

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Объект авторского права
УДК 617.76-001-007.24]-089:004.925.84

ДУДИЧ
Оксана Николаевна

**ХИРУРГИЧЕСКОЕ ЛЕЧЕНИЕ ПАЦИЕНТОВ
С ТРАВМАТИЧЕСКИМИ ДЕФЕКТАМИ И ДЕФОРМАЦИЯМИ
ГЛАЗНИЦЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ
ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
(экспериментально-клиническое исследование)**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора медицинских наук
по специальности 14.01.07 – глазные болезни

Минск 2025

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный медицинский университет»

Научный консультант: **Красильникова Виктория Леонидовна**, доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры офтальмологии Института повышения квалификации и переподготовки кадров здравоохранения учреждения образования «Белорусский государственный медицинский университет»

Официальные оппоненты: **Ластовка Александр Сергеевич**, доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры челюстно-лицевой хирургии и пластической хирургии лица с курсом повышения квалификации и переподготовки учреждения образования «Белорусский государственный медицинский университет»

Позняк Николай Иванович, доктор медицинских наук, профессор, лауреат Государственной премии, научный руководитель центра микрохирургии глаза «ВОКА»

Куликов Алексей Николаевич, доктор медицинских наук, профессор, начальник кафедры офтальмологии Федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова» Министерства обороны Российской Федерации

Оппонирующая организация: учреждение образования «Гродненский государственный медицинский университет»

Защита состоится 20 мая 2025 года в 12.00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 03.18.07 при учреждении образования «Белорусский государственный медицинский университет» по адресу: 220083, г. Минск, пр-т Дзержинского, 83, e-mail: uchsovets@bsmu.by, тел.: +375 (17) 302 16 21.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный медицинский университет».

Автореферат разослан _____ апреля 2025 года.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 03.18.07,
доктор медицинских наук, профессор



Н.В. Новак

ВВЕДЕНИЕ

Переломы глазницы ассоциированы с 40 % всех черепно-лицевых переломов [Rana M., 2022; Chodankar N., 2023; Munoli A., 2023] и имеют социальную значимость, определяемую высоким уровнем инвалидизации, трудоспособным возрастом большинства пациентов и, как следствие, значительными экономическими потерями [Мошетова Л. К., 2015]. Травмы глазницы, сопровождающиеся деформацией и дефектом костных структур ее стенки, требуют тщательной диагностики из-за обширности повреждения, сложной геометрии глазницы и ее тесной связи с прилегающими отделами лицевого черепа [Давыдов Д. В., 2016; Яриков А. В., 2020; Ghantous Y., 2020].

Для устранения костных дефектов глазницы применяется большое разнообразие имплантационных материалов: аллопластические, аутологичные ткани, синтетические, металлы [Kohyama K., 2020; Kim T. W., 2022]. Каждый из этих материалов, помимо положительных качеств, имеет ряд существенных недостатков, ограничивающих их применение [Jensen A. D., 2022; Moubarak M. A., 2023]. В связи с этим вопросы, касающиеся выбора материала для имплантата и его конструкции, продолжают оставаться актуальными и значимыми в контексте успешности реконструктивного хирургического лечения [AL-Hamoudi F., 2021; Kohyama K., 2022].

Внедрение в клиническую практику современного метода диагностики — мультиспиральной компьютерной томографии (МСКТ) — позволяет получать трехмерную виртуальную реконструкцию любого анатомического объекта. Однако при 3D-реконструкции поврежденной глазницы, особенно в области нижней и медиальной стенок, программное обеспечение существующих томографов не позволяет точно и в сжатые сроки определить размеры и форму дефекта, что связано с тонкостью этих стенок [Mommaerts M. Y., 2016; Stopa Ł., 2024].

Поэтому разработка специального программного средства, позволяющего в автоматическом режиме получать точную и полную картину повреждения глазницы, является весьма актуальной. Таким образом, вопросы совершенствования диагностики повреждения глазницы, разработки технологии реконструктивно-восстановительного лечения, создания индивидуального имплантата с использованием современных цифровых и аддитивных технологий являются приоритетными инновациями в аспектах медико-социальной реабилитации пациентов с дефектами и деформациями глазницы.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Диссертационные исследования выполнены в рамках инновационного проекта «Разработать и внедрить изделия на основе нерезорбируемых материалов для устранения посттравматических дефектов и деформаций глазницы и глазничного органоконструкса с использованием технологий 3D-моделирования и прототипирования» (№ гос. регистрации 20150057, срок выполнения — 2014–2016 гг.); в рамках задания Государственной программы научных исследований «Фундаментальные и прикладные науки — медицине», подпрограммы «Новые технологии купирования заболеваний» «Разработать метод визуализации повреждений костных структур глазницы с использованием автоматизированного программного моделирования» (№ гос. регистрации 20190623, срок выполнения — 2019–2020 гг.).

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь (указ Президента Республики Беларусь «О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы» от 07.05.2020 г. № 156).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель исследования — обоснование, разработка и внедрение в клиническую практику технологии хирургического лечения пациентов с травматическими дефектами и деформациями глазницы на основе результатов экспериментальных и клинических исследований с использованием цифровых технологий, возможностей 3D-моделирования и прототипирования.

Задачи исследования:

1. Изучить в эксперименте процессы фиброваскуляризации на поверхности имплантатов из титана и в тканях имплантационного ложа. По результатам оценки их имплантационных и интеграционных свойств определить основные требования к конструкции офтальмологического имплантата для устранения дефекта костной стенки глазницы.

2. Разработать программное средство автоматической обработки файлов МСКТ в формате DICOM для определения количественных параметров глазницы, размеров и формы дефекта костной стенки глазницы с последующим изготовлением персонализированного офтальмологического имплантата и построением 3D-модели глазницы пациента.

3. Разработать и апробировать в клинике алгоритм обследования пациентов с дефектами и деформациями глазницы на основе информации автоматической обработки файлов МСКТ DICOM глазницы и с учетом

данных комплексной диагностики, клинического опыта определить основные положения технологии лечения пациентов с дефектами и деформациями глазницы.

4. Внедрить в клиническую практику разработанную технологию хирургического лечения пациентов с травматическими дефектами и деформациями глазницы с использованием возможностей 3D-моделирования и прототипирования. Провести анализ непосредственных и отдаленных результатов лечения в сравнительном аспекте с традиционной технологией.

5. Определить медицинскую и социально-экономическую эффективность разработанной технологии хирургического лечения пациентов с травматическими дефектами и деформациями глазницы.

Объект исследования: лабораторные животные (крысы, кролики), пациенты с травматическими дефектами и деформациями глазницы.

Предмет исследования: свойства экспериментальных моделей имплантатов; данные лабораторного мониторинга состояния подопытных животных, гистоморфологического исследования, электронная сканирующая микроскопия (ЭСМ), МСКТ; показатели характера и распространенности травматического процесса в глазнице; показатели мониторинга офтальмологического статуса пациентов.

Научная новизна:

1. Впервые разработано и внедрено в клиническую практику специальное программное средство (сПС) для автоматического расчета волюметрических показателей глазницы, определения вида и степени дистопии, размерно-геометрических параметров дефекта и моделирования ИИ с использованием нейронной сети Mask R-CNN.

2. Впервые использованы основные биомаркеры глазницы для обучения нейросети при определении ее размерно-геометрических параметров, распространенности травматического процесса, формы и размера дефекта костной стенки глазницы.

3. Впервые разработан и внедрен в клиническую практику индивидуальный офтальмологический имплантат из титана, учитывающий индивидуальные анатомо-топографические особенности строения глазницы пациента, пространственно-геометрические параметры дефекта костной стенки глазницы, предусматривающий наличие отверстий диаметром 1,5 мм по его периферии для ускоренной биоинтеграции с костными тканями по краю дефекта и технологических просечек в его центральной части, облегчающих его формообразование и позиционирование в ходе операции.

4. Впервые с использованием возможностей сПС разработан алгоритм комплексного обследования пациентов с дефектами и деформациями глазницы в целях определения основных клинико-рентгенологических

характеристик повреждения костных структур глазницы, планирования хирургического лечения и выбора адекватных размерно-геометрических параметров имплантата.

