям, переломы бугорка Листера [16, 17] и даже его форма [18] могут служить предрасполагающим фактором разрыва длинного разгибателя большого пальца при переломах ДМЭЛК.

Медиальная поверхность дистального отдела лучевой кости представлена сигмовидной вырезкой с суставной поверхностью. Дистальный отдел лучевой кости вращается вокруг головки локтевой кости благодаря вогнутой форме сигмовидной вырезки.

Согласно D. Rikli и P. Regazzoni [19], дистальный отдел лучевой и локтевой кости, лучезапястный сустав и дистальный лучелоктевой сустав можно анатомически условно представить как модель, состоящую из трёх колонн: лучевой, промежуточной и локтевой (рис. 2).

Лучевая колонна образована шиловидным отростком лучевой кости, ладьевидной ямкой и является местом прикрепления луче-ладьевидно-головчатой, длинной луче-полулунной связок и плечелучевой мышцы. Лучевая колонна служит опорой для запястья при лучевой и локтевой девиации, а её связочный аппарат препятствует трансляции запястья в лучевую сторону. При переломе

тяги плечелучевой мышцы в месте её прикрепления к лучевой колонне может вызвать смещение по высоте и в лучевую сторону.

Промежуточная колонна образована полулунной ямкой и сигмовидной вырезкой. На неё приходится основная осевая нагрузка, именно ей необходимо уделять основное внимание при оценке конгруэнтности сустава и механической оси запястья.

Локтевая колонна представлена дистальным отделом локтевой кости и треугольным фиброзно-хрящевым комплексом. Локтевая колонна является ключевой для стабильности дистального лучелоктевого сустава и ротации предплечья.

Диагностика

Рентгенография

Рутинное обследование при подозрении на перелом дистального отдела лучевой кости включает рентгенографию лучезапястного сустава в прямой, боковой проекциях. Также существует несколько проекций, позволяющих более детально оценить состояние суставной поверхности, а в случае хирургического лечения с использованием пластин — изучить положение проведённых винтов [20]. К этим проекциям относятся боковая проекция с наклоном 15–30° [21, 22], косая проекция с пронацией под углом 45° [20, 23] и дорсальная тангенциальная проекция (рис. 3) [21, 24].

Существует пять основных рентгенографических показателей для оценки дистального отдела лучевой кости:

- высота лучевой кости;
- наклон лучевой кости (лучевая инклинация, наклон ДМЭЛК во фронтальной плоскости);
- вариант локтевой кости;
- ладонный наклон (наклон ДМЭЛК в сагиттальной плоскости);
- лучевое смещение.

Также следует оценивать внутрисуставное смещение, смещение сигмовидной вырезки, конгруэнтность дистального лучелоктевого сустава и наличие переломов шиловидного отростка локтевой кости.

Компьютерная томография

Неустранимое внутрисуставное смещение при переломах ДМЭЛК более 2 мм в 100% случаев приводит к посттравматическому артрозу [25] и является одним из основных показаний к хирургическому лечению. Именно компьютерная томография (КТ) является незаменимым инструментом для оценки повреждения суставной поверхности при переломах ДМЭЛК и в этом отношении имеет преимущество перед рентгенографией [26, 27]. Идентификация наличия и степени повреждения суставной поверхности важна при оценке переломов дистального отдела лучевой кости с точки зрения предоперационного планирования [21].

Компьютерная томография помогает при классификации [28], определении состояния дистального

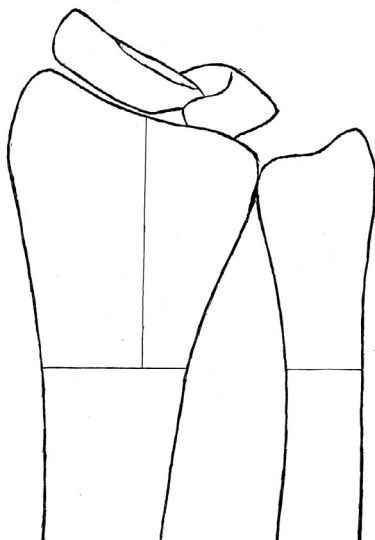


Рис. 2. Колонная модель D. Rikli и P. Regazzoni.

Fig. 2. The three-column model by D. Rikli and P. Regazzoni.

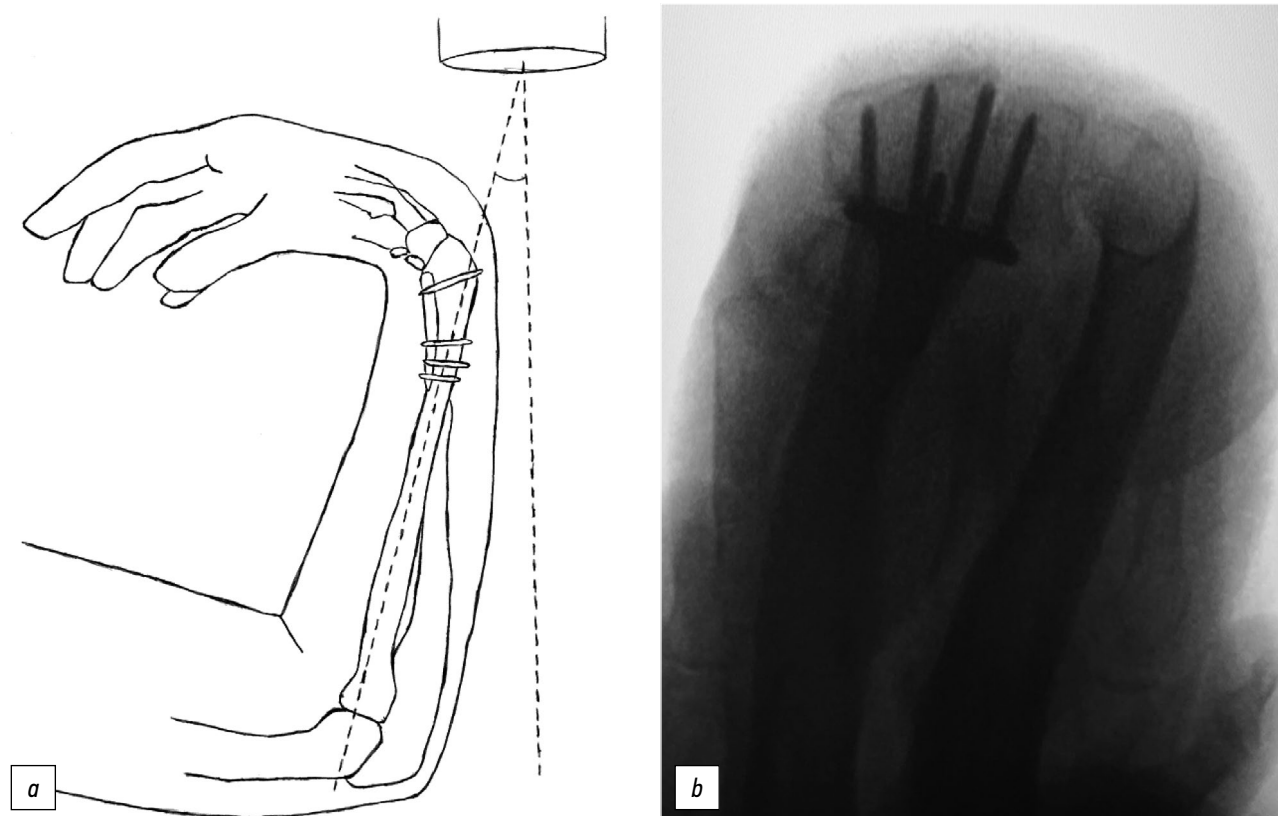


Рис. 3. Дорсальная тангенциальная проекция: *a* — схематическое изображение, *b* — изображение с электронно-оптического преобразователя.

Fig. 3. Dorsal tangential view: *a* — schematic representation, *b* — C-arm image.

лучелоктевого сустава [26], оценке степени сращения кости. Немаловажной является роль КТ в послеоперационной оценке, особенно для определения корректности проведения винтов, где она вновь показывает своё преимущество перед рентгенографией [29].

Также имеются актуальные данные, указывающие на пользу применения КТ интраоперационно [30].

Магнитно-резонансная томография

Магнитно-резонансная томография не является первоочередным исследованием и не обладает преимуществами перед рентгенографией и КТ при установлении диагноза перелома ДМЭЛК, однако может быть полезным диагностическим инструментом для определения повреждения связок и мягких тканей, ассоциированных с этими переломами [21].

Классификация

Существует множество классификаций переломов ДМЭЛК. Первые классификации, до появления рентгена, основывались только на клинических признаках. В первую очередь к ним относятся различные эпонимы, такие как перелом Смита, «перелом шофёра» и т.д. Они помогают запомнить симптомы и механизм травмы, однако бесполезны для описания тяжести травмы или определения показаний к хирургическому лечению. С появлением

и введением в медицинскую практику рентгенографии появляются и развиваются классификации, основанные на данных этого исследования: Nissen-Lie (1939), Gartland & Werley (1951), Lidström (1959), Older's (1965). Frykman (1967) был одним из первых, кто осознал важность переломов шиловидного отростка локтевой кости. В основу классификации Melone (1984) легла степень повреждения суставной поверхности. В 1992 году клиника Майо предложила собственную классификацию, аналогичную классификации Frykman. Основное внимание в ней уделяется распространению перелома на лучезапястный или лучелоктевой сустав. За основу классификации Fernandez, предложенной в 1993 г., был взят механизм повреждения.

Наиболее полная классификация, классификация АО (Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen), была разработана Мюллером и его коллегами в 1986 г. и включала 27 описаний. Позже она была изменена и стала включать три категории, основанные на вовлечении сустава (внесуставной, частично суставной и полный суставной), с тремя подтипами, дополнительно описывающими характер перелома. В дальнейшем классификация АО была обновлена и доработана с выходом нового справочника по классификации переломов и вывихов (2018). Так, согласно обновлённой классификации, было принято решение классифицировать перелом лучевой и локтевой

костей отдельно друг от друга, а при полных внутрисуставных переломах (тип C) были добавлены уточнения (квалификации), указывающие на стабильность дистального лучелоктевого сустава.

Такое разнообразие классификаций обусловлено отсутствием универсальной надёжной и удобной в использовании классификации переломов ДМЭЛК. Классификации в медицине не только являются инструментами для удобного общения между врачами в клинической практике и научной деятельности, но и в идеале направляют лечение. Для этого они должны быть релевантными, воспроизводимыми, надёжными, надлежащим образом проверенными и, что наиболее важно, простыми в использовании и понимании. По данным литературы, многочисленные классификации переломов ДМЭЛК не соответствуют данным требованиям в полной мере [28, 31, 32]. Это указывает на целесообразность появления новых классификаций, обладающих необходимыми параметрами. И новые классификации действительно появляются: “four-corner concept”, описанная P. Brink и D. Rikli в 2016 году, и классификация W. Hintringer (2020). Насколько удачными являются данные классификации, остаётся предметом для последующих исследований.

Лечение

Целью успешного консервативного или хирургического лечения является восстановление анатомии. Восстановить анатомические взаимоотношения далеко не всегда удаётся идеально, однако существуют общепринятые рентгенографические критерии приемлемого смещения отломков. К ним относятся укорочение лучевой кости менее 2 мм, наклон лучевой кости не менее 10 градусов, от 10 градусов тыльного и до 20 градусов ладонного смещения, а также внутрисуставное смещение менее 2 мм.

Закрытая репозиция и гипсовая иммобилизация

Несмотря на активное развитие и совершенствование хирургической техники, появление новых металлофиксаторов, консервативное лечение переломов ДМЭЛК путём закрытой репозиции и гипсовой иммобилизации исторически было и остаётся основным методом лечения стабильных переломов ДМЭЛК без значительного смещения отломков. Также консервативному лечению, причём с меньшей оглядкой на стабильность, отдаётся предпочтение у лиц пожилого возраста (65 лет и старше). Большинство актуальных исследований, направленных на сравнение результатов консервативного и хирургического лечения у пожилых больных, указывают на отсутствие значимой разницы в среднесрочных и долгосрочных функциональных результатах у обеих групп пациентов при меньшем количестве осложнений у лиц консервативной группы [33–36]. Тем не менее существуют данные, демонстрирующие лучшие функциональные результаты у оперированных пациентов моложе 60 лет [35].

