

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ В ОПЕРАТИВНОМ ЛЕЧЕНИИ ЧРЕЗВЕРТЕЛЬНЫХ ПЕРЕЛОМОВ БЕДРЕННОЙ КОСТИ

¹Леонтьев К.Д. ORCID ID 0009-0008-5514-8682,

¹Галлямов Г.Р. ORCID ID 0009-0009-0175-9362,

¹Галлямова А.Х. ORCID ID 0009-0006-0295-0503,

¹Леонтьев Е.А. ORCID ID 0000-0002-7406-2074,

²Васильев А.А. ORCID 0009-0009-7155-6341, ¹Елдырёва М.В. ORCID ID 0000-0003-2076-9477

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», Чебоксары, Российская Федерация, e-mail: lea737@yandex.ru;

²Бюджетное учреждение здравоохранения «Новочебоксарская городская больница» Министерства здравоохранения Чувашской Республики, Новочебоксарск, Российская Федерация

Цель исследования – разработка и апробация автоматизированного метода количественного анализа посттравматических деформаций тазобедренного сустава на основе 3D-моделей, созданных с применением нейронных сетей, для оптимизации предоперационного планирования хирургической коррекции чрезвертельных переломов бедренной кости. Описывается клинический случай оперативного лечения пациента с чрезвертельным переломом бедренной кости. В предоперационном периоде применялась технология 3D-моделирования для создания возможности имитации процесса остеосинтеза. Применены нейронные сети для автоматической сегментации и количественного анализа чрезвертельных переломов, что снижает субъективность и стандартизирует предоперационное планирование. Интеграция ИИ с 3D-моделированием позволяет создавать персонализированные модели, значительно повышая точность и предсказуемость хирургических вмешательств. Пациенту А., 48 лет, с диагнозом: чрезвертельный перелом бедренной кости, была проведена компьютерная томография проксимального отдела бедра. Исходя из полученных данных была создана трехмерная модель бедренной кости с чрезвертельным переломом. При использовании этой модели было проведено предоперационное моделирование этапов остеосинтеза, что позволило сократить время выполнения хирургического вмешательства, направленного на восстановление исходной анатомической структуры области перелома. Разработанный автоматизированный метод на основе нейросетевых 3D-моделей позволяет точно анализировать посттравматические деформации тазобедренного сустава и персонализированно планировать хирургическую коррекцию чрезвертельных переломов. Его применение повышает точность вмешательства, снижает риск осложнений и улучшает функциональные результаты лечения. Апробация подтверждает клиническую эффективность и готовность метода к внедрению в практику.

Ключевые слова: 3D-моделирование и прототипирование, сложные переломы области тазобедренного сустава, оперативное лечение.

THE USE OF 3D-MODELING IN THE SURGICAL TREATMENT OF TRANSVERSAL FEMORAL FRACTURES

¹Leontev K.D. ORCID ID 0009-0008-5514-8682,

¹Gallyamov G.R. ORCID ID 0009-0009-0175-9362,

¹Gallyamova A.Kh. ORCID ID 0009-0006-0295-0503,

¹Leontev E.A. ORCID ID 0000-0002-7406-2074,

²Vasilev A.A. ORCID 0009-0009-7155-6341, ¹Eldyrev M.V. ORCID ID 0000-0003-2076-9477

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Chuvash State University named after I.N. Ulyanov”, Cheboksary, Russian Federation, e-mail: lea737@yandex.ru;

²Budgetary institution of Healthcare “Novocheboksarsk City Hospital” of the Ministry of Health of the Chuvash Republic, Novocheboksarsk, Russian Federation