5. Разработано и внедрено в клиническую практику новое направление в лечении пациентов с дефектами и деформациями костных структур глазницы, основанное на использовании цифровых технологий, возможностей 3D-моделирования и прототипирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Интенсивность процессов фиброваскуляризации и биоинтеграции имплантатов из титана зависит от наличия и размера перфорационных отверстий. Разработанная по результатам опытов на лабораторных животных конструкция имплантата предусматривает наличие отверстий диаметром 1,5 мм по периферии изделия в области контакта с костной тканью и щелевидных просечек в центральной части имплантата, облегчающих его формообразование и позиционирование в ходе операции.

2. Разработанное и внедренное в клиническую практику сПС для автоматической обработки файлов МСКТ в формате DICOM (МСКТ⁺) позволяет с высокой точностью и с минимальными затратами времени определить волюметрические показатели глазницы, степени и вида дистопии, размерно-геометрические параметры дефекта и персонализированного офтальмологического имплантата, а также построить 3D-модель глазницы пациента.

3. Разработанный и внедренный в клиническую практику алгоритм комплексного обследования пациентов с дефектами и деформациями глазницы с использованием сПС для автоматической обработки DICOM-файлов МСКТ глазниц обеспечивает получение исчерпывающей информации для принятия решения о необходимости хирургического лечения, составления плана реконструктивной операции, изготовления индивидуального титанового имплантата и 3D-модели глазницы пациента в масштабе 1 : 1.

4. Применение разработанной технологии хирургического лечения пациентов с дефектами и деформациями глазницы по сравнению с традиционным методом позволило следующее: при проведении операции как в раннем, так и в отсроченном периоде после травмы восстановить объем поврежденной глазницы, максимально приблизив его к значениям интактной, устранить клинически значимые степени тяжести диплопии и глазодвигательных расстройств (ГДР) у 100 % пациентов; в позднем периоде после травмы — приблизить значение объема поврежденной глазницы к значению интактной, устранить клинически значимые степени тяжести диплопии у 64 % и ГДР у 79 % пациентов.

5. Разработанная технология хирургического лечения пациентов с дефектами и деформациями глазницы с использованием персонализированных имплантатов демонстрирует лучшую эффективность для всех типов переломов по сравнению со стандартными имплантатами. Внедрение в клиническую практику лечебных учреждений здравоохранения Республики Беларусь разработанной технологии хирургического лечения пациентов с дефектами и деформациями глазницы обеспечивает как собственно медицинский эффект (восстановление функции зрения и эстетики лица), так и достижение социальных и экономических эффектов.

Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации с отграничением их от соавторов совместных исследований и публикаций

Автором самостоятельно осуществлен анализ отечественной и зарубежной литературы, проведен патентно-информационный поиск. Совместно с научным консультантом сформулированы цель и задачи исследования, запланированы этапы его выполнения. Совместно с сотрудниками научно-исследовательской лаборатории Белорусской медицинской академии последипломного образования (БелМАПО) выполнен экспериментальный раздел исследований (вклад соискателя — 80 %). ЭСМ поверхности экспериментальных образцов имплантатов проводилась на базе НИИ «Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа».

Совместно с сотрудниками отделения лучевой диагностики УЗ «10-я ГКБ» и кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники определены биомаркеры и создана база данных для обучения нейронной сети, разработано и внедрено программное средство автоматического расчета параметров глазницы (вклад соискателя — 60 %).

Соискателем самостоятельно проведено клинико-инструментальное обследование и хирургическое лечение 205 пациентов с травмой глазницы. Самостоятельно выполнена интерпретация полученных результатов диссертационного исследования, сформулированы выводы и практические рекомендации. Основные научные результаты диссертационного исследования отражены в научных статьях [1–А, 2–А, 3–А, 4–А, 5–А, 6–А, 7–А, 8–А, 10–А, 11–А, 14–А, 15–А], в материалах конференций [16–А, 17–А, 18–А, 19–А, 20–А, 21–А, 22–А] (вклад соискателя — 80 %). Разработаны и утверждены Министерством здравоохранения Республики Беларусь 2 инструкции по применению (вклад соискателя — 80 %) [23–А, 24–А]. Получен патент (вклад соискателя — 80 %) [25–А]. Получено свидетельство о добровольной регистрации и депонировании объекта авторского права (вклад соискателя — 60 %) [30–А].

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертации доложены и обсуждены на 11 конференциях с международным участием, в том числе на 4 зарубежных: Днях белорусской науки (Москва, 2017); Юбилейной конференции «Общая и военная офтальмология», посвященной 200-летию юбилею первой в России кафедры офтальмологии военно-медицинской академии имени С. М. Кирова (Санкт-Петербург, 2018); Международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию офтальмологической службы Алтайского края «Актуальные вопросы офтальмологии», «Сибирские горизонты» (Белокуриха, 2019); DOG-конгрессе (Берлин, 2019); XVIII Международном офтальмологическом конгрессе «Белые ночи-2022» (Санкт-Петербург, 2022).

Результаты диссертационного исследования внедрены в работу офтальмологических, рентгенологических отделений, отделений челюстно-лицевой хирургии учреждений здравоохранения Республики (14 актов внедрения), в учебный процесс БелМАПО, УО «Гродненский государственный медицинский университет», УО «Витебский государственный ордена Дружбы народов медицинский университет» (3 акта внедрения).

Опубликованность результатов диссертации

По теме диссертационного исследования опубликовано 29 научных работ (10,9 авторских листов), в том числе 15 статей (7,8 авторских листов) в рецензируемых журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК Республики Беларусь (из них 2 — в моноавторстве, 2 — в зарубежных изданиях, 7 публикаций — в материалах конференций, 4 статьи — в прочих изданиях). Министерством здравоохранения Республики Беларусь утверждены 2 инструкции по применению. Получены 1 патент Республики Беларусь на изобретение, 1 свидетельство о добровольной регистрации и депонировании объекта авторского права.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 323 страницах, включает введение, общую характеристику работы, обзор литературы, описание материала и методов исследования, пять глав с результатами собственных исследований, заключение, список использованных источников, приложения.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Материал и методы исследования

Исследования на лабораторных животных планировались и проводились с целью обоснования выбора оптимальной модели имплантата для устранения посттравматических дефектов костных стенок глазницы. Исследования на

животных проводилась на базе вивария научно-исследовательской лаборатории БелМАПО. Разрешение на проведение исследования было утверждено этическим комитетом БелМАПО (протокол № 4 от 30.06.2016). Тесты контроля статуса лабораторных животных, процесса биоинтеграции пластин и имплантатов включали макроскопическую характеристику имплантационного ложа, гистологическую оценку состояния тканей имплантационного ложа после извлечения пластины, ЭСМ, МСКТ глазницы кролика. Дизайн экспериментального исследования представлен на рисунке 1.