Чрескожный остеосинтез спицами

Техника чрескожного остеосинтеза спицами при переломах ДМЭЛК впервые была предложена в 1908 году A. Lambotte, который первым использовал для фиксации одну спицу, проведённую через шиловидный отросток лучевой кости [37]. С тех пор данная техника подвергалась различным дополнениям и модификациям: изменялись количество, положение и точки введения спиц. Говоря о чрескожной фиксации спицами, невозможно не упомянуть о технике Karandji, впервые описанной в 1976 году. Со временем большую популярность начал завоевывать остеосинтез ладонными пластинами, что объясняется преимуществами, которые, как предполагается, обеспечивает данная техника. Считается, что открытая репозиция и внутренняя фиксация с помощью ладонной пластины обеспечивают лучшую анатомическую репозицию и стабильность фиксации и что данная техника превосходит фиксацию спицами с точки зрения биомеханики. И действительно, согласно данным актуальных метаанализов, остеосинтез пластиной на ранних сроках после операции (3 и 6 месяцев) демонстрирует определённые преимущества по сравнению с остеосинтезом спицами: более высокий балл по шкале DASH [38, 39], больший объём движений [38, 40], лучшую силу хвата [40]. Тем не менее через год после операции все эти параметры не имеют клинически значимой разницы, и пациенты обеих групп отмечают отличные результаты лечения [38–40]. Такая же тенденция сохраняется и через 5 лет после операции [41]. При этом все авторы метаанализов сходятся во мнении, что остеосинтез спицами сопряжён с более высоким риском осложнений, а именно поверхностными инфекциями. С экономической точки зрения остеосинтез спицами является более дешёвым способом лечения переломов ДМЭЛК в сравнении с остеосинтезом волярной пластиной [42]. Таким образом, чрескожный остеосинтез спицами остаётся недорогим, простым и эффективным методом лечения переломов ДМЭЛК.

Внешняя фиксация

Внешняя фиксация представляет собой ещё один метод лечения переломов ДМЭЛК, основанный на принципе лигаментотаксиса. Показанием к использованию внешней фиксации является открытый перелом с дефектом мягких тканей, инфекционный процесс в области перелома, при котором противопоказано применение внутреннего фиксатора. Также данная техника может быть применена у пациентов с политравмой для временной или окончательной фиксации перелома ДМЭЛК. Актуальная литература по данной тематике в основном посвящена сравнению результатов лечения переломов ДМЭЛК с использованием внешней фиксации и внутренней фиксации ладонной пластиной [43–50]. В соответствии с данными этих исследований большинство авторов сходятся во мнении, что внутренняя фиксация пластиной является более выгодной согласно данным шкал [43, 44, 46, 50],

рентгенологическим показателям [43, 45, 47, 50], объёму движений [43, 45–47, 49, 50] и силе хвата [43, 46]. Однако многие из авторов отмечают, что чем меньше времени прошло с момента операции, тем более существенна разница по вышеописанным показателям. В отдалённом послеоперационном периоде, несмотря на сохраняющееся преимущество фиксации пластиной, разница между этими вариантами фиксации во многом нивелируется и зачастую не является статистически значимой [43, 46, 48]. Ещё одним недостатком внешней фиксации является более высокая частота осложнений по сравнению с внутренней фиксацией, включая инфекционные осложнения [50]. Существуют исследования, направленные на уменьшение частоты данных осложнений, в частности предлагается использование винтов, покрытых композитным материалом, состоящим из фактора роста фибробластов-2 и апатита [51].

Открытая репозиция и внутренняя фиксация пластиной (тыльная/ладонная/фрагмент-специфичная)

Тыльная пластина

В 1990-х годах при переломах ДМЭЛК стали широко использоваться тыльные пластины [52]. Внутренняя фиксация переломов дистального отдела лучевой кости применяется в случаях значительного дорсального оскольчатого перелома и/или дорсального смещения. Однако довольно быстро тыльные пластины потеряли популярность из-за сообщений о высокой частоте раздражения сухожилий и разрывов длинного разгибателя большого пальца [53]. В результате тыльные пластины требуют удаления гораздо чаще, чем ладонные. По данным разных авторов, частота удаления тыльных пластин колеблется от 8 до 51% [54]. Тем не менее современный дизайн тыльных пластин позволяет добиться результатов, сравнимых с ладонными пластинами не только функционально и рентгенологически [55, 56], но и в отношении частоты послеоперационных осложнений [54, 56, 57].

Ладонная пластина

После появления ладонной пластины в начале 2000-х годов все больше внимания при лечении переломов ДМЭЛК стало уделяться внутренней фиксации именно этой пластиной, которая считается более совершенной по сравнению с тыльной. Хирургический доступ при данной технике является более физиологическим и лучше сохраняет метафизарное кровоснабжение [58]. К недостаткам ладонных пластин относят такие осложнения, как разрыв длинного сгибателя большого пальца кисти (из-за трения при выступании пластины дистальнее линии водораздела), проникновение винтов в сустав и раздражение сухожилий разгибателей, вызванное выступающими винтами в дорсальном кортикале. Существует большое количество обзоров и метаанализов, сравнивающих остеосинтез ладонной пластиной и другие хирургические

техники, используемые при переломах ДМЭЛК [38–41, 43–50, 55, 56]. Несмотря на количество исследований, консенсуса относительно того, какой вид фиксации является лучшим с точки зрения функции при переломах ДМЭЛК, до сих пор не существует. Тем не менее случаев удаления волярных пластин отмечается меньше, чем тыльных. Так, согласно обзору М. Yamamoto и соавт., включающему 52 статьи и 3690 пациентов, средняя частота удаления пластин составила 9% [59].

Фрагмент-специфичная фиксация

При фрагмент-специфичном остеосинтезе используются различные комбинации небольших низкопрофильных пластин или других металлофиксаторов, которые обеспечивают различные комбинации конструкций в зависимости от картины перелома и задействованных фрагментов. Фрагмент-специфичная фиксация обычно показана в тех случаях, когда требуется стабилизация определённых, как правило, внутрисуставных, фрагментов перелома [6]. Кроме того, данный вид фиксации может использоваться в качестве аугментации в комбинации с применением стандартных пластин [6]. Эта методика технически сложна, зависит от опыта хирурга, как правило, требует больше времени и более одного хирургического доступа. Пока нет достаточного количества информации, чтобы сделать однозначные выводы об эффективности фрагмент-специфичной фиксации в сравнении с более традиционными видами хирургического лечения. Данные исследований показывают, что фрагмент-специфичная фиксация является возможной опцией при лечении сложных внутрисуставных переломов ДМЭЛК, однако результаты лечения сопоставимы с таковыми при остеосинтезе ладонной пластиной [60].

Артроскопия

Артроскопия кистевого сустава при внутрисуставных переломах ДМЭЛК, впервые получившая распространение в 1990-х годах, продолжает быстро развиваться и завоевывать популярность [61]. Основными целями артроскопии при остеосинтезе внутрисуставных переломов являются достижение более точной анатомической репозиции, оценка и при необходимости восстановление сопутствующих связочных повреждений, а также удаление свободных остеохондральных тел (дебридмент). Большинство исследований свидетельствует в пользу того, что артроскопия действительно играет важную роль в диагностике повреждений связок, а также даёт возможность одномоментного лечения этих повреждений [61–64]. Положительное влияние артроскопии на восстановление суставной поверхности является более спорной темой. Так, в 10-летнем литературном обзоре М. Saab и соавт. отмечают, что некоторые исследования свидетельствуют о лучшем восстановлении конгруэнтности суставных поверхностей с помощью артроскопии, но другие, особенно последние, дают менее убедительные результаты [64].

Согласно рандомизированному мультицентровому исследованию С.А. Selles и соавт., артроскопический дебридмент при остеосинтезе внутрисуставных переломов ДМЭЛК не улучшает результаты лечения в сравнении с остеосинтезом без артроскопии [65]. Тем не менее все авторы исследований единогласны в том, что для более объективного определения роли артроскопии при внутрисуставных переломах ДМЭЛК необходимо больше рандомизированных исследований среди больших однородных групп пациентов [61, 64, 66].

Иммобилизация и реабилитация

Одним из основных принципов лечения переломов АО является ранняя мобилизация, однако, несмотря на это, даже в случае хирургического лечения срок иммобилизации сильно разнится, порой достигая 6 недель [67]. Тем не менее авторы большинства актуальных исследований приходят к выводу, что иммобилизация после оперативного лечения переломов ДМЭЛК с помощью ладонной блокирующей пластины не требуется [67, 68]. К схожим выводам о том, что ранняя мобилизация положительно влияет на функцию оперированной конечности, приходят С. Zeckey и соавт. и S. Quadlbauer и соавт. в своих проспективных рандомизированных контролируемых исследованиях [69, 70].

Эпидемия COVID-19 внесла многочисленные изменения в ведение пациентов с переломами ДМЭЛК, в частности, значительно увеличила количество лиц, занимающихся самостоятельной реабилитацией [71]. Это увеличило интерес к сравнению результатов реабилитации, проводимой под контролем специалиста, и самостоятельной реабилитации. Эффективность данных вариантов реабилитации до сих пор не ясна. В многочисленных рандомизированных исследованиях сравнивались функциональные результаты пациентов, проходящих физиотерапию под контролем, с программами домашних упражнений. Большинство исследований предполагают, что программа упражнений на дому так же эффективна, как физиотерапия под наблюдением, и обеспечивает аналогичные функциональные результаты [67, 68, 72]. Тем не менее необходимы дальнейшие рандомизированные контролируемые исследования для оценки точной роли физиотерапии и необходимости физиотерапии в реабилитации переломов ДМЭЛК.

Выводы

Большое количество существующих исследований, посвящённых переломам ДМЭЛК, отличаются неоднозначными выводами. Одной из возможных причин такой тенденции может быть отсутствие единой общепризнанной и используемой всеми классификации. Из всех существующих классификаций наиболее надёжной является классификация АО, однако даже её воспроизводимость можно считать высокой только при разделении

перелома на типы (А, В и С). При попытке разделить переломы на подтипы (А1, А2 и т.д.) её воспроизводимость резко снижается [32].

Оптимальный метод фиксации при переломах дистального отдела лучевой кости остаётся предметом дискуссий. Несмотря на очевидную тенденцию увеличения процента хирургического лечения при данной патологии, консервативное лечение всё ещё является приемлемым методом выбора, особенно у пожилых пациентов [33–36]. При этом при хирургическом лечении общепризнанного метода, являющегося золотым стандартом, не существует. Это является следствием отсутствия достаточного количества рандомизированных исследований с высоким уровнем доказательности, убедительно показывающих преимущества какого-либо из методов хирургического лечения. Более того, по данным литературы, результаты лечения на сроке 1 год и более являются сопоставимыми при разных методах хирургического лечения. К такому же выводу приходит Американская академия хирургов-ортопедов в своих клинических рекомендациях [73].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для выработки стандартизированного подхода к лечению переломов ДМЭЛК сохраняется необходимость проведения проспективных рандомизированных контролируемых исследований, непосредственно сравнивающих различные оперативные и неоперативные методы лечения и акцентирующих внимание на оценке отдалённых результатов терапии. При этом система оценки лечения также нуждается в стандартизации.

На данный момент метод лечения переломов ДМЭЛК должен выбираться индивидуально в каждом конкретном случае, исходя из запросов и нужд пациента, но при этом основываясь на опыте хирурга.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: Д.А. Бессонов — сбор и анализ литературных источников, написание текста статьи; М.Е. Бурцев — написание и редактирование текста статьи; А.В. Фролов, М.Е. Саутин, Б.М. Газимиева, И.А. Васильев, А.В. Королев — редактирование текста статьи.

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

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

ADDITIONAL INFO

Author contribution. All authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication). The greatest contribution is distributed as follows: D.A. Bessonov — collection and analysis

of literary sources, writing the text of the article; M.E. Burtsev — editing and writing the text of the article; A.V. Frolov, M.E. Sautin, B.M. Gazimieva, I.A. Vasilev, A.V. Korolev — editing the text of the article.