The aim of the study was to develop and test an automated method for quantitative analysis of post-traumatic hip deformities based on 3D models created using neural networks to optimize preoperative planning for surgical correction of transversal femoral fractures. A clinical case of surgical treatment of a patient with a transversal femoral fracture is described. In the preoperative period, 3D modeling technology was used to create

the possibility of simulating the osteosynthesis process. Neural networks have been used for automatic segmentation and quantitative analysis of transversal fractures, which reduces subjectivity and standardizes preoperative planning. The integration of AI with 3D modeling allows you to create personalized models, significantly increasing the accuracy and predictability of surgical procedures. Patient A., 48 years old, with a diagnosis of a transversal femoral fracture, underwent computed tomography of the proximal femur. Based on the data obtained, a three-dimensional model of a femur with a transversal fracture was created. Using this model, preoperative modeling of the stages of osteosynthesis was performed, which made it possible to reduce the time required for surgical intervention aimed at restoring the initial anatomical structure of the fracture area. The developed automated method based on 3D neural network models allows accurate analysis of post-traumatic hip joint deformities and personalized planning of surgical correction of transversal fractures. Its use increases the accuracy of the intervention, reduces the risk of complications and improves the functional results of treatment. The approbation confirms the clinical effectiveness and readiness of the method to be put into practice.

Keywords: 3D modeling and prototyping, complex hip fractures, surgical treatment.

Введение

Более половины всех случаев повреждения бедра приходится на переломы проксимального отдела бедренной кости. В современной травматологии и ортопедии минимизация риска послеоперационных осложнений при данных повреждениях достигается корректной реализацией оперативного лечения, что также позволяет сократить сроки функциональной реабилитации пациентов [1, 2].

Дальнейшее усовершенствование хирургического лечения возможно посредством применения созданных методом аддитивного производства трехмерных физических моделей на основе данных компьютерной томографии (КТ). Полноразмерные копии проксимального отдела бедренной кости позволяют оптимизировать результаты операции, предоставляя возможность детального планирования хода оперативного вмешательства и отработки техники остеосинтеза с применением фиксирующих конструкций [3, 4]. Такой подход сокращает продолжительность вмешательства, а также уменьшает вероятность интраоперационных осложнений [5].

Сочетание автоматизированного анализа данных КТ и биомеханического моделирования является современным направлением травматологии, которое позволяет индивидуализировать тактику лечения с параллельным повышением его эффективности [6–8].

В последние годы наблюдается широкое внедрение нейросетевых алгоритмов. На их основе проводится автоматическая сегментация костных структур, что обеспечивает точное выделение и дифференцировку фрагментов перелома. Все это является критически важной составляющей успешной репозиции и остеосинтеза. Также автоматизация применяется и для анализа КТ, что позволяет сократить временные затраты на планирование лечения [9, 10].

Планирование лечения также включает в себя необходимость моделирования биомеханических процессов и составления прогноза исходов, ключевыми предикторами которых является количественная оценка межфрагментных расстояний, углов и

пространственного положения относительно нормальной анатомии. Данные параметры оказывают существенное влияние на выбор стратегии хирургического вмешательства [11–13].

В выборе стратегии хирургического вмешательства имеет существенное значение персонализированная биомеханическая модель, построенная на основе расчетов плотности костной ткани [7, 11]. Ее применение не только упрощает этап планирования операции, позволяя провести расчеты нагрузок и напряжений, но и уменьшает риск повторных смещений и послеоперационных осложнений [14]. Некоторые работы демонстрируют увеличение частоты консолидации переломов в среднем на 15 % и снижение доли неблагоприятных исходов на 8 % при применении компьютерного моделирования остеосинтеза [5].

Автоматизированные базы данных и биомеханические модели являются составными частями виртуального планирования остеосинтеза, который способствует рационализации в подборе фиксирующих конструкций, их типа и расположения, снижая риск неправильного позиционирования и неподходящей репозиции [6].

Дальнейшая интеграция нейросетевых технологий и математических моделей в клиническую практику является перспективным направлением в развитии «виртуальной хирургии» и автоматизации выбора тактики терапии переломов бедра [9, 10, 15].

Цель исследования – разработка и апробация автоматизированного метода количественного анализа посттравматических деформаций тазобедренного сустава на основе 3D-моделей, созданных с применением нейронных сетей, для оптимизации предоперационного планирования хирургической коррекции чрезвертельных переломов бедренной кости.