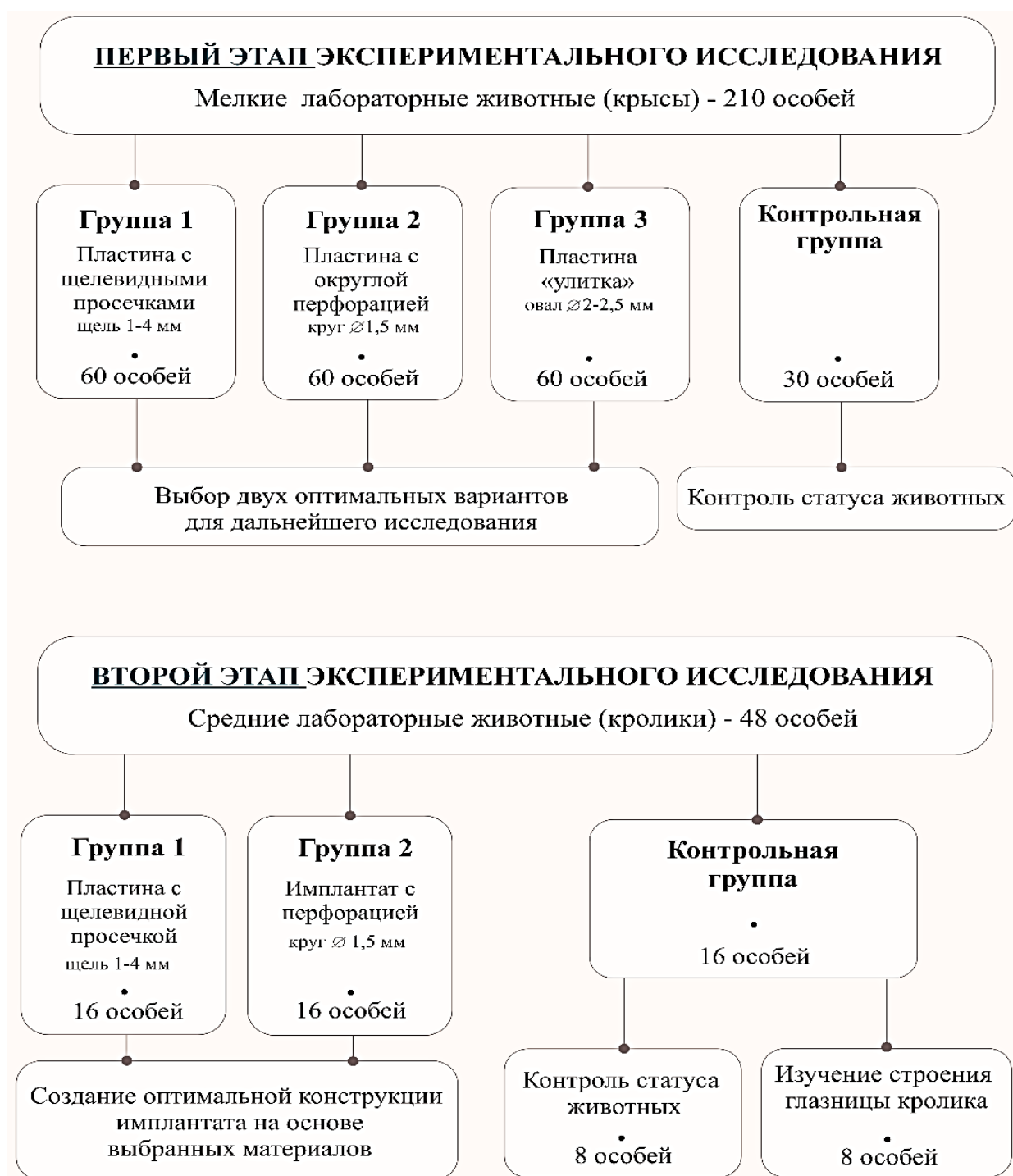


Рисунок 1 – Дизайн экспериментального исследования

Дизайн клинического исследования представлен на рисунке 2.

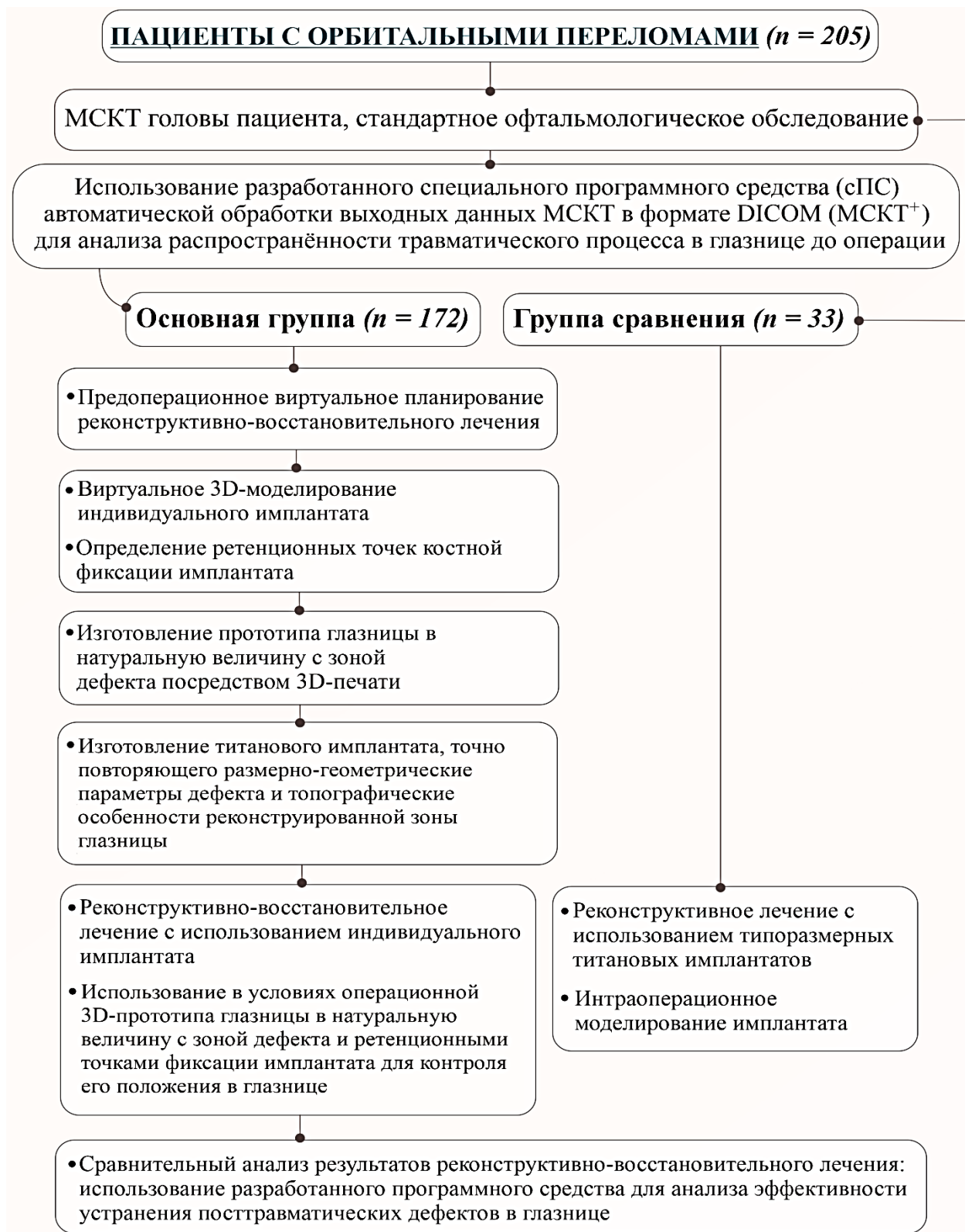


Рисунок 2 – Дизайн клинического исследования

В клинических исследованиях приняли участие 205 пациентов. В основную группу вошло 172 пациента, которым для устранения костного дефекта были использованы титановые индивидуальные имплантаты (ИИ),

изготовленные с использованием трехмерного моделирования и прототипирования в предоперационный период (рисунок 3, а).

Группу сравнения составили 33 пациента, у которых для восстановления глазницы использовались титановые имплантаты, стандартизованные по форме и размерам (СИ — стандартные имплантаты) (рисунок 3, б). Средний возраст пациентов основной группы составил 29,0 (25,0; 37,0) лет, в группе сравнения — 30,0 (23,0; 40,0) лет: $p > 0,05$. Гендерное распределение было однородно: в основной группе 137 мужчин (80 %), 35 женщин (20 %); в группе сравнения 23 мужчины (70 %), 10 женщин (30 %); $\chi^2 = 1,63$, $p > 0,05$.