Funding source. The authors state that there is no external funding when conducting the research and preparing the publication.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Court-Brown C.M., Caesar B. Epidemiology of adult fractures: A review // *Injury*. 2006. Vol. 37, № 8. P. 691–7. doi: 10.1016/j.injury.2006.04.130
2. Jerrhag D., Englund M., Karlsson M.K., Rosengren B.E. Epidemiology and time trends of distal forearm fractures in adults — a study of 11.2 million person-years in Sweden // *BMC Musculoskelet Disord*. 2017. Vol. 18, № 1. P. 240. doi: 10.1186/s12891-017-1596-z
3. Azad A., Kang H.P., Alluri R.K., et al. Epidemiological and Treatment Trends of Distal Radius Fractures across Multiple Age Groups // *Jnl Wrist Surg*. 2019. Vol. 8, № 4. P. 305–311. doi: 10.1055/s-0039-1685205
4. Brink P., Rikli D. Four-Corner Concept: CT-Based Assessment of Fracture Patterns in Distal Radius // *Jnl Wrist Surg*. 2016. Vol. 5, № 2. P. 147–151. doi: 10.1055/s-0035-1570462
5. Hintringer W., Rosenauer R., Pezzei C., et al. Biomechanical considerations on a CT-based treatment-oriented classification in radius fractures // *Arch Orthop Trauma Surg*. 2020. Vol. 140, № 5. P. 595–609. doi: 10.1007/s00402-020-03405-7
6. Hozack B.A., Tosti R.J. Fragment-Specific Fixation in Distal Radius Fractures // *Curr Rev Musculoskelet Med*. 2019. Vol. 12, № 2. P. 190–197. doi: 10.1007/s12178-019-09538-6
7. Mehta S.P., MacDermid J.C., Richardson J., MacIntyre N.J., Grewal R. Baseline Pain Intensity Is a Predictor of Chronic Pain in Individuals With Distal Radius Fracture // *J Orthop Sports Phys Ther*. 2015. Vol. 45, № 2. P. 119–127. doi: 10.2519/jospt.2015.5129
8. Liverneaux P.A. The minimally invasive approach for distal radius fractures and malunions // *J Hand Surg Eur Vol*. 2018. Vol. 43, № 2. P. 121–130. doi: 10.1177/1753193417745259
9. Максимов Б.И. Минимально инвазивный накостный остеосинтез дистального метаэпифиза лучевой кости: есть ли преимущества перед стандартной техникой? // *Травматология и ортопедия России*. 2020. Т. 26. № 1. С. 76–84. doi: 10.21823/2311-2905-2020-26-1-76-84
10. Minimally Invasive Plating of Distal Radius Fracture: A Series of 42 Cases and Review of Current Literature [Интернет]. Режим доступа: <https://www.hindawi.com/journals/mis/2023/3534849/> Дата обращения: 17.02.2024.
11. Kwon B.C., Lee J.K., Lee S.Y., Hwang J.Y., Seo J.H. Morphometric Variations in the Volar Aspect of the Distal Radius // *Clin Orthop Surg*. 2018. Vol. 10, № 4. P. 462–467. doi: 10.4055/cios.2018.10.4.462
12. Bergsma M., Doornberg J.N., Borghorst A., et al. The Watershed Line of the Distal Radius: Cadaveric and Imaging Study of Anatomical Landmarks // *Jnl Wrist Surg*. 2020. Vol. 9, № 1. P. 044–051. doi: 10.1055/s-0039-1698452
13. DeGeorge B.R.J., Brogan D.M., Shin A.Y. The Relationship of Volar Plate Position and Flexor Tendon Rupture: Should We
- Question the Validity of the Soong Classification? // *Plastic and Reconstructive Surgery*. 2020. Vol. 146, № 3. P. 581–588. doi: 10.1097/PRS.0000000000007080
14. Soong M., Earp B.E., Bishop G., Leung A., Blazar P. Volar Locking Plate Implant Prominence and Flexor Tendon Rupture // *J Bone Joint Surg Am*. 2011. Vol. 93, № 4. P. 328–35. doi: 10.2106/JBJS.J.00193
15. Obert L., Loisel F., Gasse N., Lepage D. Distal radius anatomy applied to the treatment of wrist fractures by plate: a review of recent literature // *SICOT-J*. 2015. Vol. 1, P. 14. doi: 10.1051/sicotj/2015012
16. Cha S.M., Shin H.D., Lee S.H. “Island-shape” Fractures of Lister’s tubercle have an increased risk of delayed extensor pollicis longus rupture in distal radial fractures: After surgical treatment by volar locking plate // *Injury*. 2018. Vol. 49, № 10. P. 1816–1821. doi: 10.1016/j.injury.2018.08.019
17. Lee J.-K., Bang J.Y., Choi Y.S., et al. Extensor pollicis longus tendon rupture caused by a displaced dorsal “beak” fragment of Lister’s tubercle in distal radius fractures // *Handchir Mikrochir Plast Chir*. 2019. Vol. 51, № 3. P. 199–204. doi: 10.1055/a-0826-4731
18. Ogata Y., Ogawa T., Hirabayashi T., et al. ‘Hook’ Shape Lister Tubercle Is Associated with a Greater Incidence of Extensor Pollicis Longus Tendon Rupture after Distal Radius Fracture // *J Hand Surg Asian-Pac Vol*. 2022. Vol. 27, № 5. P. 874–880. doi: 10.1142/S242483552250076X
19. Rikli D.A., Regazzoni P. Fractures of the distal end of the radius treated by internal fixation and early function // *The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume*. 1996. Vol. 78-B, № 4. P. 588–592.
20. Gunaratne R., Nazifi O., D’Souza H., Tay A. Optimal screw length in volar locking plate osteosynthesis for distal radius fractures: a systematic review // *ANZ J Surg*. 2022. Vol. 92, № 4. P. 674–684. doi: 10.1111/ans.17390
21. Gray R.R.L., Foremny G., Lee S., Greditzer T. Radiography of the Distal Radius // *Journal of Orthopaedic Trauma*. 2021. Vol. 35. P. s21–s26. doi: 10.1097/BOT.0000000000002206
22. Soong M., Got C., Katarincic J., Akelman E. Fluoroscopic Evaluation of Intra-Articular Screw Placement During Locked Volar Plating of the Distal Radius: A Cadaveric Study // *The Journal of Hand Surgery*. 2008. Vol. 33, № 10. P. 1720–1723. doi: 10.1016/j.jhsa.2008.07.021
23. Kwon B.C., Lee Y.M., Lee J.W., Choi H.G. Can we safely place the distal volar locking plate screws into the subchondral zone of a distal radius fracture using a 45° supination oblique view under fluoroscopic guidance? // *Injury*. 2023. Vol. 54, № 3. P. 947–953. doi: 10.1016/j.injury.2023.01.026
24. Klein J.S., Mijares M.R., Chen D., et al. Radiographic Evaluation of the Distal Radioulnar Joint: Technique to Detect Sigmoid Notch Intra-Articular Screw Breach in Distal Radius Fractures // *Techniques in Orthopaedics*. 2020. Vol. 35, № 1. P. 73–77. doi: 10.1097/BTO.0000000000000318

25. Esworthy G.P., Johnson N.A., Divall P., Dias J.J. Origins of the threshold for surgical intervention in intra-articular distal radius fractures // *The Bone & Joint Journal*. 2021. Vol. 103-B, № 9. P. 1457–1461. doi: 10.1302/0301-620X.103B9.BJJ-2021-0313.R1
26. Hruby L.A., Haider T., Laggner R., et al. Standard radiographic assessments of distal radius fractures miss involvement of the distal radioulnar joint: a diagnostic study // *Arch Orthop Trauma Surg*. 2022. Vol. 142, № 6. P. 1075–1082. doi: 10.1007/s00402-021-03801-7
27. Jeffrey C.R., Bindra R.R., Evanoff B.A., et al. Radiographic evaluation of osseous displacement following intra-articular fractures of the distal radius: Reliability of plain radiography versus computed tomography // *The Journal of Hand Surgery*. 1997. Vol. 22, № 5. P. 792–800. doi: 10.1016/s0363-5023(97)80071-8
28. Kleinlugtenbelt Y.V., Groen S.R., Ham S.J., et al. Classification systems for distal radius fractures: Does the reliability improve using additional computed tomography? // *Acta Orthopaedica*. 2017. Vol. 88, № 6. P. 681–687.
29. Diong T.W., Haflah N.H.M., Kassim A.Y.M., Habshi S.M.I.A., Shukur M.H. Use of Computed Tomography in Determining the Occurrence of Dorsal and Intra-articular Screw Penetration in Volar Locking Plate Osteosynthesis of Distal Radius Fracture // *J Hand Surg Asian-Pac*. 2018. Vol. 23, № 1. P. 26–32. doi: 10.1142/S2424835518500030
30. Halvachizadeh S., Berk T., Pieringer A., et al. Is the Additional Effort for an Intraoperative CT Scan Justified for Distal Radius Fracture Fixations? A Comparative Clinical Feasibility Study // *JCM*. 2020. Vol. 9, № 7. P. 2254. doi: 10.3390/jcm9072254
31. Shehovych A., Salar O., Meyer C., Ford D.J. Adult distal radius fractures classification systems: essential clinical knowledge or abstract memory testing? // *Annals*. 2016. Vol. 98, № 8. P. 525–531. doi: 10.1308/rcsann.2016.0237
32. Wæver D., Madsen M.L., Rölfling J.H.D., et al. Distal radius fractures are difficult to classify // *Injury*. 2018. Vol. 49. P. S29–S32. doi: 10.1016/S0020-1383(18)30299-7
33. Bruyere A., Vernet P., Botero S.S., et al. Conservative treatment of distal fractures after the age of 65: a review of literature // *Eur J Orthop Surg Traumatol*. 2018. Vol. 28, № 8. P. 1469–1475. doi: 10.1007/s00590-018-2150-x
34. He B., Tian X., Ji G., Han A. Comparison of outcomes between nonsurgical and surgical treatment of distal radius fracture: a systematic review update and meta-analysis // *Arch Orthop Trauma Surg*. 2020. Vol. 140, № 8. P. 1143–1153. doi: 10.1007/s00402-020-03487-3
35. Ochen Y., Peek J., van der Velde D., et al. Operative vs Nonoperative Treatment of Distal Radius Fractures in Adults: A Systematic Review and Meta-analysis // *JAMA Netw Open*. 2020. Vol. 3, № 4. P. e203497. doi: 10.1001/jamanetworkopen.2020.3497
36. Gutiérrez-Espinoza H., Araya-Quintanilla F., Olguín-Huerta C., et al. Effectiveness of surgical versus conservative treatment of distal radius fractures in elderly patients: A systematic review and meta-analysis // *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*. 2022. Vol. 108, № 5. P. 103323. doi: 10.1016/j.otsr.2022.103323
37. Rupp M., Cambon-Binder A., Alt V., Feron J.M. Is percutaneous pinning an outdated technique for distal radius fractures? // *Injury*. 2019. Vol. 50, suppl 1. P. S30–S35. doi: 10.1016/j.injury.2019.03.048
38. Chaudhry H., Kleinlugtenbelt Y.V., Mundi R., et al. Are Volar Locking Plates Superior to Percutaneous K-wires for Distal Radius Fractures? A Meta-analysis // *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 2015. Vol. 473, № 9. P. 3017–27. doi: 10.1007/s11999-015-4347-1
39. Franceschi F., Franceschetti E., Paciotti M., et al. Volar locking plates versus K-wire/pin fixation for the treatment of distal radial fractures: a systematic review and quantitative synthesis // *Br Med Bull*. 2015. Vol. 115, № 1. P. 91–110. doi: 10.1093/bmb/ldv015
40. Zong S.-L., Kan S.L., Su L.X., Wang B. Meta-analysis for dorsally displaced distal radius fracture fixation: volar locking plate versus percutaneous Kirschner wires // *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*. 2015. Vol. 10, № 1. P. 108. doi: 10.1186/s13018-015-0252-2
41. Costa M.L., Achten J., Rangan A., Lamb S.E., Parsons N.R. Percutaneous fixation with Kirschner wires versus volar locking-plate fixation in adults with dorsally displaced fracture of distal radius: five-year follow-up of a randomized controlled trial // *The Bone & Joint Journal*. 2019. Vol. 101-B, № 8. P. 978–983. doi: 10.1302/0301-620X.101B8.BJJ-2018-1285.R1
42. Nandyala S.V., Giladi A.M., Parker A.M., Rozenal T.D. Comparison of Direct Perioperative Costs in Treatment of Unstable Distal Radial Fractures // *J Bone Joint Surg Am*. 2018. Vol. 100, № 9. P. 786–792. doi: 10.2106/JBJS.17.00688
43. Fu Q., Zhu L., Yang P., Chen A. Volar Locking Plate versus External Fixation for Distal Radius Fractures: A Meta-analysis of Randomized Controlled Trials // *IJO*. 2018. Vol. 52, № 6. P. 602–610. doi: 10.4103/ortho.IJOrtho_601_16
44. Gou Q., Xiong X., Cao D., He Y., Li X. Volar locking plate versus external fixation for unstable distal radius fractures: a systematic review and meta-analysis based on randomized controlled trials // *BMC Musculoskelet Disord*. 2021. Vol. 22, № 1. P. 433. doi: 10.1186/s12891-021-04312-7
45. Gouk C.J.C., Bindra R.R., Tarrant D.J., Thomas M.J.E. Volar locking plate fixation versus external fixation of distal radius fractures: a meta-analysis // *J Hand Surg Eur Vol*. 2018. Vol. 43, № 9. P. 954–960. doi: 10.1177/1753193417743936
46. Hammer O.-L., Clementsen S., Hast J., et al. Volar Locking Plates Versus Augmented External Fixation of Intra-Articular Distal Radial Fractures: Functional Results from a Randomized Controlled Trial // *The Journal of Bone and Joint Surgery*. 2019. Vol. 101, № 4. P. 311–321. doi: 10.2106/JBJS.18.00014
47. Huang Y.-Y., Lin T.Y., Chen C.H., Chou Y.C., Su C.Y. Surgical outcomes of elderly patients aged more than 80 years with distal radius fracture: comparison of external fixation and locking plate // *BMC Musculoskelet Disord*. 2020. Vol. 21, № 1. P. 91. doi: 10.1186/s12891-020-3101-3
48. Saving J., Enocson A., Ponzer S., Mellstrand Navarro C. External Fixation Versus Volar Locking Plate for Unstable Dorsally Displaced Distal Radius Fractures — A 3-Year Follow-Up of a Randomized Controlled Study // *The Journal of Hand Surgery*. 2019. Vol. 44, № 1. P. 18–26. doi: 10.1016/j.jhsa.2018.09.015
49. Sharma A., Pathak S., Sandhu H., et al. Prospective Randomized Study Comparing the External Fixator and Volar Locking Plate in Intraarticular Distal Radius Fractures: Which Is Better? // *Cureus*. 2020. Vol. 12, № 2. P. e6849. doi: 10.7759/cureus.6849
50. Wang J., Lu Y., Cui Y., Wei X., Sun J. Is volar locking plate superior to external fixation for distal radius fractures? A comprehensive meta-analysis // *Acta Orthopaedica et Traumatologica Turcica*. 2018. Vol. 52, № 5. P. 334–342. doi: 10.1016/j.aott.2018.06.001
51. Yanagisawa Y., Ito A., Hara Y., et al. Initial clinical trial of pins coated with fibroblast growth factor-2-apatite composite layer in

external fixation of distal radius fractures // *Journal of Orthopaedics*. 2019. Vol. 16, № 1. P. 69–73. doi: 10.1016/j.jor.2018.12.012