Материал и методы исследования

Предлагаемый метод представляет собой комплексный подход к планированию и оптимизации хирургического лечения переломов бедренной кости, основанный на автоматизированном анализе КТ-данных и биомеханическом моделировании. На первом этапе осуществляется автоматическая сегментация костных структур с помощью обученной нейронной сети, что позволяет точно выделять и классифицировать фрагменты перелома – включая головку бедренной кости, ее тело и элементы вертельной области. Далее проводится количественная оценка смещения фрагментов: измеряются расстояния и углы между ними, а также анализируется их пространственное положение относительно анатомической нормы. На основе этих данных и значений плотности костной ткани строится персонализированная биомеханическая модель, в рамках которой с помощью метода конечных элементов

моделируются нагрузки на конструкцию после остеосинтеза. Это позволяет оптимизировать хирургическую тактику: выбрать наиболее подходящий тип металлоконструкции, определить его оптимальное позиционирование и разработать виртуальный протокол репозиции фрагментов. Завершающим этапом является оценка клинической эффективности предложенного метода – путем сравнения точности репозиции, частоты послеоперационных осложнений и сроков реабилитации с показателями, достигаемыми при использовании традиционных подходов к планированию операции. В совокупности данный подход обеспечивает повышение точности, предсказуемости и безопасности хирургического вмешательства.

Результаты исследования и их обсуждение

Пациент А., 1976 г.р., поступил в БУ «Новочебоксарская городская больница» МЗ ЧР 20.12.2024 с подозрением на перелом бедренной кости в результате падения с крыши сарая при выполнении хозяйственных работ. Диагноз при поступлении в БУ «Новочебоксарская городская больница» МЗ ЧР: чрезвычайный перелом правой бедренной кости.

Пациент госпитализирован в отделение травматологии и ортопедии стационара. Во время поступления пациенту была выполнена КТ проксимального отдела бедра, в результате которой сделано заключение о чрезвычайном переломе бедренной кости со смещением без вколачивания. Учитывая сложный нестабильный характер чрезвычайного перелома бедренной кости, а также значительные риски осложнений, ассоциированные с консервативной тактикой ведения, было принято решение о необходимости оперативного лечения пациента. В целях обеспечения прецизионного предоперационного планирования, детальной визуализации морфологии повреждения и оптимизации подбора фиксирующих металлоконструкций был разработан и изготовлен трехмерный прототип проксимального отдела пораженной бедренной кости. Использование данного анатомического прототипа (рис. 1) предоставило возможность хирургу-ортопеду провести детальный анализ пространственной конфигурации линии излома, объективизировать степень смещения костных фрагментов и, как следствие, разработать оптимальный алгоритм хирургической фиксации.

Процесс реконструкции физической модели посттравматической деформации тазобедренного сустава основывается на использовании цифровых данных, полученных посредством КТ сканирования проксимального отдела бедренной кости. Исходные данные представлены в формате DICOM. Первоначальный этап предполагает конвертацию данных в формат STL (Stereolithography). На последующем этапе осуществляется сегментация релевантных анатомических областей, подлежащих физической репликации. Данная

процедура требует точного выделения целевых структур для обеспечения высокой геометрической точности и клинической достоверности итоговой модели. Заключительная стадия процесса включает генерацию трехмерной полигональной сети, формирующей структурную основу цифровой модели. Полученная трехмерная поверхность экспортируется для последующей обработки в специализированном программном обеспечении, предназначенном для аддитивного производства или виртуального хирургического планирования. Анализ трехмерной модели посттравматической деформации тазобедренного сустава был выполнен с применением экспериментального алгоритма обученной нейронной сети с целью количественной оценки параметров смещения костных фрагментов. Результаты сегментации выявили наличие двух основных костных фрагментов: первый представлен фрагментом бедренной кости с сохраненной суставной головкой, второй образован телом кости, отделившимся вследствие чрезвертельного перелома. Для достижения анатомически корректной репозиции нейросетевая модель сгенерировала рекомендации по пространственной коррекции положения фрагментов. Согласно экспериментальному алгоритму проксимальный фрагмент (1) требует фиксации в текущем положении, в то время как дистальный фрагмент (2) требует выполнения сложного пространственного преобразования: смещения на 7–14 мм по осям X и Y, комбинированной с ротацией на 20–30° по часовой стрелке вокруг оси Z и дополнительного смещения на 7–10 мм по той же оси (рис. 1).