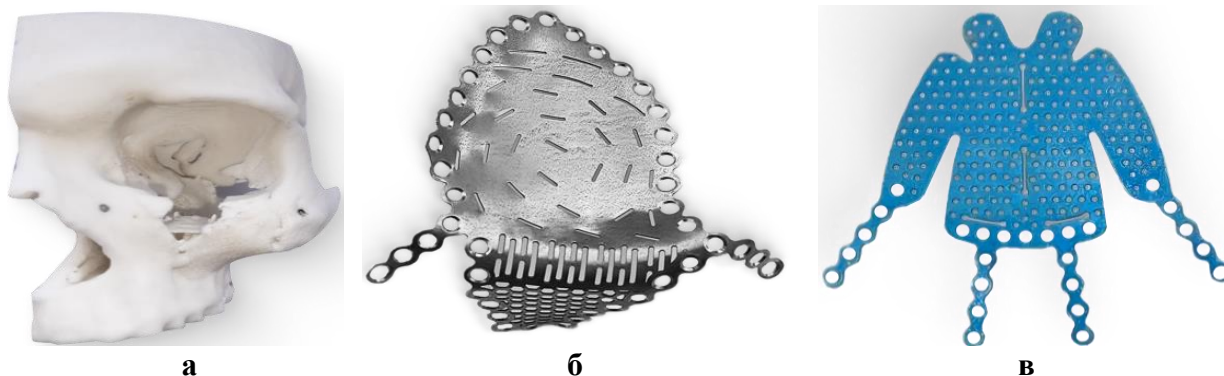


Рисунок 3 – Вид имплантата:

а — 3D-реконструкция глазницы с зоной дефекта; б — индивидуальный титановый имплантат; в — стандартный титановый имплантат (Meditech, Германия)

В первые две недели после травмы за помощью обратились 23 % пациентов из основной группы и 30 % пациентов из группы сравнения, в более поздние сроки после травмы обратились 77 % пациентов из основной группы и 70 % пациентов из группы сравнения ($\chi^2=3,44$; $p > 0,05$).

По распространенности патологического процесса в глазнице были выделены три типа перелома: изолированный перелом нижней стенки диагностирован у 71 (41 %) пациента из основной группы и у 8 (24 %) пациентов из группы сравнения; сочетанный перелом, затрагивающий две стенки, — у 44 (26 %) пациентов из основной группы и у 9 (27 %) пациентов из группы сравнения; комбинированный перелом, затрагивающий глазницу, отделы лицевого и мозгового черепа, выявлен у 57 (33 %) пациентов из основной группы и у 16 (49 %) пациентов из группы сравнения. По каждому из трех типов переломов исследуемые группы являлись однородными: $\chi^2 = 3,95$; $p = 0,139$. Всем пациентам проводили базовые диагностические и дополнительные исследования: оценку положения глазного яблока в глазнице, подвижности глазного яблока, функций чувствительных нервов над- и подглазничной области, МСКТ головы. Исследования проводились до операции, спустя 1 неделю, 4 и 6 месяцев после операции. У пациентов основной группы МСКТ головы выполнялась с использованием сПС

автоматической обработки выходных данных файлов в формате DICOM (МСКТ⁺) для анализа распространенности травматического процесса до операции и контроля положения имплантата интраоперационно. У пациентов из группы сравнения МСКТ⁺ использовалась ретроспективно для уточнения статуса пациентов.

Статистический анализ данных проводился с использованием программного обеспечения STATISTICA 10.0; были использованы методы параметрической и непараметрической статистики. Описание количественных признаков представлялось в виде средней величины, среднеквадратичного отклонения (δ) и ошибки средней величины (m), медианы и интерквартильного размаха ($Me [Q1; Q3]$), где Me — медиана, $Q1$ (25 %) — квартиль, $Q3$ (75 %) — квартиль. Описание качественных признаков давалось в виде абсолютных величин и относительных частот в процентах. Оценку распределения количественных данных проводили по критерию Колмогорова–Смирнова. При распределении, отличном от нормального, применяли методы непараметрической статистики. Для анализа значимости различий количественных и качественных характеристик выборки использовали методы параметрической (критерий Стьюдента), непараметрической статистики (U -критерий Манна–Уитни), критерий Пирсона χ^2 , критерий знаков. При проверке статистической гипотезы о различиях абсолютных частот и долей в двух независимых выборках использовался критерий Пирсона χ^2 . Уровень статистической значимости устанавливался как $p < 0,05$.

Результаты собственных исследований

Результаты исследования процесса интеграции имплантационных материалов, определяющие выбор конструкции орбитального имплантата

На первом этапе опыты проводились на крысах в количестве 210 особей, которые методом простой рандомизации были распределены на 4 группы. Животным 1, 2 и 3-й групп устанавливались титановые пластины с щелевидными просечками с отверстиями диаметром 1,5 мм и сетчатые пластины «улитка» с овальным отверстием 2–2,5 мм; 4-я группа — группа контроля. Пластины укладывались непосредственно на длинную мышцу спины по одному с каждой стороны позвоночника. Задачей данного этапа являлась разработка оптимальной структуры поверхности пластины из титана — материала, обладающего достаточной прочностью, хорошими имплантационными и интеграционными свойствами.

Тесты контроля в экспериментах на крысах подтвердили хорошую переносимость пластин из титана: отсутствовали отторжение и воспалительная реакция в месте имплантации. По данным гистоморфологического

исследования микропрепаратов капсулы и тканей имплантационного ложа, к 30-м суткам определялось образование рыхлой соединительной ткани на поверхности всех моделей пластин. К 120-м суткам во всех группах продолжают процессы созревания соединительной ткани, образующей капсулу вокруг пластин. Соединительная ткань приобрела характер малоклеточной, из клеточного состава преобладали фибробласты и фиброциты. В данный срок оформленная соединительная ткань преобладала в группах 2 и 3. В группе пластин с щелевидными просечками преобладала рыхлая малоклеточная соединительная ткань. Гистограммы гистоморфологического исследования на 30-е и 120-е сутки представлены в таблицах 1 и 2.

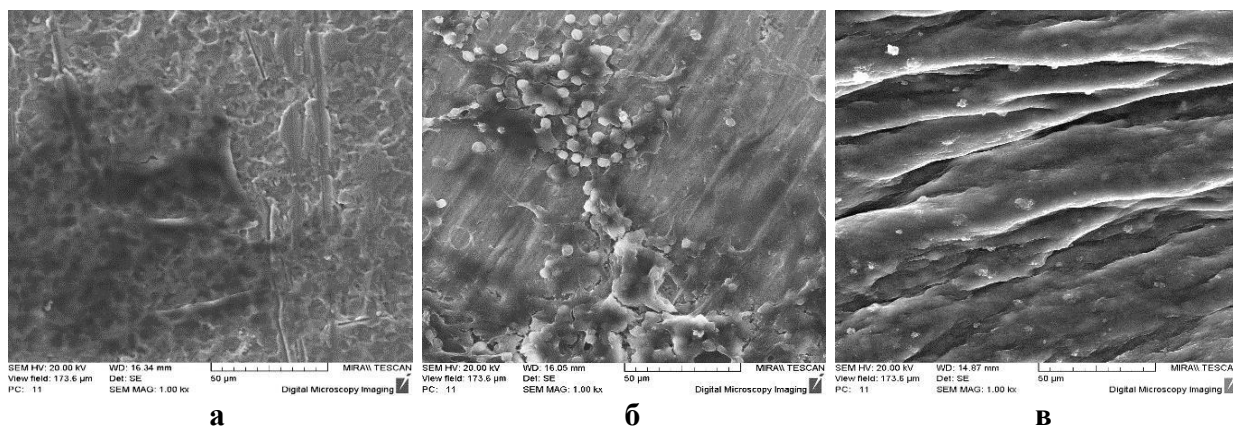
Таблица 1 – Данные гистоморфологического исследования тканей, окружающих пластину, на 30-е сутки после имплантации

Морфологические признаки	Степень выраженности морфологических признаков по группам наблюдения		
	Группа 1	Группа 2	Группа 3
Плотная малоклеточная волокнистая соединительная ткань	–	–	–
Рыхлая малоклеточная волокнистая соединительная ткань	++++	++++	++++
Лимфоцитарная клеточная инфильтрация	++++	++++	++++
Кровеносные сосуды	+	+	+
Продуктивное воспаление	+++	+++	+++