52. Diaz-Garcia R.J., Chung K.C. The Evolution of Distal Radius Fracture Management: A Historical Treatise // *Hand Clinics*. 2012. Vol. 28, № 2. P. 105–111. doi: 10.1016/j.hcl.2012.02.007

53. Rosenauer R., Pezzeri C., Quadlbauer S., et al. Complications after operatively treated distal radius fractures // *Arch Orthop Trauma Surg*. 2020. Vol. 140, № 5. P. 665–673. doi: 10.1007/s00402-020-03372-z

54. Devaux N., Henning J., Haefeli M., Honigsmann P. The Retinaculum Flap for Dorsal Fixation of Distal Radius Fractures // *The Journal of Hand Surgery*. 2018. Vol. 43, № 4. P. 391.e1–391.e7. doi: 10.1016/j.jhsa.2018.01.011

55. Ghafoor H., Haefeli M., Steiger R., Honigsmann P. Dorsal Plate Osteosynthesis in Simple and Complex Fractures of the Distal Radius: A Radiological Analysis of 166 Cases // *J Wrist Surg*. 2022. Vol. 11, № 2. P. 134–144. doi: 10.1055/s-0041-1735839

56. Kumar S., Khan A.N., Sonanis S.V. Radiographic and functional evaluation of low profile dorsal versus volar plating for distal radius fractures // *Journal of Orthopaedics*. 2016. Vol. 13, № 4. P. 376–382. doi: 10.1016/j.jor.2016.06.017

57. Disseldorp D.J.G., Hannemann P.F., Poeze M., Brink P.R. Dorsal or Volar Plate Fixation of the Distal Radius: Does the Complication Rate Help Us to Choose? // *J Wrist Surg*. 2016. Vol. 05, № 3. P. 202–210. doi: 10.1055/s-0036-1571842

58. Mauck B.M., Swigler C.W. Evidence-Based Review of Distal Radius Fractures // *Orthopedic Clinics of North America*. 2018. Vol. 49, № 2. P. 211–222. doi: 10.1016/j.ocl.2017.12.001

59. Yamamoto M., Fujihara Y., Fujihara N., Hirata H. A systematic review of volar locking plate removal after distal radius fracture // *Injury*. 2017. Vol. 48, № 12. P. 2650–2656. doi: 10.1016/j.injury.2017.10.010

60. Landgren M., Abramo A., Geijer M., Kopylov P., Tägil M. Fragment-Specific Fixation Versus Volar Locking Plates in Primarily Nonreducible or Secondarily Redisplaced Distal Radius Fractures: A Randomized Controlled Study // *The Journal of Hand Surgery*. 2017. Vol. 42, № 3. P. 156–165.e1. doi: 10.1016/j.jhsa.2016.12.001

61. Yao J., Fogel N. Arthroscopy in Distal Radius Fractures // *Hand Clinics*. 2021. Vol. 37, № 2. P. 279–291. doi: 10.1016/j.hcl.2021.02.010

62. Ardouin L., Durand A., Gay A., Leroy M. Why do we use arthroscopy for distal radius fractures? // *Eur J Orthop Surg Traumatol*. 2018. Vol. 28, № 8. P. 1505–1514. doi: 10.1007/s00590-018-2263-2

63. Kastenberger T., Kaiser P., Schmidle G., et al. Arthroscopic assisted treatment of distal radius fractures and concomitant

injuries // *Arch Orthop Trauma Surg*. 2020. Vol. 140, № 5. P. 623–638. doi: 10.1007/s00402-020-03373-y

64. Saab M., Guerre E., Chantelot C., et al. Contribution of arthroscopy to the management of intra-articular distal radius fractures: Knowledge update based on a systematic 10-year literature review // *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*. 2019. Vol. 105, № 8. P. 1617–1625. doi: 10.1016/j.otsr.2019.06.016

65. Selles C.A., Mulders M.A.M., Colaris J.W., et al. Arthroscopic debridement does not enhance surgical treatment of intra-articular distal radius fractures: a randomized controlled trial // *J Hand Surg Eur Vol*. 2020. Vol. 45, № 4. P. 327–332. doi: 10.1177/1753193419866128

66. Smeraglia F., Del Buono A., Maffulli N. Wrist arthroscopy in the management of articular distal radius fractures // *Br Med Bull*. 2016. Vol. 119, № 1. P. 157–165. doi: 10.1093/bmb/ldw032

67. Bhan K., Hasan K., Pawar A.S., Patel R. Rehabilitation Following Surgically Treated Distal Radius Fractures: Do Immobilization and Physiotherapy Affect the Outcome? // *Cureus*. 2021. Vol. 13, № 7. P. e16230. doi: 10.7759/cureus.16230

68. Quadlbauer S., Pezzeri C., Jurkowitsch J., et al. Rehabilitation after distal radius fractures: is there a need for immobilization and physiotherapy? // *Arch Orthop Trauma Surg*. 2020. Vol. 140, № 5. P. 651–663. doi: 10.1007/s00402-020-03367-w

69. Zeckey C., Späth A., Kieslich S., et al. Early Mobilization Versus Splinting After Surgical Management of Distal Radius Fractures // *Deutsches Ärzteblatt international*. 2020. Vol. 117, № 26. P. 445–451. doi: 10.3238/arztebl.2020.0445

70. Quadlbauer S., Pezzeri C., Jurkowitsch J., et al. Immediate mobilization of distal radius fractures stabilized by volar locking plate results in a better short-term outcome than a five week immobilization: A prospective randomized trial, 2022 [Интернет]. Режим доступа: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/02692155211036674> Дата обращения: 16.02.2024.

71. Walker L.C., O'Connor D., Richards S.W., Southgate J.J. The “COVID-19 Approach” to Distal Radius Fracture Management // *J Wrist Surg*. 2023. Vol. 12, № 2. P. 121–127. doi: 10.1055/s-0042-1756496

72. Soares F., Paranhos D., Campos F., Gasparini A., Fernandes L. Supervised exercise therapy program vs non-supervised exercise therapy program after distal radius fracture: A systematic review and meta-analysis // *Journal of Hand Therapy*. 2023. Vol. 36, № 4. P. 860–876. doi: 10.1016/j.jht.2023.06.009

73. Kamal R.N., Shapiro L.M. AAOS/ASSH Clinical Practice Guideline Summary Management of Distal Radius Fractures // *J Am Acad Orthop Surg*. 2022. Vol. 30, № 4. P. e480–e486.

REFERENCES

1. Court-Brown CM, Caesar B. Epidemiology of adult fractures: A review. *Injury*. 2006;37(8):691–7. doi: 10.1016/j.injury.2006.04.130

2. Jerrhag D, Englund M, Karlsson MK, Rosengren BE. Epidemiology and time trends of distal forearm fractures in adults — a study of 11.2 million person-years in Sweden. *BMC Musculoskelet Disord*. 2017;18(1):240. doi: 10.1186/s12891-017-1596-z

3. Azad A, Kang HP, Alluri RK, et al. Epidemiological and Treatment Trends of Distal Radius Fractures across Multiple Age Groups. *Jnl Wrist Surg*. 2019;8(4):305–311. doi: 10.1055/s-0039-1685205

4. Brink P, Rikli D. Four-Corner Concept: CT-Based Assessment of Fracture Patterns in Distal Radius. *Jnl Wrist Surg*. 2016;5(2):147–151. doi: 10.1055/s-0035-1570462

5. Hintringer W, Rosenauer R, Pezzeri C, et al. Biomechanical considerations on a CT-based treatment-oriented classification in radius fractures. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2020;140(5):595–609. doi: 10.1007/s00402-020-03405-7

6. Hozack BA, Tosti RJ. Fragment-Specific Fixation in Distal Radius Fractures. *Curr Rev Musculoskelet Med*. 2019;12(2):190–197. doi: 10.1007/s12178-019-09538-6

7. Mehta SP, MacDermid JC, Richardson J, MacIntyre NJ, Grewal R. Baseline Pain Intensity Is a Predictor of Chronic Pain in Individuals With Distal Radius Fracture. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2015;45(2):119–127. doi: 10.2519/jospt.2015.5129

8. Liverneaux PA. The minimally invasive approach for distal radius fractures and malunions. *J Hand Surg Eur.* 2018;43(2):121–130. doi: 10.1177/1753193417745259
9. Maximov BI. Minimally Invasive Plate Osteosynthesis for Distal Radius Fractures: Are There Any Advantages Against Conventional Technique? *Traumatology and Orthopedics of Russia.* 2020;26(1):76–84. doi: 10.21823/2311-2905-2020-26-1-76-8410
10. *Minimally Invasive Plating of Distal Radius Fracture: A Series of 42 Cases and Review of Current Literature* [Internet]. Available from: <https://www.hindawi.com/journals/mis/2023/3534849/> Accessed: 17.02.2024.
11. Kwon BC, Lee JK, Lee SY, Hwang JY, Seo JH. Morphometric Variations in the Volar Aspect of the Distal Radius. *Clin Orthop Surg.* 2018;10(4):462–467. doi: 10.4055/cios.2018.10.4.462
12. Bergsma M, Doornberg JN, Borghorst A, et al. The Watershed Line of the Distal Radius: Cadaveric and Imaging Study of Anatomical Landmarks. *Jnl Wrist Surg.* 2020;9(1):044–051. doi: 10.1055/s-0039-1698452
13. DeGeorge BRJ, Brogan DM, Shin AY. The Relationship of Volar Plate Position and Flexor Tendon Rupture: Should We Question the Validity of the Soong Classification? *Plastic and Reconstructive Surgery.* 2020;146(3):581–588. doi: 10.1097/PRS.0000000000007080
14. Soong M, Earp BE, Bishop G, Leung A, Blazar P. Volar Locking Plate Implant Prominence and Flexor Tendon Rupture. *J Bone Joint Surg Am.* 2011;93(4):328–35. doi: 10.2106/JBJS.J.00193
15. Obert L, Loisel F, Gasse N, Lepage D. Distal radius anatomy applied to the treatment of wrist fractures by plate: a review of recent literature. *SICOT-J.* 2015;1:14. doi: 10.1051/sicotj/2015012
16. Cha SM, Shin HD, Lee SH. "Island-shape" Fractures of Lister's tubercle have an increased risk of delayed extensor pollicis longus rupture in distal radial fractures: After surgical treatment by volar locking plate. *Injury.* 2018;49(10):1816–1821. doi: 10.1016/j.injury.2018.08.019
17. Lee J-K, Bang JY, Choi YS, et al. Extensor pollicis longus tendon rupture caused by a displaced dorsal "beak" fragment of Lister's tubercle in distal radius fractures. *Handchir Mikrokhir Plast Chir.* 2019;51(3):199–204. doi: 10.1055/a-0826-4731
18. Ogata Y, Ogawa T, Hirabayashi T, et al. 'Hook' Shape Lister Tubercle Is Associated with a Greater Incidence of Extensor Pollicis Longus Tendon Rupture after Distal Radius Fracture. *J Hand Surg Asian-Pac Vol.* 2022;27(5):874–880. doi: 10.1142/S242483552250076X
19. Rikli DA, Regazzoni P. Fractures of the distal end of the radius treated by internal fixation and early function. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume.* 1996;78-B(4):588–592.
20. Gunaratne R, Nazifi O, D'Souza H, Tay A. Optimal screw length in volar locking plate osteosynthesis for distal radius fractures: a systematic review. *ANZ J Surg.* 2022;92(4):674–684. doi: 10.1111/ans.17390
21. Gray RRL, Foremny G, Lee S, Greditzer T. Radiography of the Distal Radius. *Journal of Orthopaedic Trauma.* 2021;35:s21–s26. doi: 10.1097/BOT.0000000000002206.
22. Soong M, Got C, Katarincic J, Akelman E. Fluoroscopic Evaluation of Intra-Articular Screw Placement During Locked Volar Plating of the Distal Radius: A Cadaveric Study. *The Journal of Hand Surgery.* 2008;33(10):1720–1723. doi: 10.1016/j.jhsa.2008.07.021
23. Kwon BC, Lee YM, Lee JW, Choi HG. Can we safely place the distal volar locking plate screws into the subchondral zone of a distal radius fracture using a 45° supination oblique view under fluoroscopic guidance? *Injury.* 2023;54(3):947–953. doi: 10.1016/j.injury.2023.01.026
24. Klein JS, Mijares MR, Chen D, et al. Radiographic Evaluation of the Distal Radioulnar Joint: Technique to Detect Sigmoid Notch Intra-Articular Screw Breach in Distal Radius Fractures. *Techniques in Orthopaedics.* 2020;35(1):73–77. doi: 10.1097/BTO.0000000000000318
25. Esworthy GP, Johnson NA, Divall P, Dias JJ. Origins of the threshold for surgical intervention in intra-articular distal radius fractures. *The Bone & Joint Journal.* 2021;103-B(9):1457–1461. doi: 10.1302/0301-620X.103B9.BJJ-2021-0313.R1
26. Hruby LA, Haider T, Laggner R, et al. Standard radiographic assessments of distal radius fractures miss involvement of the distal radioulnar joint: a diagnostic study. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2022;142(6):1075–1082. doi: 10.1007/s00402-021-03801-7
27. Jeffrey CR, Bindra RR, Evanoff BA, et al. Radiographic evaluation of osseous displacement following intra-articular fractures of the distal radius: Reliability of plain radiography versus computed tomography. *The Journal of Hand Surgery.* 1997;22(5):792–800. doi: 10.1016/s0363-5023(97)80071-8
28. Kleinlugtenbelt YV, Groen SR, Ham SJ, et al. Classification systems for distal radius fractures: Does the reliability improve using additional computed tomography? *Acta Orthopaedica.* 2017;88(6):681–687.
29. Diong TW, Hafiah NHM, Kassim AYM, Habshi SMIA, Shukur MH. Use of Computed Tomography in Determining the Occurrence of Dorsal and Intra-articular Screw Penetration in Volar Locking Plate Osteosynthesis of Distal Radius Fracture. *J Hand Surg Asian-Pac.* 2018;23(1):26–32. doi: 10.1142/S2424835518500030
30. Halvachizadeh S, Berk T, Pieringer A, et al. Is the Additional Effort for an Intraoperative CT Scan Justified for Distal Radius Fracture Fixations? A Comparative Clinical Feasibility Study. *JCM.* 2020;9(7):2254. doi: 10.3390/jcm9072254
31. Shehovych A, Salar O, Meyer C, Ford DJ. Adult distal radius fractures classification systems: essential clinical knowledge or abstract memory testing? *Annals.* 2016;98(8):525–531. doi: 10.1308/rcsann.2016.0237
32. Wæver D, Madsen ML, Rölffing JHD, et al. Distal radius fractures are difficult to classify. *Injury.* 2018;49:S29–S32. doi: 10.1016/S0020-1383(18)30299-7
33. Bruyere A, Vernet P, Botero SS, et al. Conservative treatment of distal fractures after the age of 65: a review of literature. *Eur J Orthop Surg Traumatol.* 2018;28(8):1469–1475. doi: 10.1007/s00590-018-2150-x
34. He B, Tian X, Ji G, Han A. Comparison of outcomes between nonsurgical and surgical treatment of distal radius fracture: a systematic review update and meta-analysis. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2020;140(8):1143–1153. doi: 10.1007/s00402-020-03487-3
35. Ochen Y, Peek J, van der Velde D, et al. Operative vs Nonoperative Treatment of Distal Radius Fractures in Adults: A Systematic Review and Meta-analysis. *JAMA Netw Open.* 2020;3(4):e203497. doi: 10.1001/jamanetworkopen.2020.3497
36. Gutiérrez-Espinoza H, Araya-Quintanilla F, Olguín-Huerta C, et al. Effectiveness of surgical versus conservative treatment of distal radius fractures in elderly patients: A systematic review and meta-analysis. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research.* 2022;108(5):103323. doi: 10.1016/j.otsr.2022.103323
37. Rupp M, Cambon-Binder A, Alt V, Feron JM. Is percutaneous pinning an outdated technique for distal radius fractures? *Injury.* 2019;50(Suppl 1):S30–S35. doi: 10.1016/j.injury.2019.03.048
38. Chaudhry H, Kleinlugtenbelt YV, Mundi R, et al. Are Volar Locking Plates Superior to Percutaneous K-wires for Distal Radius Fractures?