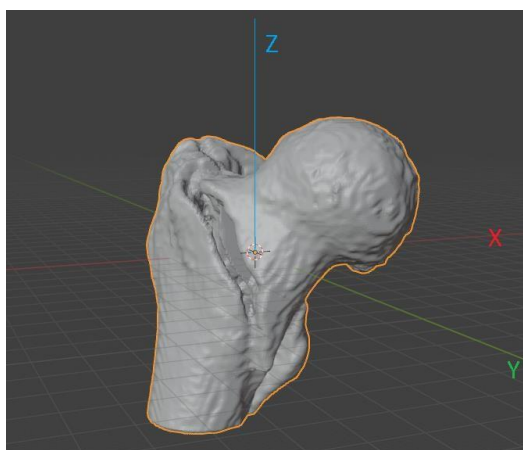
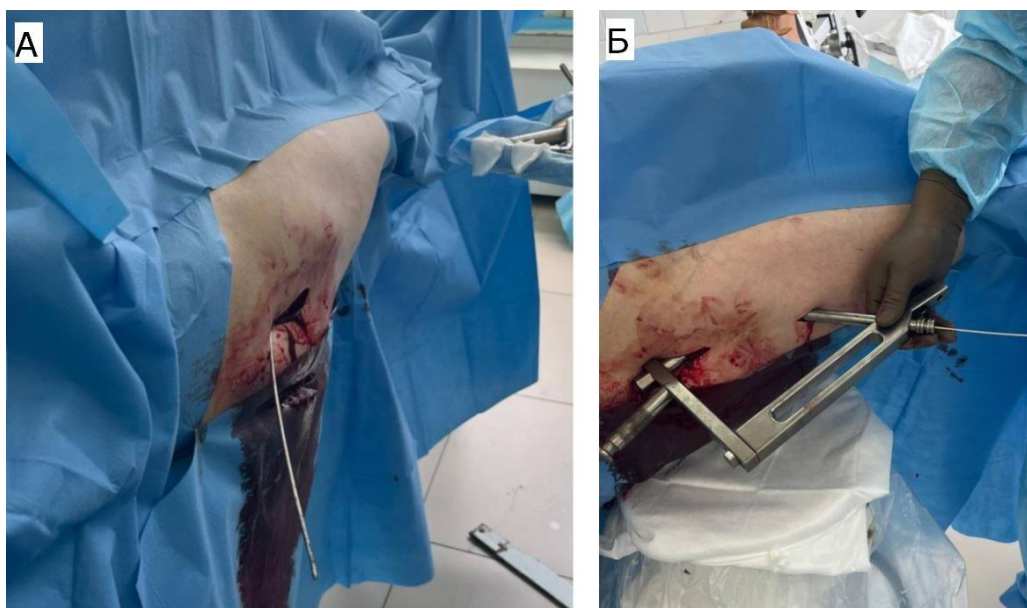


Рис. 1. Трехмерная модель деформации тазобедренного сустава с осями XYZ

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Операция выполнена 24.12.2024: интрамедуллярный остеосинтез чрезвертельного перелома бедренной кости титановым стержнем «Гамма» для фиксации фрагментов проксимального отдела бедра. Выполнен минимально инвазивный трансглютеальный хирургический доступ (рис. 2). Выполнен разрез кожи длиной 8 см над большим вертелом,

ориентируясь на КТ-данные. Он проложен параллельно оси конечности и продлен к нижнему краю вертлужной впадины. Глубокие ткани и фасция рассечены соответственно кожному разрезу. Линия рассечения расширена на 2 см в обе стороны, с легким отклонением: дистальная часть смещена вперед (вентрально), а проксимальная – назад (дорзально). Суставная капсула вскрыта от верхушки вертела в сторону латеральной широкой мышцы бедра. Путем осторожного натяжения сухожильная порция средней ягодичной мышцы отведена и отделена от вертельной верхушки. Затем выполнена поднадкостничная диссекция, при которой сухожилие малой ягодичной мышцы отслоено с сохранением его анатомической связи со средней ягодичной.



*Рис. 2. А – введение проводника в костномозговой канал,
Б – установка шеечного винта*

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

После проведения оперативного вмешательства был осуществлен рентгенологический контроль для оценки положения костных фрагментов. Анализ рентгенограмм позволил установить, что достигнуто удовлетворительное сопоставление фрагментов, что является важным фактором для успешного сращения перелома и восстановления функции конечности.