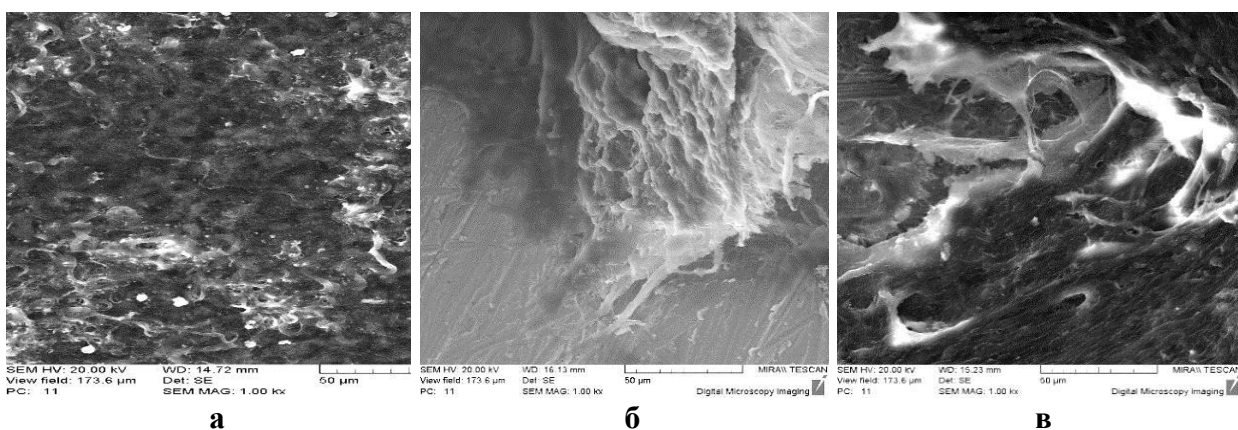
Таблица 2 – Данные гистоморфологического исследования тканей, окружающих пластину, на 120-е сутки после имплантации

Морфологические признаки	Степень выраженности морфологических признаков по группам наблюдения		
	Группа 1	Группа 2	Группа 3
Плотная малоклеточная волокнистая соединительная ткань	+	++	+++
Рыхлая малоклеточная волокнистая соединительная ткань	+++	++	+
Лимфоцитарная клеточная инфильтрация	+	+/-	+/-
Кровеносные сосуды	++	+++	++++
Продуктивное воспаление	+/-	–	–

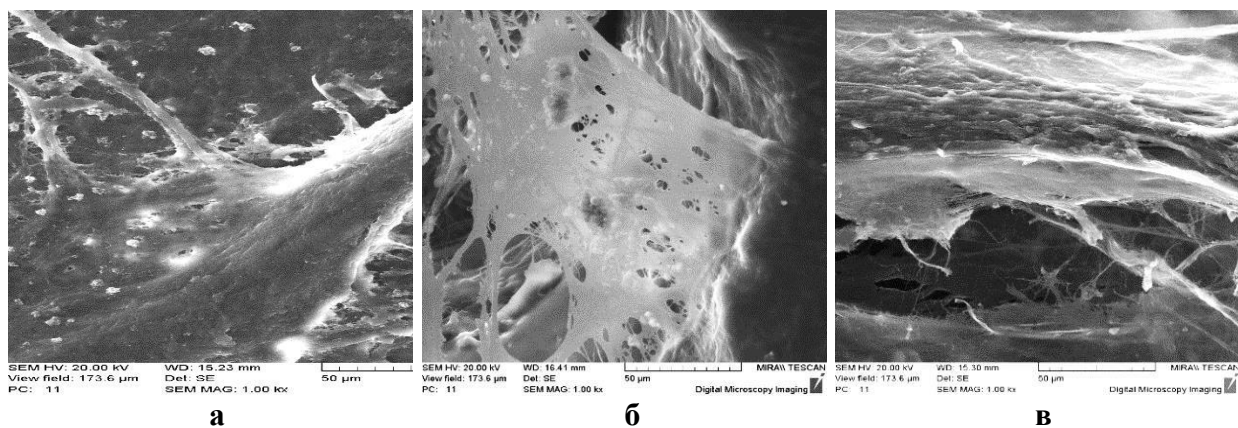
Анализ данных ЭСМ подтвердил данные гистоморфологии: в течение первых трех месяцев более интенсивно интеграционные процессы протекали в группах пластин с округлыми перфорациями (группы 2, 3) (рисунки 4–6). На поверхности пластин с щелевидными просечками (1-я группа) эти процессы были слабо выражены, прочность интеграции с тканью имплантационного ложа уступала связи между капсулой и поверхностью перфорированных пластин.



**Рисунок 4 – Поверхность пластины группы 1:
а — 30-е сутки; б — 90-е сутки; в — 120-е сутки**



**Рисунок 5 – Поверхность пластины группы 2:
а — 30-е сутки; б — 90-е сутки; в — 120-е сутки**



**Рисунок 6 – Поверхность пластины группы 3:
а — 30-е сутки; б — 90-е сутки; в — 120-е сутки**

Второй этап экспериментального исследования выполнялся на 48 кроликах. Животные были разделены на 3 группы по 16 особей. Кроликам 1-й группы в глазницу был установлен имплантат со щелевидными просечками; во 2-й группе устанавливали имплантат с округлыми перфорациями 1,5 мм.

3-я группа контрольная. Задачей второго этапа исследования являлось изучение интеграционных возможностей выбранных моделей имплантатов в глазнице кролика. Гистологическая картина имплантатов, удаленных из глазницы кролика на 180-е сутки, показала, что вокруг имплантатов образовывалась соединительная ткань, плотно интегрированная с окружающими тканями глазницы, которая была более выражена в имплантатах с круглыми перфорациями. На имплантатах, имеющих практически неперфорированную поверхность (щелевидные просечки), капсула легко отделялась от поверхности. Данные гистоморфологического исследования в экспериментах на глазнице кролика представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Гистоморфологическая характеристика окружающих имплантаты тканей по группам наблюдения на 180-е сутки после имплантации

Морфологические признаки	Группа наблюдения	
	Группа 1 (щелевидные просечки)	Группа 2 (круглые отверстия)
Плотная волокнистая соединительная ткань	++	+++
Рыхлая малоклеточная волокнистая соединительная ткань	+	+/-
Лимфоцитарная клеточная инфильтрация	+/-	+/-
Кровеносные сосуды (с элементами крови)	+++	++++
Элементы пластинчатой и грубоволокнистой костной ткани	+	+
Продуктивное воспаление	—	—

Данные ЭСМ также позволили сделать вывод, что интеграционные процессы протекают на поверхности имплантатов обеих групп, но наиболее тесная связь образуется при наличии открытых пор (рисунки 7, 8).

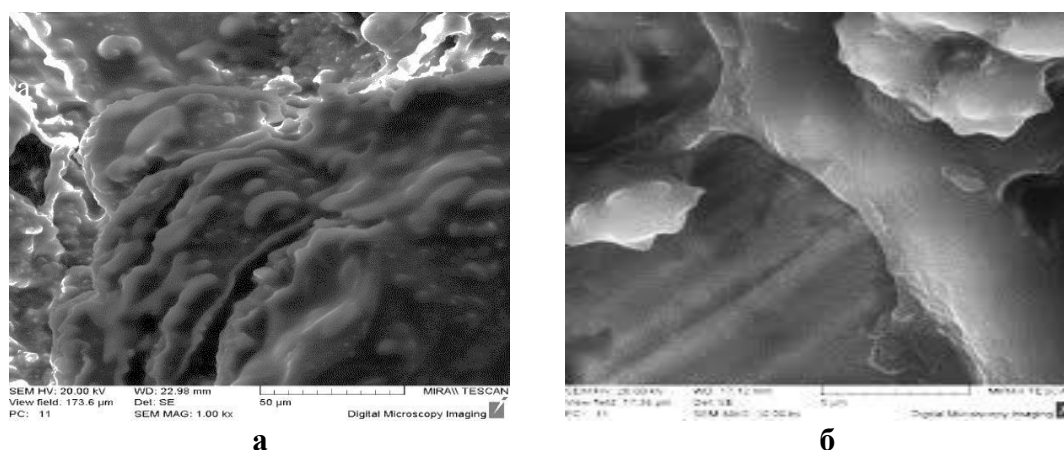
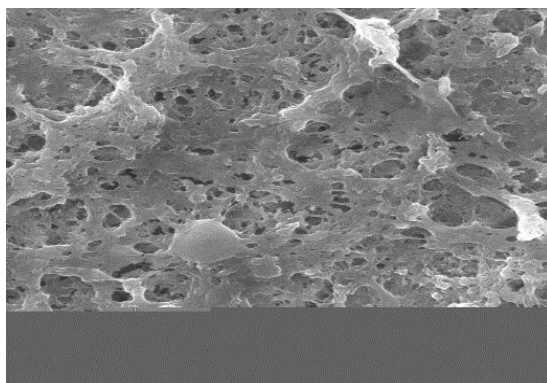
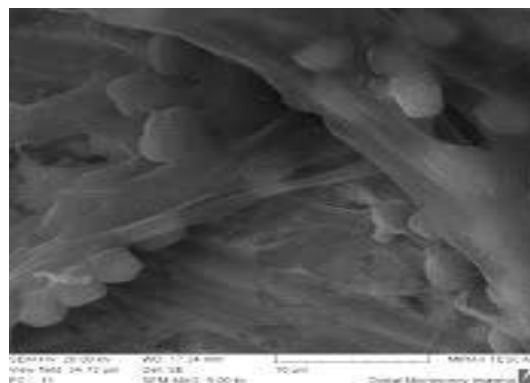