- A Meta-analysis. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 2015;473(9):3017–27. doi: 10.1007/s11999-015-4347-1
39. Franceschi F, Franceschetti E, Paciotti M, et al. Volar locking plates versus K-wire/pin fixation for the treatment of distal radial fractures: a systematic review and quantitative synthesis. *Br Med Bull*. 2015;115(1):91–110. doi: 10.1093/bmb/ldv015
40. Zong S-L, Kan SL, Su LX, Wang B. Meta-analysis for dorsally displaced distal radius fracture fixation: volar locking plate versus percutaneous Kirschner wires. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*. 2015;10(1):108. doi: 10.1186/s13018-015-0252-2
41. Costa ML, Achten J, Rangan A, Lamb SE, Parsons NR. Percutaneous fixation with Kirschner wires versus volar locking-plate fixation in adults with dorsally displaced fracture of distal radius: five-year follow-up of a randomized controlled trial. *The Bone & Joint Journal*. 2019;101-B(8):978–983. doi: 10.1302/0301-620X.101B8.BJJ-2018-1285.R1
42. Nandyala SV, Giladi AM, Parker AM, Rozental TD. Comparison of Direct Perioperative Costs in Treatment of Unstable Distal Radial Fractures. *J Bone Joint Surg Am*. 2018;100(9):786–792. doi: 10.2106/JBJS.17.00688
43. Fu Q, Zhu L, Yang P, Chen A. Volar Locking Plate versus External Fixation for Distal Radius Fractures: A Meta-analysis of Randomized Controlled Trials. *IJO*. 2018;52(6):602–610. doi: 10.4103/ortho.IJOrtho_601_16.
44. Gou Q, Xiong X, Cao D, He Y, Li X. Volar locking plate versus external fixation for unstable distal radius fractures: a systematic review and meta-analysis based on randomized controlled trials. *BMC Musculoskeletal Disord*. 2021;22(1):433. doi: 10.1186/s12891-021-04312-7
45. Gouk CJC, Bindra RR, Tarrant DJ, Thomas MJE. Volar locking plate fixation versus external fixation of distal radius fractures: a meta-analysis. *J Hand Surg Eur Vol*. 2018;43(9):954–960. doi: 10.1177/1753193417743936
46. Hammer O-L, Clementsen S, Hast J, et al. Volar Locking Plates Versus Augmented External Fixation of Intra-Articular Distal Radial Fractures: Functional Results from a Randomized Controlled Trial. *The Journal of Bone and Joint Surgery*. 2019;101(4):311–321. doi: 10.2106/JBJS.18.00014
47. Huang Y-Y, Lin TY, Chen CH, Chou YC, Su CY. Surgical outcomes of elderly patients aged more than 80 years with distal radius fracture: comparison of external fixation and locking plate. *BMC Musculoskeletal Disord*. 2020;21(1):91. doi: 10.1186/s12891-020-3101-3
48. Saving J, Enocson A, Ponzer S, Mellstrand Navarro C. External Fixation Versus Volar Locking Plate for Unstable Dorsally Displaced Distal Radius Fractures — A 3-Year Follow-Up of a Randomized Controlled Study. *The Journal of Hand Surgery*. 2019;44(1):18–26. doi: 10.1016/j.jhsa.2018.09.015
49. Sharma A, Pathak S, Sandhu H, et al. Prospective Randomized Study Comparing the External Fixator and Volar Locking Plate in Intraarticular Distal Radius Fractures: Which Is Better? *Cureus*. 2020;12(2):e6849. doi: 10.7759/cureus.6849
50. Wang J, Lu Y, Cui Y, Wei X, Sun J. Is volar locking plate superior to external fixation for distal radius fractures? A comprehensive meta-analysis. *Acta Orthopaedica et Traumatologica Turcica*. 2018;52(5):334–342. doi: 10.1016/j.aott.2018.06.001
51. Yanagisawa Y, Ito A, Hara Y, et al. Initial clinical trial of pins coated with fibroblast growth factor-2-apatite composite layer in external fixation of distal radius fractures. *Journal of Orthopaedics*. 2019;16(1):69–73. doi: 10.1016/j.jor.2018.12.012
52. Diaz-Garcia RJ, Chung KC. The Evolution of Distal Radius Fracture Management: A Historical Treatise. *Hand Clinics*. 2012;28(2):105–111. doi: 10.1016/j.hcl.2012.02.007
53. Rosenauer R, Pezzeri C, Quadlbauer S, et al. Complications after operatively treated distal radius fractures. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2020;140(5):665–673. doi: 10.1007/s00402-020-03372-z
54. Devaux N, Henning J, Haefeli M, Honigsmann P. The Retinaculum Flap for Dorsal Fixation of Distal Radius Fractures. *The Journal of Hand Surgery*. 2018;43(4):391.e1–391.e7. doi: 10.1016/j.jhsa.2018.01.011
55. Ghafoor H, Haefeli M, Steiger R, Honigsmann P. Dorsal Plate Osteosynthesis in Simple and Complex Fractures of the Distal Radius: A Radiological Analysis of 166 Cases. *J Wrist Surg*. 2022;11(2):134–144. doi: 10.1055/s-0041-1735839
56. Kumar S, Khan AN, Sonanis SV. Radiographic and functional evaluation of low profile dorsal versus volar plating for distal radius fractures. *Journal of Orthopaedics*. 2016;13(4):376–382. doi: 10.1016/j.jor.2016.06.017
57. Disseldorp DJG, Hannemann PF, Poeze M, Brink PR. Dorsal or Volar Plate Fixation of the Distal Radius: Does the Complication Rate Help Us to Choose? *J Wrist Surg*. 2016;5(3):202–210. doi: 10.1055/s-0036-1571842
58. Mauck BM, Swigler CW. Evidence-Based Review of Distal Radius Fractures. *Orthopedic Clinics of North America*. 2018;49(2):211–222. doi: 10.1016/j.ocl.2017.12.001
59. Yamamoto M, Fujihara Y, Fujihara N, Hirata H. A systematic review of volar locking plate removal after distal radius fracture. *Injury*. 2017;48(12):2650–2656. doi: 10.1016/j.injury.2017.10.010
60. Landgren M, Abramo A, Geijer M, Kopylov P, Tägil M. Fragment-Specific Fixation Versus Volar Locking Plates in Primarily Nonreducible or Secondarily Redispersed Distal Radius Fractures: A Randomized Controlled Study. *The Journal of Hand Surgery*. 2017;42(3):156–165.e1. doi: 10.1016/j.jhsa.2016.12.001
61. Yao J, Fogel N. Arthroscopy in Distal Radius Fractures. *Hand Clinics*. 2021;37(2):279–291. doi: 10.1016/j.hcl.2021.02.010
62. Ardouin L, Durand A, Gay A, Leroy M. Why do we use arthroscopy for distal radius fractures? *Eur J Orthop Surg Traumatol*. 2018;28(8):1505–1514. doi: 10.1007/s00590-018-2263-2
63. Kastenberger T, Kaiser P, Schmidle G, et al. Arthroscopic assisted treatment of distal radius fractures and concomitant injuries. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2020;140(5):623–638. doi: 10.1007/s00402-020-03373-y
64. Saab M, Guerre E, Chantelot C, et al. Contribution of arthroscopy to the management of intra-articular distal radius fractures: Knowledge update based on a systematic 10-year literature review. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*. 2019;105(8):1617–1625. doi: 10.1016/j.otsr.2019.06.016
65. Selles CA, Mulders MAM, Colaris JW. Arthroscopic debridement does not enhance surgical treatment of intra-articular distal radius fractures: a randomized controlled trial. *J Hand Surg Eur Vol*. 2020;45(4):327–332. doi: 10.1177/1753193419866128
66. Smeraglia F, Del Buono A, Maffulli N. Wrist arthroscopy in the management of articular distal radius fractures. *Br Med Bull*. 2016;119(1):157–165. doi: 10.1093/bmb/ldw032
67. Bhan K, Hasan K, Pawar AS, Patel R. Rehabilitation Following Surgically Treated Distal Radius Fractures: Do Immobilization and Physiotherapy Affect the Outcome? *Cureus*. 2021;13(7):e16230. doi: 10.7759/cureus.16230
68. Quadlbauer S, Pezzeri C, Jurkowsch J, et al. Rehabilitation after distal radius fractures: is there a need for immobilization and

physiotherapy? *Arch Orthop Trauma Surg.* 2020;140(5):651–663. doi: 10.1007/s00402-020-03367-w

69. Zeckey C, Späth A, Kieslich S, et al. Early Mobilization Versus Splinting After Surgical Management of Distal Radius Fractures. *Deutsches Ärzteblatt international.* 2020;117(26):445–451. doi: 10.3238/arztebl.2020.0445

70. Quadlbauer S, Pezzei C, Jurkowitsch J, et al. *Immediate mobilization of distal radius fractures stabilized by volar locking plate results in a better short-term outcome than a five week immobilization: A prospective randomized trial; 2022* [Internet]. Available from: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/02692155211036674> Accessed: 16.02.2024.