По завершении оперативного вмешательства рана ушита с соблюдением асептики и антисептики. Для профилактики гематом и сером установлен дренаж. Послеоперационный период протекал без осложнений; признаков инфекции или кровотечения не отмечалось. Пациент находился под тщательным наблюдением на всем протяжении госпитализации.

Выписан через две недели. Удаление металлоконструкций выполнено на 172-й день после операции. В послеоперационном периоде – объем активных движений в правом коленном суставе до 150–160°. Пациент удовлетворен результатами лечения, отмечает значительное улучшение качества жизни и возвращение к работе электромонтером охранно-пожарной сигнализации.

Методы трехмерного моделирования и аддитивного прототипирования занимают центральное место в современном предоперационном планировании, обеспечивая детальный анализ специфики отдельных клинических случаев и минимизацию интраоперационных рисков. Наибольшую значимость данный подход демонстрирует при коррекции многооскольчатых переломов тазобедренного сустава, осложненных неправильной консолидацией или смещением костных фрагментов.

В подобных случаях традиционная рентгенография не обеспечивает исчерпывающей информации о пространственной конфигурации костных фрагментов. Внедрение КТ с функцией трехмерной реконструкции существенно усовершенствовало диагностический алгоритм при сложных костно-травматических патологиях. Однако следует отметить, что стандартная визуализация томографических данных предоставляет статичное изображение. Для преодоления этого ограничения данные томографии конвертируются в точную физическую модель поврежденной кости со всеми ее индивидуальными особенностями. Это дает хирургу возможность не абстрактно, а физически приложить к модели винты и пластины, заранее оценить их размер и позицию и, по сути, отрепетировать ключевые этапы операции на копии.

В данном клиническом случае на основании данных КТ тазобедренного сустава для пациента была создана физическая 3D-модель посттравматической деформации. Детальное предоперационное планирование с использованием этой индивидуальной модели позволило: оценить варианты вмешательства; выбрать оптимальный доступ; определить последовательность этапов операции; точно подобрать размер металлоконструкций. В результате удалось сократить время операции и анестезии, снизить интраоперационную травматизацию тканей и кровопотерю. Несмотря на сложность случая, достигнуто достаточное восстановление функции сустава с сохранением профессиональной трудоспособности пациента.

Заключение

Разработанный автоматизированный метод количественного анализа посттравматических деформаций тазобедренного сустава на основе 3D-моделей, созданных с использованием нейронных сетей, позволяет объективно и точно оценивать анатомические

нарушения при чрезвычайных переломах бедренной кости. Это обеспечивает персонализированный подход к предоперационному планированию, повышает точность выбора тактики хирургической коррекции, оптимизирует позиционирование металлоконструкции и способствует улучшению клинических исходов – за счет снижения риска осложнений, сокращения сроков реабилитации и повышения функциональных результатов лечения. Апробация метода подтверждает его клиническую ценность и потенциал для внедрения в повседневную практику травматологии и ортопедии.