Рисунок 7 – Поверхность имплантата группы 1:
а — 90-е сутки; б — 180-е сутки



а



б

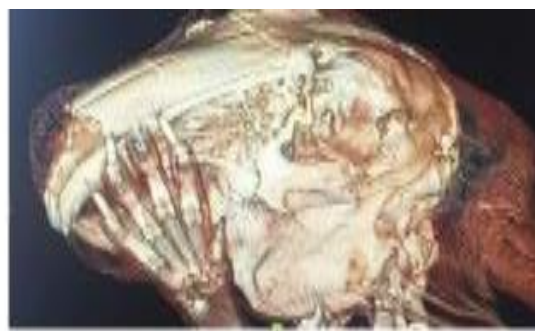
**Рисунок 8 – Поверхность имплантата группы 2:
а — 90-е сутки; б — 180-е сутки**

К 90-м суткам на поверхности имплантатов группы 2 визуализировалась плотная соединительная ткань, заполняющая отверстия с более выраженной адгезией, чем в группе 1. К 180-м суткам после имплантации процессы интеграции имплантатов обеих групп в окружающие ткани практически завершены.

Данные МСКТ показали стабильное положение имплантатов и отсутствие патологических изменений костных стенок глазницы. К 90-м суткам в группе 2 на 3D-реконструкциях визуализировалась сосудистая сеть, пронизывающая перфорации, что свидетельствует о более выраженной фиброваскуляризации по сравнению с группой 1 (рисунок 9).



а



б



в



г

**Рисунок 9 – Мультиспиральная компьютерная томография глазницы кролика на 90-е сутки после имплантации:
а, б — группа 1; в, г — группа 2**

Учитывая, что имплантат клинического назначения должен обладать как необходимыми прочностными характеристиками, так и лучшими биоинтеграционными качествами, для разработки клинического образца офтальмологического имплантата из сплавов титана был выбран вариант дизайна поверхности изделия, сочетающий наличие щелевидных просечек в центральной части имплантата, перекрывающей всю зону дефекта, и круглых перфораций диаметром 1,5 мм по периферической части имплантата, соприкасающейся с костными структурами стенки глазницы.

Разработка программного средства для расчета параметров глазницы, размера и формы персонализированного имплантата

Для оценки распространенности травматического процесса в глазнице решающее значение имеет информативность МСКТ. Среди всех костей лицевого черепа нижняя и медиальная стенки глазницы представляют собой очень тонкие структуры (толщина приблизительно составляет 0,1–0,3 мм), что меньше разрешающей способности существующего аппарата – 0,625 мм. В связи этим для построения 3D-модели глазницы с помощью программного обеспечения (ПО) томографа поступающей информации недостаточно. Стенки глазницы выглядят как ячеистая структура, поскольку при преобразовании файлов DICOM в 3D-модель теряется часть информации о толщине кости. Также следует отметить, что ПО существующих томографов не позволяет редактировать полученные 2D-изображения в 3D-модели, что требует разработки дополнительного ПО.

С учетом имеющегося в свободном доступе ПО для работы с выходными файлами компьютерного томографа было выбрано ПО 3D-Slicer 4.4.0. Для редактирования результатов работы в ПО 3D-Slicer и создания развертки 3D-моделей повреждений костей лицевого черепа было выбрано ПО 3D-Max. С использованием данной комбинации ПО была разработана технология получения 3D-модели лицевого черепа. Вместе с тем для достижения искомого результата весь процесс обработки изображений глазницы на данном этапе происходил в ручном режиме офтальмологом совместно с рентгенологом и инженером-техником. Время, затраченное на обработку данных, зависело от размера и сложности дефекта костных структур глазницы и составило в среднем $(153,3 \pm 12,7)$ минут [16–А; 17–А]. В этой связи было принято решение о разработке СПС для построения в автоматическом режиме 3D-модели глазницы и определения ее количественных параметров, характеризующих распространенность травматического процесса.

Первым этапом решения поставленной задачи явилось создание 3D-модели глазницы с сохранением полной информации о геометрии нижней

и медиальной стенок на основе результатов МСКТ. Изображения DICOM отображают срезы черепа с использованием плотности тканей. ПО 3D-Slicer использует белые пиксели в качестве входных данных для создания 3D-модели черепа. В результате теряется информация о тонких костях глазницы при создании 3D-модели. Объем потерь данных определялся через соотношение площади костей глазницы и площади дефектов [26–А].

Результатом обработки DICOM-изображений с помощью специального программного модуля, в основе которого был положен принцип усиления костной ткани, являлся новый комплект изображений. В результате обработки исходных изображений DICOM с помощью специального программного модуля была построена трехмерная модель костей лицевого черепа (рисунок 10). Это позволяет однозначно идентифицировать глазницу. В дальнейшем с помощью редактора 3Ds Max можно построить 3D-модель глазницы с зоной повреждения. Расчет потерь информации о костях глазниц при построении трехмерной модели костей лицевого черепа показал, что при анализе файлов DICOM без обработки разрабатываемым ПО потери составляют 22–31 % при шаге сканирования 0,625 мм, а при использовании последнего — до 3–5 % [26–А, 29–А].

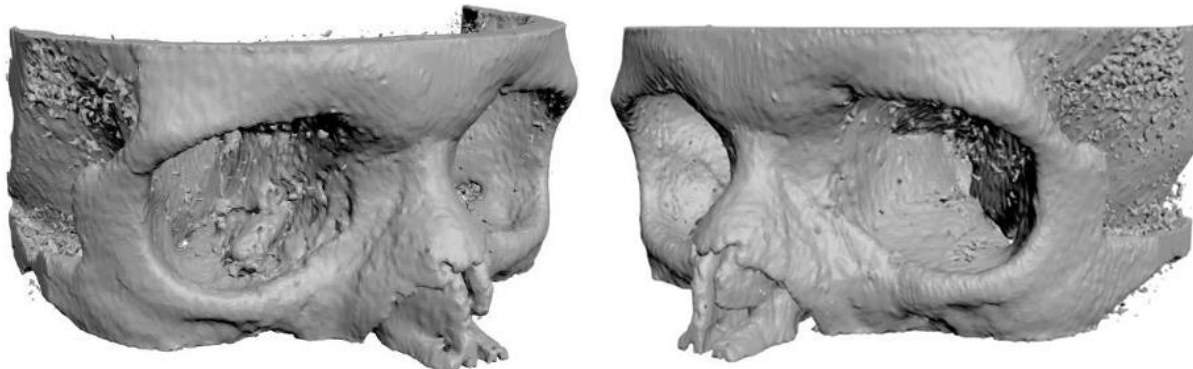


Рисунок 10 – 3D-модель глазниц, полученная в результате обработки специальным программным модулем

Таким образом, расширение градации цвета костной ткани на 1 пиксель при обработке сПС является оптимальным для построения трехмерной модели с сохранением полной информации о строении костей глазницы. Коррекция изображения DICOM выполняется в автоматическом режиме.

Следующим этапом разработки сПС являлось определение в автоматическом режиме количественных показателей распространенности травматического процесса в глазнице с использованием нейросети. Для обеспечения работы нейросети были определены основные биомаркеры глазницы и глазного яблока, которые должна распознавать нейросеть после ее обучения: глазное яблоко, объем костной и мягкотканной глазницы, вид и степень дистопии глазного яблока.