71. Walker LC, O'Connor D, Richards SW, Southgate JJ. The "COVID-19 Approach" to Distal Radius Fracture Management. *J Wrist Surg.* 2023;12(2):121–127. doi: 10.1055/s-0042-1756496

72. Soares F, Paranhos D, Campos F, Gasparini A, Fernandes L. Supervised exercise therapy program vs non-supervised exercise therapy program after distal radius fracture: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Hand Therapy.* 2023;36(4):860–876. doi: 10.1016/j.jht.2023.06.009

73. Kamal RN, Shapiro LM. AAOS/ASSH Clinical Practice Guideline Summary Management of Distal Radius Fractures. *J Am Acad Orthop Surg.* 2022;30(4):e480–e486.

ОБ АВТОРАХ

*** Бессонов Дмитрий Александрович;**

адрес: Россия, 129110, Москва, Орловский пер., д. 7;

ORCID: 0000-0002-0532-9847;

eLibrary SPIN: 2168-4297;

e-mail: bessonovdmitry96@gmail.com

Бурцев Михаил Евгеньевич, канд. мед. наук;

ORCID: 0000-0003-1614-1695;

eLibrary SPIN: 6268-0522;

e-mail: mburtsev@emcmos.ru

Фролов Александр Владимирович, канд. мед. наук;

ORCID: 0000-0002-2973-8303;

eLibrary SPIN: 9712-2491;

e-mail: afrolov@emcmos.ru

Саутин Максим Евгеньевич, канд. мед. наук;

ORCID: 0000-0001-9933-7102;

eLibrary SPIN: 4152-4596;

e-mail: msautin@emcmos.ru

Газимиева Бэлла Магомедовна;

ORCID: 0000-0002-0700-6355;

eLibrary SPIN: 4836-9231;

e-mail: bgazimieva@emcmos.ru

Васильев Иван Андреевич;

ORCID: 0000-0002-1163-950X;

eLibrary SPIN: 6586-0051;

e-mail: ivasilev@emcmos.ru

Королев Андрей Вадимович, д-р мед. наук, профессор;

ORCID: 0000-0002-8769-9963;

eLibrary SPIN: 6980-6109;

e-mail: akorolev@emcmos.ru

AUTHORS' INFO

*** Dmitrii A. Bessonov,** MD;

address: 7 Orlovsky lane, 129110 Moscow, Russia;

ORCID: 0000-0002-0532-9847;

eLibrary SPIN: 2168-4297;

e-mail: bessonovdmitry96@gmail.com

Mikhail E. Burtsev, MD, Cand. Sci. (Medicine);

ORCID: 0000-0003-1614-1695;

eLibrary SPIN: 6268-0522;

e-mail: mburtsev@emcmos.ru

Alexandr V. Frolov, MD, Cand. Sci. (Medicine);

ORCID: 0000-0002-2973-8303;

eLibrary SPIN: 9712-2491;

e-mail: afrolov@emcmos.ru

Maksim E. Sautin, MD, Cand. Sci. (Medicine);

ORCID: 0000-0001-9933-7102;

eLibrary SPIN: 4152-4596;

e-mail: msautin@emcmos.ru

Bella M. Gazimieva, MD;

ORCID: 0000-0002-0700-6355;

eLibrary SPIN: 4836-9231;

e-mail: bgazimieva@emcmos.ru

Ivan A. Vasilev, MD;

ORCID: 0000-0002-1163-950X;

eLibrary SPIN: 6586-0051;

e-mail: ivasilev@emcmos.ru

Andrey V. Korolev, MD, Dr. Sci. (Medicine), professor;

ORCID: 0000-0002-8769-9963;

eLibrary SPIN: 6980-6109;

e-mail: akorolev@emcmos.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto624138>

Северная школа травматологии и ортопедии: к 125-летию проф. В.Ф. Цель

С.В. Брагина¹, А.В. Андреева¹, А.В. Ивенин¹, И.В. Яшин¹, Г.О. Самбуров¹, С.С. Родионова²

¹ Северный государственный медицинский университет, Архангельск, Россия;

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

АННОТАЦИЯ

В статье представлена историческая справка о создании школы травматологии и ортопедии в г. Архангельске в память о её основателе В.Ф. Цель (1898–1974), который внёс огромный вклад в становление и развитие самого северного медицинского института, а также о его учениках и последователях.

Ключевые слова: история травматологии и ортопедии; Архангельский государственный медицинский институт; В.Ф. Цель.

Как цитировать:

Брагина С.В., Андреева А.В., Ивенин А.В., Яшин И.В., Самбуров Г.О., Родионова С.С. Северная школа травматологии и ортопедии: к 125-летию проф. В.Ф. Цель // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2024. Т. 31, № 3. С. 441–447. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto624138>

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto624138>

Northern school of traumatology and orthopedics: to the 125th anniversary of prof. V.F. Tsel

Svetlana V. Bragina¹, Anna V. Andreeva¹, Andrey V. Ivenin¹, Ivan V. Yashin¹,
Gleb O. Samburov¹, Svetlana S. Rodionova²

¹ Northern State Medical University, Arkhangelsk, Russia;

² N.N. Priorov National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics, Moscow, Russia

ABSTRACT

The article presents historical information about the creation of the school of traumatology and orthopedics in Arkhangelsk, in memory of its founder V.F. Tsel (1898–1974), who made a huge contribution to the formation and development of the Northern Medical Institute itself, as well as his students and followers.

Keywords: history of traumatology and orthopedics; Arkhangelsk State Medical Institute; V.F. Tsel.

To cite this article:

Bragina SV, Andreeva AV, Ivenin AV, Yashin IV, Samburov GO, Rodionova SS. Northern school of traumatology and orthopedics: to the 125th anniversary of prof. V.F. Tsel. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2024;31(3):441–447. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto624138>

Received: 01.12.2023

Accepted: 20.02.2024

Published online: 08.08.2024

В 2023 году исполнилось 125 лет со дня рождения профессора В.Ф. Цель — основателя и первого заведующего кафедрой травматологии, ортопедии и военно-морской хирургии (ВМХ) самого северного медицинского вуза мира [1, 2]. Он внёс большой вклад в развитие медицины Европейского Севера, проработав полвека на хирургических кафедрах Архангельского государственного медицинского института (АГМИ).



Владимир Фёдорович (Вольдемар Теодорович) Цель родился 14 марта 1898 года в с. Долиновке Константиновской волости Самарской губернии в крестьянской семье. Окончил медицинский факультет Томского университета (1924 г.), где его преподавателями были выдающиеся учёные. В истории этого

университета были такие известные хирурги, как Э.Г. Салищев¹, П.И. Тихов², сформировавшие свои научные хирургические школы, из которых вышли многие известные учёные-хирурги (Н.А. Богораз, Н.И. Березнеговский, А.М. Никольский, П.Н. Обросов, П.Н. Цветков, А.Ф. Пономарёв, А.П. Альбицкий и др.) [3].

Молодой специалист, В.Ф. Цель первый свой врачебный опыт получил в сельских больницах Самарской губернии. В феврале 1929 г. судьба забросила его в Северный край (ныне Архангельская область (АО)). В то время Владимир Фёдорович получил первый опыт организатора здравоохранения — от заведующего хирургическими отделениями до главного врача ЦРБ. Уже тогда он начал преподавать хирургию и заведовал учебной частью Маймаксанского фельдшерского училища, а в 1936 г. перешёл на должность ассистента кафедры общей хирургии Архангельского мединститута. В трудное военное время был мобилизован в трудовую армию (1942–1943 гг.), где работал главным врачом и хирургом лазарета в лагере для заключённых при Котласском мостозаводе [3].

В 1943 г. В.Ф. Цель успешно защитил кандидатскую диссертацию на тему «Переломы лодыжек (механизм происхождения, клиника и лечение)». Затем Владимир Фёдорович снова вернулся в г. Архангельск, был утверждён на должность доцента кафедры госпитальной хирургии и навсегда связал свою судьбу с медицинским

институтом [4]. Под руководством профессора Г.М. Давыдова³ в 1953 г. В.Ф. Цель защищает докторскую диссертацию на тему «Кожная пластика язв и незаживающих ран». Владимир Фёдорович признан всеми его коллегами виртуозным хирургом широкого профиля. Он проводил кожно-пластические операции, впервые в АО оперировал детей с врождённой расщелиной верхней губы и твёрдого нёба, внедрил хирургические методы лечения врождённого вывиха бедра и косолапости. Профессор В.Ф. Цель постоянно проявлял заботу о дальнейшем совершенствовании лечебной работы, выступал инициатором внедрения в практику всего нового, передового, современного для лечения больных (чрескостный компрессионно-дистракционный остеосинтез (ЧКДО) по Г.А. Илизарову, костная гомопластика, реконструктивные операции на крупных суставах и т.д.). Им предложены оригинальная модификация гипсовой повязки для функционального лечения перелома лодыжек, разработаны новые способы операций при расхождении прямых мышц живота, корригирующие остеотомии бедра при варусной деформации шейки, этапная методика «воспитания» итальянского лоскута кожи для пластики незаживающих язв и ран, фиксация несвободных кожных лоскутов при закрытии дефектов покровных тканей и многое другое [4–6].

Под руководством Владимира Фёдоровича в Архангельской областной клинической больнице (АОКБ) создаётся 6 специализированных отделений: анестезиологии и реанимации, хирургическое, торакальное, травматологическое и детское ортопедическое, костнотуберкулёзное, нейрохирургическое. При клинике профессор В.Ф. Цель открывает экспериментальную лабораторию для проведения научных исследований. Развивается анестезиологическая служба, осваиваются новые методы оперативных вмешательств на органах грудной и брюшной полости, центральной и периферической нервной системе, опорно-двигательном аппарате (ОДА) [1, 3–5].

Владимир Фёдорович был избран на должность второго профессора кафедры госпитальной хирургии (1956 г.), а с мая 1959 г. возглавил эту кафедру [6]. Он проявил себя умелым организатором, хорошим лектором и опытным клиницистом. Был инициатором преподавания студентам старших курсов института основ травматологии и ортопедии, тубостеологии и челюстно-лицевой хирургии. Владимир Фёдорович воспитал многих хирургов. Он охотно передавал свой богатый опыт студентам и врачам, был душевным человеком, его

¹ Салищев Эраст Гаврилович (1851–1901, Томск) — хирург, выпускник ИМХА, ординарный профессор по кафедре госпитальной хирургической клиники и десмургии с учением о вывихах и переломах Томского университета.

² Тихов Платон Иванович (1865, Туринск Тобольской губернии — 1917, Петроград) — русский врач-хирург, выпускник Казанского университета, ординарный профессор по кафедре госпитальной хирургической клиники Томского университета, с 1912 г. — проректор университета.

³ Давыдов Гавриил Михайлович (19.02.1894, г. Орлов Вятской губернии, ныне Кировской области — 21.04.1959, Архангельск) — хирург, д-р мед. наук (1938), профессор (1942), подполковник медицинской службы, заведующий кафедрой госпитальной хирургии АГМИ.

любили студенты, глубоко уважали пациенты, он пользовался огромным авторитетом среди сотрудников институтской клиники. В 1971 году В.Ф. Цель организовал и возглавил новую кафедру травматологии, ортопедии и ВМХ. За время работы в АГМИ Владимир Фёдорович проявил себя как вдумчивый клиницист, опытный хирург и самоотверженный научный работник, он не только сам трудился над разрешением ряда научных проблем, но и привлекал почти весь коллектив врачей. Благодаря его руководству были защищены 3 докторские (А.А. Киров⁴, «Свободная пересадка полнослойной кожи и восстановление иннервации в ней (клинико-гистологическое и экспериментальное исследование)» (1964 г.), Г.В. Попов, «Электрогастрография и электротермометрия желудка в условиях клиники и эксперимента» (1972 г.), О.К. Сидоренков, «Отражённые реакции желудка при местном хроническом сочетанном воздействии холода и влаги» (1973 г.)) и 10 кандидатских диссертаций. Он автор 90 публикаций, 3 изобретений и 6 рацпредложений [1, 4, 5].

Владимир Фёдорович организовал и возглавил Архангельское общество травматологов-ортопедов, избирался членом правления Всесоюзного общества, был главным травматологом АО, членом правления Российского общества травматологов-ортопедов. За заслуги в подготовке врачебных кадров, развитие травматолого-ортопедической службы, улучшение качества лечебной работы в АО, научные достижения профессор В.Ф. Цель награждён орденами «Знак Почёта» (1961 г.), Трудового Красного Знамени (1968 г.) и медалями, отмечен благодарственными грамотами министра здравоохранения, администрации области, департамента здравоохранения, ректора АГМИ [1, 3, 6]. Его знали и ценили ведущие травматологи-ортопеды страны. Доклады о восстановительной хирургии профессора В.Ф. Цель пользовались большим успехом на конференциях учёных в Москве, Ленинграде, Одессе, Ереване, Чехословакии [3]. Владимир Фёдорович стал организатором динамично развивающейся научной травматолого-ортопедической службы.

Сотрудники кафедры под его руководством занимались проблемами травматизма в судоремонтной, лесной и деревообрабатывающей промышленности, в сельском хозяйстве, но приоритетным стало исследование влияния местного влажного холода на заживление переломов трубчатых костей, на секреторную и моторную функции желудка в эксперименте [1].