Список литературы

1. Мурзабеков И.А. Алгоритм обследования, принятия решения оперативного лечения и выбора имплантата при переломах проксимального отдела бедренной кости // Вузовское образование и наука: материалы региональной научно-практической конференции (г. Магас, 25 октября 2013 г.). Магас: ООО «Южный издательский дом», 2014. С. 168–170. EDN: UCXDDX.
2. Нурлыгаянов Р.З., Гильмутдинова Л.Т., Гильмутдинов Б.Р., Садыков Т.Р., Нурлыгаянова Д.Р. Медицинская реабилитация пациентов с переломами проксимального отдела бедренной кости при консервативном лечении: современное решение проблемы // Медицина. Социология. Философия. Прикладные исследования. 2025. № 1. С. 136–141. EDN: NWFHSP.
3. Baindurashvili A.G., Baskov V.E., Filippova A.V., Bortulev P.I., Barsukov D.B., Pozdnikin I.Y., Voloshin S.Y., Baskaeva T.V., Poznovich M.S. Planning for corrective osteotomy of the femoral bone using 3D-modeling. Part I // Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery. 2016. Vol. 4. Is. 3. P. 52–58. DOI: 10.17816/PTORS4352-58. EDN: WLYOLH.
4. Baskov V.E., Baindurashvili A.G., Filippova A.V., Barsukov D.B., Krasnov A.I., Pozdnikin I.Y., Bortulev P.I. Planning corrective osteotomy of the femoral bone using three-dimensional modeling. Part II // Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery. 2017. Vol. 5. Is. 3. P. 74–79. DOI: 10.17816/PTORS5374-79. EDN: ZHVDXF.
5. Мышалов А.Ф. Применение компьютерного моделирования в современной травматологии // Молодежь XXI века: шаг в будущее: материалы XXIII региональной научно-практической конференции (г. Благовещенск, 24 мая 2022 г.). Т. 4. Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2022. С. 197–198. EDN: QKJXP.
6. Ямщиков О.Н., Норкин И.А., Марков Д.А., Емельянов С.А. Использование автоматизированного выбора металлоконструкции для остеосинтеза переломов

проксимального отдела бедренной кости на основе компьютерного моделирования // Врач-аспирант. 2014. Т. 65. № 4. С. 26–30. EDN: SZEPTD.

7. Васильев В.Г., Попова О.А., Дудкин В.В., Лебединский В.Ю. Моделирование напряженно-деформированного состояния костной ткани при имплантации // Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра Сибирского отделения Российской академии медицинских наук. 1998. № 1. С. 30–34. EDN: VXKAUZ.

8. Герасимов О.В., Воробьев О.В., Харин Н.В. Моделирование костной ткани по данным компьютерной томографии // Фундаментальные основы механики. 2017. № 2. С. 139–140. EDN: ZMWQGD.

9. Ямщиков О.Н. Применение компьютерного моделирования в лечении переломов бедренных костей // Наука и образование: сборник научных трудов по материалам II Международной научно-практической конференции (г. Анталия – г. Тамбов, 15 марта 2015 г.) / Международная Академия Туризма в Анталии, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина. Анталия – Тамбов: Тамбовская региональная общественная организация «Общество содействия образованию и просвещению «Бизнес – Наука – Общество», 2015. С. 102–110. EDN: VECPLB.

10. Норкин И.А., Свистунов А.А., Марков Д.А., Кауц О.А., Шпиняк С.П., Хачатрян А.Г., Белоногов В.Н. Применение компьютерного моделирования при хирургическом лечении переломов проксимального отдела бедренной кости // Саратовский научно-медицинский журнал. 2010. Т. 6. № 2. С. 419–421. EDN: MWJMTZ.

11. Kaznacheeva T.V., Osipova A.A. Современные методы определения минеральной плотности костной ткани // Russian Journal of Human Reproduction. 2007. Vol. 13. № 6. P. 57–61. EDN: LHQGLX.

12. Морозов С.П., Владзимирский А.В., Басарболиев А.В., Барышов В.И., Агафонова О.А. Систематический обзор применения томосинтеза для диагностики травм и заболеваний опорно-двигательной системы // Гений ортопедии. 2020. Т. 26. № 3. С. 432–441. DOI: 10.18019/1028-4427-2020-26-3-432-441. EDN: DEMRFX.

13. Шерфединов А.С. Возможности уменьшения риска развития нестабильности после эндопротезирования тазобедренного сустава // Forcipe. 2019. Т. 2. № S1. С. 960. EDN: XGWQFO.

14. Шулятьев А.Ф., Акулич Ю.В. Определение пространственного напряженно-деформированного состояния проксимального отдела бедра человека // Прикладная математика, механика и процессы управления. 2014. Т. 1. С. 36–37. EDN: UOHVWZ.

15. Беридзе Р.М., Абед И.М. Эволюция лечения переломов шейки бедренной кости //

Актуальные проблемы медицины: сборник научных статей Республиканской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 30-летию Гомельского государственного медицинского университета. В 5 т. (г. Гомель, 12–13 ноября 2020 г.). Т. 3. Гомель: Учреждение образования «Гомельский государственный медицинский университет», 2020. С. 130. EDN: JPZWBE.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.