В качестве базы данных для обучения нейросети были использованы результаты МСКТ 70 пациентов с переломами костей глазницы различной тяжести. Подготовка изображений для обучения нейросети осуществлялась путем их послойной разметки. До процесса разметки была сделана конвертация DICOM изображений в формат растровых изображений. В качестве инструмента для разметки данных использовали приложение VGG Image Annotato. Все исходные данные были разделены на тренировочные и тестовые в процентном соотношении (80 и 20 % соответственно). Тестовые исходные данные использовались для проверки работы нейросети после обучения и в качестве контроля для сравнения результатов расчета объема глазниц, размеченных нейросетью, с объемом глазниц, размеченных вручную [22–А].

В результате обработки изображений тестовых наборов данных с использованием обученной нейросети получали бинарную маску изображения (вероятность принадлежности к классу). На рисунках 11, 12 отражен результат поиска контуров глазных яблок, глазниц, построенных нейросетью.

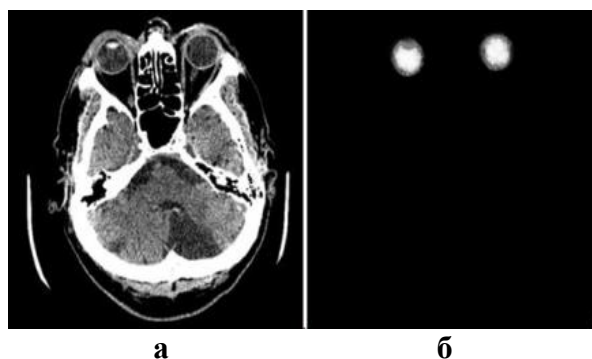


Рисунок 11 – Результат поиска глазного яблока:
а — по данным МСКТ; б — нейросетью после обучения

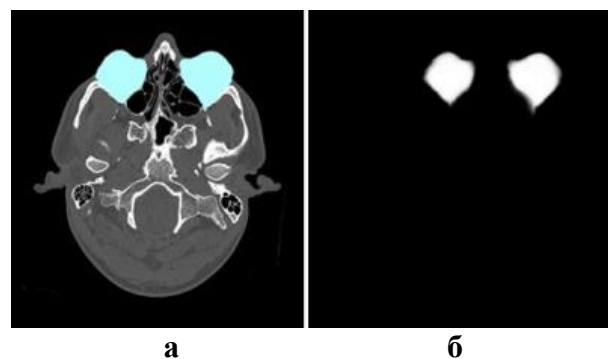


Рисунок 12 – Результат разметки мягкотканного контура глазницы:
а — ручной разметкой; б — нейросетью

Результат сравнения объемов глазниц, рассчитанных по результатам разметки нейросетью, с объемом глазниц, рассчитанных по результатам ручной разметки, показал, что разница не превышала 8 %. Это говорит о высокой точности разметки глазниц нейросетью. Обученная нейросеть была использована при разработке программного средства для автоматизированного расчета параметров глазниц и имплантата.

Алгоритм применения разработанного сПС для автоматического расчета параметров глазницы и количественных показателей распространенности травматического процесса

Алгоритм применения в клинике разработанного сПС выглядел следующим образом [7–А, 24–А]: через веб-интерфейс осуществлялась загрузка комплектов DICOM-файлов с костной и мягкотканной реконструкциями. Далее запускалась обработка исходных файлов. После

окончания обработки сПС исходных DICOM-файлов пациента были получены следующие результаты:

1) расчет волюметрических параметров глазниц: костный и мягкотканый объемы поврежденной глазницы и здоровой глазницы, степень дистопии. В дополнение к традиционно рассчитываемым гипофтальму (Г), энофтальму (Эн) и экзофтальму благодаря сПС рассчитывался показатель интегральной дистопии — отклонение глазного яблока относительно нормального положения в трехмерном пространстве (рисунок 13);

2) построение 3D-модели повреждения и результат генерации 3D-модели костей лицевого черепа (в формате .stl), созданные программным средством, сохраняли на диске локального компьютера и далее использовали для корректировки в трехмерных редакторах. На рисунке 14а отражена визуализация результата совмещения модели повреждения с моделью костей лицевого черепа в режиме просмотра;

3) построение развертки 3D-модели повреждения в векторном виде (рисунок 14, б).

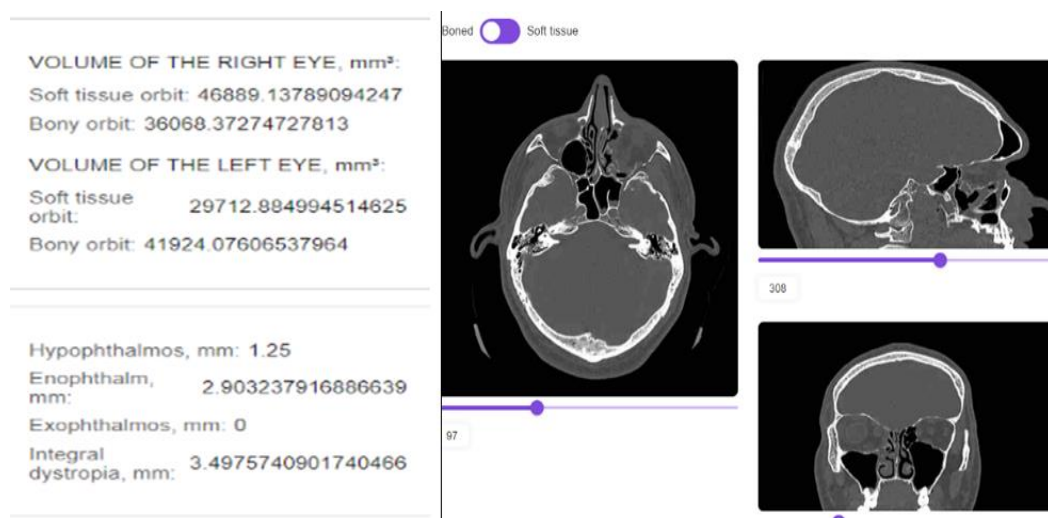


Рисунок 13 – Структурная схема функционирования разработанного программного средства

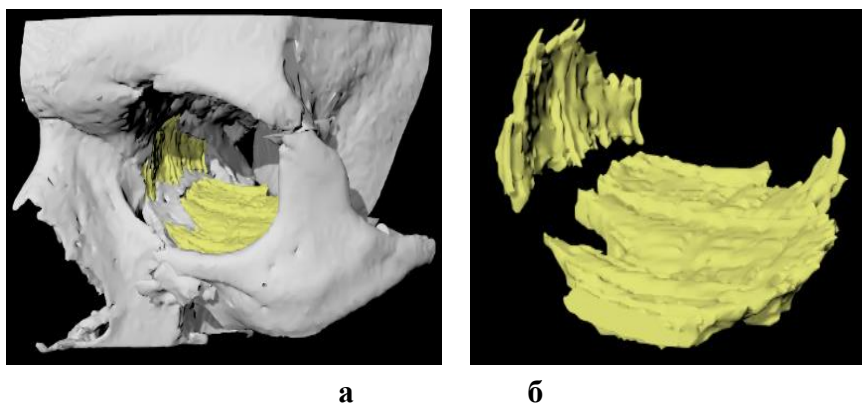


Рисунок 14 – Трехмерная модель глазницы с зоной дефекта в векторном виде:
а — 3D-модель глазницы с зоной повреждения; б — 3D-модель повреждения в векторном виде

Разработанное сПС автоматической обработки выходных данных МСКТ в формате DICOM пациентов с травмами глазницы с использованием обучения нейросети Mask R-CNN показало высокие цифры вероятности правильной интерпретации результатов, имеющих при пороге отсечения по вероятности, равной 0,46, чувствительность 94,4 %, специфичность 84,5 %, точность 96,6 %. Время, затраченное на обработку данных в автоматическом режиме, в среднем составляло $(15,5 \pm 1,6)$ минут. Практически на порядок меньше, чем при ручном расчете – $(153,3 \pm 12,7)$ минут. После анализа результатов обработки открывались возможности для расчета и изготовления ИИ с заданными параметрами.