На кафедре с момента её основания работали доценты Эльза Альфредовна Лусь (1922–1998) и Римма Александровна Клепикова (1929–2007) [1].

Э.А. Лусь — хирург, травматолог-ортопед, заслуженный врач РФ (1991 г.), кандидат медицинских наук (1957 г.),

доцент (1966 г.). Много лет вела студенческий научный кружок, на занятиях которого проводились клинические и экспериментальные работы по профилю кафедры. Научные интересы Эльзы Альфредовны включали вопросы топографической и вариантной анатомии, особенности регенерации костной ткани на Севере, ауто- и аллопластику костной ткани, хирургическое лечение хронического остеомиелита, применение компрессионно-дистракционного остеосинтеза при лечении приобретённой и врождённой патологии ОДА, экспериментально-морфологические исследования по вопросам артропластики. Она — автор кандидатской диссертации «К вопросу о топографической анатомии толстых кишок» (1957 г.) [1, 4, 7].

Эльза Альфредовна внедрила в практику здравоохранения ряд усовершенствований: ЧКДО при переломах и ложных суставах костей конечностей, пластику связочного аппарата коленного сустава, восстановительные операции на кисти, ангиографию в травматологии и ортопедии. Разработала методику лечения острого и хронического остеомиелита с применением биологической пасты. Автор 75 публикаций и 25 рационализаторских предложений. Награждена знаком «Отличник здравоохранения» (1965 г.), медалью «Ветеран труда» (1985 г.), орденом Трудового Красного Знамени (1986 г.) [1, 4].

Имя Риммы Александровны Клепиковой хорошо известно не только в Северном регионе. Р.А. Клепикова — детский травматолог-ортопед, кандидат медицинских наук (1966 г.), заслуженный врач РСФСР (1982 г.), доцент (1972 г.). Научные интересы: вопросы детской ортопедии, травматологии и костной пластики, организация детской травматолого-ортопедической службы в городе и области. Р.А. Клепиковой подготовлена и защищена кандидатская диссертация «Ауто- и гомотрансплантация фасции в эксперименте» (1966 г.) [1, 4, 7].

Римма Александровна внедрила в практику здравоохранения консервативные и оперативные методы и способы лечения детей с патологией ОДА (врождённым вывихом бедра, сколиозом), костную и фасциальную ауто- и гомопластику. Ученица и последователь профессора В.Ф. Цель, очень деятельный по натуре человек, Р.А. Клепикова стала инициатором выделения детской ортопедии как самостоятельного направления. Её организаторский талант способствовал успешному развитию детской ортопедической службы, которая занимается больными сколиозом позвоночника начиная с родильных домов, детских садов, школ, в том числе специализированных. Р.А. Клепикова работала в тесном сотрудничестве с коллегами ведущих учреждений страны, в частности с Институтом детской травматологии и ортопедии им. Г.И. Турнера, Центральным институтом травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. Была

⁴ Киров Александр Андреевич (1913, д. Прилучное Архангельской области — 1977, г. Архангельск) — нейрохирург, д-р мед. наук, профессор, ректор Архангельского государственного медицинского института (1953–1961).

участницей многих конференций и съездов врачей. Плодотворно представляла АО в комитете по охране здоровья Верховного Совета РСФСР (1990–1993 гг.). Много лет она совмещала работу на кафедре с должностью начальника санитарной авиации [2, 4, 8, 9].

По инициативе и при непосредственном участии Р.А. Клепиковой открывались специализированные отделения в больницах Архангельска и Северодвинска, школа-интернат для детей со сколиозом позвоночника в г. Архангельске, центр для лечения детей с детским церебральным параличом в г. Северодвинске. Созданная под её руководством система организации детской травматолого-ортопедической службы получила одобрение специалистов в России и за её пределами [1, 4].

В 1974–1990 гг. кафедрой травматологии, ортопедии и ВМХ заведовал Олег Клавдиевич Сидоренков (1925–2001). О.К. Сидоренков — травматолог-ортопед, заслуженный врач РСФСР (1989 г.), доктор медицинских наук (1973 г.), профессор (1975 г.). Научные интересы: актуальные вопросы травматологии и ортопедии, региональной патологии ОДА, профилактика травматизма, особенности консолидации переломов на Севере, травматизм на предприятиях судоремонтной и судостроительной промышленности, множественная и сочетанная травма, смертность и летальность от травм в АО, реабилитация больных и инвалидов с последствиями травм и заболеваниями ОДА. Олег Клавдиевич был участником Великой Отечественной войны. После демобилизации поступил в АГМИ, который окончил с отличием (1956 г.). Работая на кафедре госпитальной хирургии, вёл курс военно-полевой хирургии. На кафедре травматологии, ортопедии и ВМХ с 1972 г. начал работать доцентом, а затем — заведующим. Под руководством профессора В.Ф. Цель защитил кандидатскую диссертацию «Влияние заболеваний прямой кишки на секреторную и моторную функцию желудка» (1963 г.), затем — докторскую диссертацию «Отражённые реакции желудка при местном хроническом сочетанном воздействии холода и влаги» (1973 г.) [2, 4, 5, 10].

За 16 лет его руководства клиническая база кафедры постепенно выросла до 270 коек и укрепилась. Открылись новые травматологические отделения в городах Новодвинске, Северодвинске, Котласе, Вельске. В ряде поликлиник стали функционировать травматологические кабинеты, оказывающие амбулаторную помощь населению области. Появилась возможность координации и управления всей службой из единого центра, которым стала кафедра травматологии и ортопедии [1, 4, 5].

В 1990–2006 гг. кафедрой заведовал выпускник АГМИ Геннадий Михайлович Медведев — травматолог-ортопед, заслуженный врач РФ (1998 г.), заведующий кафедрой травматологии, ортопедии и ВХ (1990–2006 гг.), доктор медицинских наук (1994 г.), профессор (1995 г.). Г.М. Медведев работал ассистентом, а затем доцентом кафедры травматологии, ортопедии и ВМХ с момента её организации. Одновременно руководил отделением травматологии

и ортопедии АОКБ, а также совмещал должность начальника санитарной авиации с работой бортихирургом-травматологом [2, 4, 5, 8].

Результаты многолетних исследований качества лечения травматологических пациентов в районных и городских больницах он обобщил в кандидатской диссертации «Травматизм в сельском хозяйстве и его профилактика (по материалам Каргопольского, Приморского и Холмогорского районов Архангельской области)» (1970 г.), которую он успешно защитил в Первом Московском медицинском институте, и докторской диссертации «Травматологическая помощь населению Европейского Севера, пути повышения эффективности и её планирование в условиях локальных катастроф» (1994 г.) [4, 5].

Г.М. Медведев — ортопед-травматолог высшей категории, которому были доступны современные сложные методики оперативного лечения повреждений и заболеваний ОДА. Он являлся инициатором внедрения в специализированных учреждениях города Архангельска и области метода ЧКДО по Г.А. Илизарову (1965 г.) [1, 4, 5].

Галина Владимировна Пяткова — травматолог-ортопед, кандидат медицинских наук (1986 г.), ассистент (1972–2008 гг.), доцент кафедры травматологии, ортопедии и ВХ (2008–2014 гг.). Г.В. Пятковой на базе гарнизонного госпиталя был внесён ряд рационализаторских предложений при лечении заболеваний и повреждений ОДА военнослужащих. Внедрила в практику здравоохранения различные варианты ЧКДО по Г.А. Илизарову при лечении повреждений и заболеваний опорно-двигательного аппарата, сегментарную и частичную резекцию костей по поводу доброкачественных опухолей с аллопластикой обычными и лиофилизированными трансплантатами, использование гипербарической оксигенации в комплексном лечении перегрузочной болезни, внутривенное введение озонированных растворов и озонирование крови при политравме и огнестрельных переломах, лечение контрактуры Дюпюитрена методом «открытая кисть» с применением ЧКДО и оригинальной гипсовой повязки и др. Защитила кандидатскую диссертацию на тему «Регенерация костной ткани при лечении переломов в аппарате Г.А. Илизарова после длительного охлаждения конечности в воде» (1986 г.) [2, 4, 8, 10].

Успешно продолжил разработку различных вариантов корригирующих операций на крупных суставах Евгений Александрович Лебединцев — травматолог-ортопед, кандидат медицинских наук (1982 г.), заслуженный врач РФ (2007 г.), ассистент (1977–1995 гг.), доцент (1995–2008 гг.) кафедры травматологии, ортопедии и ВХ. Автор кандидатской диссертации на тему «Влияние местного хронического охлаждения во влажной среде на регенерацию костной ткани» (1982 г.). Исследования Г.В. Пятковой и Е.А. Лебединцева убедительно показали снижение активности регенерации кости при переломе и умеренной дистракции отломков, подвергшихся охлаждению

во влажной среде, с проявлениями стойких нарушений кровоснабжения конечности и обмена веществ в костной ткани [2, 4, 8, 10].

Доброй памятью о профессоре В.Ф. Цель и его учениках является продолжение совместной плодотворной работы

на благо пациентов коллективов кафедры травматологии, ортопедии и ВХ ФГБОУ ВО «Северный государственный медицинский университет» (АГМИ — АГМА — СГМУ) и клинических отделений травматологии и ортопедии лечебных учреждений г. Архангельска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеев Р.П., Андреева А.В. Кафедра травматологии, ортопедии и военной хирургии. В кн.: Достояние Севера: АГМИ — АГМА — СГМУ: сборник статей / под ред. Л.Н. Горбатовой. Архангельск, 2017. С. 179–184.
2. Сидоров П.И., Щуров Г.С. Медицинский образовательный и научный центр Европейского Севера России. Т. 2. Архангельск: Издательский центр СГМУ, 2002. 496 с.
3. 14 марта — 115 лет со дня рождения Владимира Фёдоровича Целя. В кн.: Юбилейные и памятные даты медицины и здравоохранения Архангельской области на 2013 год. Архангельск, 2013. С. 63.
4. Щуров Г.С. Хирургические кафедры Северного государственного медицинского университета. Архангельск, 2002. 127 с.
5. Щуров Г.С. Профессора Северного государственного медицинского университета в 2000 году. Архангельск: Издательский центр СГМУ, 2001. 600 с.

6. Сидоренков О.К., Медведев Г.М. Профессор В.Ф. Цель (100 лет со дня рождения) // Экология человека. 1998. № 4. С. 5–6.
7. Быков В.П., Баранов А.В., Баранов А.Н., и др. Архангельская областная клиническая больница. Изд. 2-е, перераб. и доп. Архангельск: Изд-во СГМУ, 2019. 300 с.
8. Щуров Г.С., Сидоров П.И. Медицинский образовательный и научный центр Европейского Севера России. Т. 1. Архангельск: Издательский центр СГМУ, 2002. 520 с.
9. Заросликова Л.А. Сидоренков Олег Клавдиевич. В кн.: Поморская энциклопедия. Архангельск, 2012. Т. 4: Культура Архангельского Севера. С. 488.
10. Быков В.П. Цель Владимир Теодорович. В кн.: Поморская энциклопедия. Архангельск, 2012. Т. 4: Культура Архангельского Севера. С. 575.

REFERENCES

1. Matveev RP, Andreeva AV. Department of Traumatology, Orthopedics and Military Surgery. In: Gorbatova LN, editor. *The Heritage of the North: AGMI — AGMA — NSMU: collection of articles*. Arkhangelsk; 2017. P. 179–184.
2. Sidorov PI, Shchurov GS. *Medical Educational and Scientific Center of the European North of Russia*. Vol. 2. Arkhangelsk: Publishing house center of NSMU; 2002. 496 p.
3. 14 March — 115th anniversary of the birth of Vladimir Fedorovich Tsel. In: *Anniversaries and memorable dates of medicine and healthcare of the Arkhangelsk region for 2013*. Arkhangelsk; 2013. P. 63.
4. Shchurov GS. *Surgical departments of the Northern State Medical University*. Arkhangelsk; 2002. 127 p.
5. Shchurov GS. *Professor of the Northern State Medical University in 2000*. Arkhangelsk: Publishing house center of NSMU; 2001. 600 p.

6. Sidorenkov OK, Medvedev GM. Professor V.F. Goal (100 years since birth). *Human ecology*. 1998;(4):5–6.
7. Bykov VP, Baranov AV, Baranov AN, et al. *Arkhangelsk Regional Clinical Hospital*. 2nd edition, reprint. and add. Arkhangelsk: Publishing House of NSMU; 2019. 300 p.
8. Shchurov GS, Sidorov PI. *Medical Educational and Scientific Center of the European North of Russia*. Vol. 1. Arkhangelsk: Publishing house center of NSMU; 2002. 520 p.
9. Zaroslikova LA. Sidorenkov Oleg Klavdievich. In: *Pomorskaya encyclopedia*. Arkhangelsk; 2012. Vol. 4: Culture of the Arkhangelsk North. P. 488.
10. Bykov VP. Tsel Vladimir Teodorovich. In: *Pomorskaya encyclopedia*. Arkhangelsk; 2012. Vol. 4: Culture of the Arkhangelsk North. P. 575.

ОБ АВТОРАХ

* Брагина Светлана Валентиновна, канд. мед. наук; адрес: 163069, Россия, Архангельск, пр. Троицкий, 51; ORCID: 0000-0002-0900-4572; eLibrary SPIN: 5490-9821; e-mail: svetabragina69@mail.ru

Андреева Анна Владимировна; ORCID: 0000-0001-9699-5820; eLibrary SPIN: 9204-6355; e-mail: aandra@yandex.ru

AUTHORS' INFO

* Svetlana V. Bragina, MD, Cand. Sci. (Medicine); address: 51 Troitsky ave., 163069 Arkhangelsk, Russia; ORCID: 0000-0002-0900-4572; eLibrary SPIN: 5490-9821; e-mail: svetabragina69@mail.ru

Anna V. Andreeva; ORCID: 0000-0001-9699-5820; eLibrary SPIN: 9204-6355; e-mail: aandra@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Ивенин Андрей Викторович;

ORCID: 0009-0002-3134-2815;

e-mail: fancy.ivenin@yandex.ru

Яшин Иван Владимирович;

ORCID: 0009-0001-9581-3121;

e-mail: ivan.yashin29@yandex.ru

Самбуров Глеб Олегович, д-р мед. наук;

ORCID: 0000-0002-0742-9999;

eLibrary SPIN: 8677-6287;

e-mail: museumsmu@mail.ru

Родионова Светлана Семёновна, д-р мед. наук;

ORCID: 0000-0002-2726-8758;

eLibrary SPIN: 3529-8052;

e-mail: rod06@inbox.ru

Andrey V. Ivenin;

ORCID: 0009-0002-3134-2815;

e-mail: fancy.ivenin@yandex.ru

Ivan V. Yashin;

ORCID: 0009-0001-9581-3121;

e-mail: ivan.yashin29@yandex.ru

Gleb O. Samburov, MD, Dr. Sci. (Medicine);

ORCID: 0000-0002-0742-9999;

eLibrary SPIN: 8677-6287;

e-mail: museumsmu@mail.ru

Svetlana S. Rodionova, MD, Dr. Sci. (Medicine);

ORCID: 0000-0002-2726-8758;

eLibrary SPIN: 3529-8052;

e-mail: rod06@inbox.ru

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto634803>

Поздравляем С.А. Джумабекова с 60-летием!

АННОТАЦИЯ

Краткая биографическая справка и научные достижения Сабырбека Артисбековича Джумабекова, поздравление с 60-летним юбилеем.

Ключевые слова: Сабырбек Артисбекович Джумабеков; юбилей; травматология и ортопедия.

Как цитировать:

Поздравляем С.А. Джумабекова с 60-летием! // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2024. Т. 31, № 3. С. 449–452.

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto634803>

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto634803>

Congratulations to Sabyrbek A. Jumabekov on his 60th anniversary!

ABSTRACT

Brief biographical information and scientific achievements of Sabyrbek A. Jumabekov, congratulations on the 60th anniversary.

Keywords: Sabyrbek A. Jumabekov; anniversary; traumatology and orthopedics.

To cite this article:

Congratulations to Sabyrbek A. Jumabekov on his 60th anniversary! *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2024;31(3):449–452.

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto634803>

Received: 02.08.2024

Accepted: 02.08.2024

Published online: 08.08.2024



В августе 2024 г. исполняется 60 лет С.А. Джумабекову — заведующему кафедрой травматологии, ортопедии и экстремальной хирургии Кыргызской государственной медицинской академии им. И.К. Ахунбаева. Сабырбек Артисбекович Джумабеков — доктор медицинских наук, профессор, академик Национальной академии наук Кыргызской Республики (КР), иностранный член Российской академии наук, заслуженный деятель науки КР, заслуженный врач КР, дважды лауреат Госпремии КР в области науки и техники, лауреат Межгосударственной премии стран СНГ в области науки и образования «Звёзды Содружества». Он является кавалером ордена «Манас» I, II степени Кыргызской Республики, ордена Дружбы II степени Республики Казахстан.

После окончания Кыргызского государственного медицинского института С.А. Джумабеков поступил в аспирантуру, а затем в докторантуру на кафедру травматологии и ортопедии Крымского медицинского института в г. Симферополе. В 1991 г. он успешно защитил кандидатскую диссертацию на тему «Клинико-биомеханическое обоснование остеотомии при удлинении бедра аппаратом А.И. Блискунова» в г. Москве, а в 1995 г. в возрасте 30 лет блестяще защитил докторскую диссертацию в Московской медицинской академии на тему «Удлинение бедра аппаратом А.И. Блискунова».

Трудовая деятельность С.А. Джумабекова в Кыргызстане началась в 1995 г. в Кыргызском НИИ курортологии и восстановительного лечения на должности заведующего научным отделом ортопедии. С 2002 по 2004 г. он работал директором Бишкекского департамента здравоохранения и территориального управления Фонда обязательного медицинского страхования. Накопленный профессиональный опыт и организаторские способности С.А. Джумабекова проявились в открытии в 2004 г. Бишкекского

научно-исследовательского центра травматологии и ортопедии Министерства здравоохранения КР. За короткий период времени центр был оснащён самым современным лечебно-диагностическим оборудованием и достиг уровня известных профильных институтов стран ближнего и дальнего зарубежья. В 2011–2012 гг. С.А. Джумабеков работал министром здравоохранения КР. В период работы в качестве министра он добился повышения заработной платы медработникам республики в 3 раза, в результате чего была приостановлена текучесть кадров, особенно среди медработников среднего и младшего звена. По инициативе академика С.А. Джумабекова впервые был организован Евразийский конгресс на берегу Иссык-Куля с участием представителей 17 стран дальнего и ближнего зарубежья, на котором были приняты устав и положение о Евразийском конгрессе, и С.А. Джумабеков был единогласно избран его почётным президентом. Академик С.А. Джумабеков является президентом Ассоциации травматологов-ортопедов Кыргызской Республики, членом Всемирного хирургического общества ортопедов-травматологов SICOT, EFORT, AAOS, ASAMI, COA, TOT. В 2008 г. Сент-Луисский университет (США) присвоил ему звание почётного профессора университета и выдал диплом «профессора-визитора». Он также является почётным членом Ассоциации ортопедов-травматологов штата Миссури (США), почётным жителем города Санта-Круз, Калифорния (США). Научные разработки, выполненные под руководством профессора С.А. Джумабекова, нашли широкое применение в практическом здравоохранении не только в Кыргызстане, но и за его пределами.

С.А. Джумабеков подготовил 12 докторов наук, 51 кандидата медицинских наук; в стадии завершения 25 кандидатских и 6 докторских диссертаций. Для Республики Казахстан им подготовлены 1 доктор наук, 4 кандидата наук

и 75 врачей травматологов-ортопедов. Для Российской Федерации подготовлены 4 кандидата наук и 32 травматолога-ортопеда. Сабырбек Артисбекович является автором более 620 научных трудов, 119 изобретений и 28 рационализаторских предложений, 4 монографий — «Удлинение бедра внутрикостным дистрактором» (2003 г.), «Микрохирургическая дискэктомия и лечение вторичных рубцово-спаечных процессов эпидурального пространства при грыжах пояснично-крестцового отдела позвоночника» (2004 г.), «Хирургическое лечение повреждений, их последствий и дегенеративных поражений груднопоясничного отдела позвоночника» (2008 г.); «Сөөк скелетинин сыныктарын заманбап дарылоо» (2014 г.).

Трудовая деятельность С.А. Джумабекова неоднократно отмечена Минздравом, правительством КР, организациями зарубежных стран. Он является лауреатом Государственной премии Кыргызской Республики в области качества, дважды лауреатом Государственной премии в области науки и техники Кыргызской Республики, лауреатом молодёжной премии Кыргызской Республики. Награждён медалями «1000 лет эпосу «Манас»» (Кыргызстан), «За заслуги в военной медицине» Общероссийской организации «Российский союз ветеранов Афганистана», золотой медалью «Хирург — золотые руки» в области науки и техники Международной премии Мустафы Камаль Ататюрка (Турция), Большой золотой медалью Всемирной организации интеллектуальной собственности при ООН (Женева), золотой медалью Американского биографического института за выдающийся вклад в области мировой

ортопедии и травматологии и медалью «Шёлковый путь» за вклад в укрепление здоровья (КНР). Награждён орденом Кембриджского биографического центра за особые заслуги в области ортопедии (США), орденом Пирогова (Россия), орденом Дружбы II степени (Казахстан), орденом «За заслуги» Парламентского центра (Россия). Неоднократно был лауреатом и награждался международными премиями «Руханият», «Намыс», «Сапат» (Кыргызстан), «Айкол-Манас — Человек года» в области медицины в номинации «Лучший хирург года» (Европейский проект), молодёжной премией Кыргызской Республики в номинации «Наука и новые технологии», стал лауреатом международной премии «Звёзды Содружества», награждён Советом государств — участников СНГ в области науки и образования и др. Кавалер ордена «Манас» I и II степени Кыргызской Республики.

Свой 60-летний юбилей Сабырбек Артисбекович встречает в расцвете творческих замыслов и вдохновения, он полон сил и энергии. Коллектив кафедры травматологии, ортопедии и экстремальной хирургии Кыргызской государственной медицинской академии им. И.К. Ахунбаева желает ему успехов на поприще науки и здравоохранения, талантливых учеников, здоровья, семейного благополучия и долгих лет жизни.

Редакция журнала «Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова» присоединяется к поздравлениям и желает юбиляру долгих лет творческой жизни на благо науки и крепкого здоровья!

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto635596>

Памяти Анатолия Николаевича Шальнева

АННОТАЦИЯ

23 августа 2024 года на 82-м году жизни скончался Анатолий Николаевич Шальнев — доктор медицинских наук, лауреат премии Правительства России в области науки и техники, один из старейших сотрудников НМИЦ травматологии и ортопедии имени Н.Н. Приорова. Коллектив ЦИТО им. Н.Н. Приорова скорбит о невозможной утрате.

Ключевые слова: Анатолий Николаевич Шальнев; некролог; травматология и ортопедия.

Как цитировать:

Памяти Анатолия Николаевича Шальнева // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2024. Т. 31, № 3. С. 453–455.

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto635596>

DOI: <https://doi.org/10.17816/vto635596>

In memory of Anatoly N. Shalnev

ABSTRACT

On 23 August 2024, Anatoly Nikolayevich Shalnev, Doctor of Medical Sciences, winner of the Russian Government Prize in the field of science and technology, one of the oldest employees of the National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics named after N.N. Priorov, passed away at the age of 82. The staff of National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics named after N.N. Priorov mourns the irreparable loss.

Keywords: Anatoly N. Shalnev; obituary; traumatology and orthopaedics.

To cite this article:

In memory of Anatoly N. Shalnev. *N.N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*. 2024;31(3):453–455. DOI: <https://doi.org/10.17816/vto635596>

Received: 02.09.2024

Accepted: 02.09.2024

Published online: 09.09.2024



23 августа 2024 года на 82-м году жизни скончался Анатолий Николаевич Шальнев.

Анатолий Николаевич начал свою трудовую деятельность в 1962 году лаборантом Полярного научно-исследовательского института в г. Мурманске. В 1970 году окончил Архангельский государственный медицинский институт. По окончании института работал научным сотрудником в лаборатории по пересадке органов и тканей АМН СССР, в дальнейшем — в НИИ иммунологии АМН СССР. Кандидатская диссертация Анатолия Николаевича «Система свёртывания крови и фибринолиза в раннем постишемическом периоде турникетного шока» выполнялась в лаборатории Академии медицинских наук СССР и была защищена в 1987 году.

С 1986 года Анатолий Николаевич Шальнев трудился в ЦИТО им. Н.Н. Приорова, где возглавлял лабораторию патофизиологии травматических повреждений опорно-двигательного аппарата. В 1994 году он возглавил отдел экспериментальной травматологии и ортопедии, созданный путём слияния двух лабораторий: экспериментальной травматологии и ортопедии и патофизиологии травматических повреждений опорно-двигательного аппарата, и был его бессменным руководителем. Научные интересы Анатолия Николаевича были направлены на изучение

патофизиологических аспектов травматолого-ортопедической патологии, разработку и совершенствование эффективных методов диагностики и лечения травм и заболеваний опорно-двигательного аппарата. Он активно участвовал в выполнении научных задач, имеющих оборонное значение.

В 1995 году А.Н. Шальнев успешно защитил докторскую диссертацию на тему «Лечение огнестрельных и гнойно-осложнённых ран с помощью антиоксидантов и углеродных тканевых сорбентов».

Анатолий Николаевич — автор более 100 печатных работ, в том числе одной монографии, соавтор одного открытия, автор пяти изобретений. Под его руководством успешно защищён ряд кандидатских диссертаций. В 2006 году Анатолий Николаевич был награждён нагрудным знаком «Отличник здравоохранения». В 2008 году за разработку и освоение производства комплекса высокоэффективного нелетального бесствольного гражданского и служебного оружия он был удостоен премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники.

Коллектив ЦИТО им. Н.Н. Приорова скорбит о невосполнимой утрате. Светлая память о талантливом человеке, учёном, исследователе навсегда останется в сердцах его друзей, коллег и учеников.