Предоперационная рентгенодиагностика, компьютерное планирование реконструктивно-восстановительной операции, выбор имплантата для устранения дефекта костных структур глазницы

Основной задачей реконструктивно-восстановительной хирургии глазницы является восстановление ее архитектоники, максимально приближенной к нормальной, что позволяет достичь хороших функциональных и эстетических результатов. Применение сПС у пациентов с повреждениями глазницы позволило оценить количественные показатели распространенности травматического процесса в глазнице. Важной диагностической информацией при оценке распространенности травматических изменений в глазнице являлись данные определения объема поврежденной глазницы ($V_{пг}$) и его сопоставление со значениями интактной глазницы ($V_{иг}$) по данным МСКТ⁺ (таблица 4).

Таблица 4 – Результаты определения объема интактной и поврежденной глазницы у пациентов исследуемых групп с различным типом перелома глазницы по данным МСКТ⁺

Тип перелома глазницы	Группы пациентов, Ме [25; 75] (см³)				Статистическая значимость различий <i>U</i> -тест, <i>W</i> , <i>p</i>
	основная группа (<i>n</i> = 172)		группа сравнения (<i>n</i> = 33)		
	Vиг	Vпг	Vиг	Vпг	
	1	2	3	4	
Изолированный	<i>n</i> = 71 26,4 [25,8; 27,0]	<i>n</i> = 71 27,8 [26,9; 28,7]	<i>n</i> = 8 26,7 [26,6; 27,6]	<i>n</i> = 8 28,1 [26,7; 28,9]	<i>p</i> _{2,4} = 1,0 <i>p</i> _{1,2} < 0,001 <i>p</i> _{3,4} < 0,05
Сочетанный	<i>n</i> = 44 26,3 [25,8; 27,2]	<i>n</i> = 44 31,7 [30,5; 32,8]	<i>n</i> = 9 26,9 [26,5; 27,6]	<i>n</i> = 9 30,1 [29,3; 31,2]	<i>p</i> _{2,4} = 1,0 <i>p</i> _{1,2} < 0,001 <i>p</i> _{3,4} < 0,01
Комбинированный	<i>n</i> = 57 26,8 [26,3; 27,5]	<i>n</i> = 57 33,7 [32,2; 34,7]	<i>n</i> = 16 26,7 [26,1; 27,8]	<i>n</i> = 16 33,3 [32,0; 34,3]	<i>p</i> _{2,4} > 0,05 <i>p</i> _{1,2} < 0,001 <i>p</i> _{3,4} < 0,001

Наименьшее увеличение $V_{пг}$ по сравнению с $V_{иг}$ выявлено при изолированных повреждениях: в среднем на 5 % у пациентов основной

группы ($p_{1,2} < 0,001$) и группы сравнения ($p_{3,4} < 0,05$). При сочетанных переломах, к которым отнесены инферомедиальные, $V_{пг}$ превышал $V_{иг}$ в среднем на 20 % у пациентов основной группы ($p_{1,2} < 0,001$) и на 12 % у пациентов группы сравнения ($p_{3,4} < 0,01$). Наибольшее увеличение $V_{пг}$ наблюдалось при комбинированных переломах, затрагивающих более двух стенок глазницы в среднем на 26 % у пациентов основной группы ($p_{1,2} < 0,001$) и на 25 % у пациентов группы сравнения ($p_{3,4} < 0,001$).

Характер перелома стенки глазницы оказывает влияние на степень смещения глазного яблока (таблица 5). При изолированном переломе только у 4 (6 %) пациентов с тотальным повреждением нижней стенки глазницы выявлен клинически значимый Эн II степени. При сочетанных переломах количество пациентов с Эн II степени увеличилось до 23 % в основной группе и до 44 % в группе сравнения. При комбинированных переломах преобладали клинически значимые II и III степени Эн у 46 (81 %) пациентов основной группы и у 15 (94 %) пациентов группы сравнения.

Таблица 5 – Распределение пациентов исследуемых групп по степени тяжести энтофтальма с различным типом перелома по данным МСКТ⁺

Группа	Тип перелома глазницы, n	Степень тяжести энтофтальма, n/%				Степень значимости различий, χ^2
		0 (0 мм)	I (1–2 мм)	II (3–4 мм)	III (5 и более мм)	
Основная группа	Изолированный, n = 71	47/66	20/28	4/6	–/–	$\chi^2 = 106,2$ $p < 0,001$
	Сочетанный, n = 44	11/25	22/50	10/23	1/2	
	Комбинированный, n = 57	–/–	12/19	26/46	20/35	
Группа сравнения	Изолированный, n = 8	8/100	–/–	–/–	–/–	$\chi^2 = 37,4$ $p < 0,001$
	Сочетанный, n = 9	–/–	5/56	4/44	–/–	
	Комбинированный, n = 16	–/–	1/6	6/38	9/56	

Анализ частоты наличия Г и степени его тяжести показал, что при изолированных переломах клинически значимый Г II степени зафиксирован у 28 (39 %) пациентов основной группы и у 3 (37 %) пациентов группы сравнения. Только у 1 (2 %) пациента группы сравнения имел место Г III степени (таблица 6).

При сочетанных переломах глазницы в основной группе II степень Г наблюдалась у 29 (36 %) пациентов, в группе сравнения — у 5 (56 %) пациентов. В группе сравнения случаи Г III степени зафиксированы у 2 (22 %) пациентов. Комбинированные повреждения глазницы также сопровождались преобладанием тяжелых степеней Г II–III степени: у 54 (95 %) пациентов основной группы и у 15 (93 %) пациентов группы сравнения.

Изучение количественных показателей распространенности травматического процесса в глазнице показало, что изолированные переломы нижней стенки приводят к наименьшему увеличению объема глазницы, не вызывая клинически значимого Эн. Однако повреждение надкостницы лишает глазное яблоко опоры, что приводит к Г. Сочетанные повреждения костей глазницы, включая задние отделы медиальной стенки и скуловую дугу, приводят к значительному увеличению объема глазницы, вызывая Эн и Г.

Таблица 6 – Распределение пациентов исследуемых групп по степени тяжести гипопфтальма с различным типом перелома по данным МСКТ⁺

Группа	Тип перелома глазницы, n	Степень тяжести гипопфтальма, n/%				Степень значимости различий, χ^2
		0 (0 мм)	I (1–2 мм)	II (3–4 мм)	III (5 и более мм)	
Основная группа	Изолированный, n = 71	20/28	23/32	28/39	–/–	$\chi^2 = 106,4$ $p < 0,001$
	Сочетанный, n = 44	1/2	14/32	29/36	–/–	
	Комбинированный, n = 57	–/–	3/5	22/39	32/56	
Группа сравнения	Изолированный, n = 8	2/25	2/25	3/37	1/13	$\chi^2 = 9,3$ $p = 0,16$
	Сочетанный, n = 9	–/–	2/22	5/56	2/22	
	Комбинированный, n = 16	–/–	1/6	10/62	5/31	

Информация о количественных показателях распространенности травматического процесса в глазнице до операции позволяет хирургу планировать этапы лечения, определиться с выбором имплантата, а также осуществить заблаговременное изготовление ИИ с заданными параметрами.

Процесс предоперационного компьютерного планирования при изолированных дефектах нижней стенки глазницы включал определение волюметрических параметров поврежденной и интактной глазницы, вида и степени дистопии, построение виртуальной 3D-модели глазницы и 3D-модели дефекта (рисунок 15). Дефекты, расположенные в передней части нижней стенки глазницы, как правило, не сопровождаются Эн, не вызывают клинически значимого изменения объема глазницы. В этой связи моделируется имплантат, повторяющий форму дефекта и перекрывающий дефект на 2 мм по всему периметру.

При тотальных переломах нижней стенки глазницы особое внимание уделяется переднезаднему размеру имплантата, учитывая, что задний край имплантата должен заходить на сохранившийся задний костный выступ. Такое положение стабилизирует имплантат, предотвращает его смещение в верхнечелюстную пазуху, а также гарантирует сохранность полной эвакуации жировой клетчатки из пазухи. На завершающем этапе моделирования имплантата определяются ретенционные точки его фиксации.

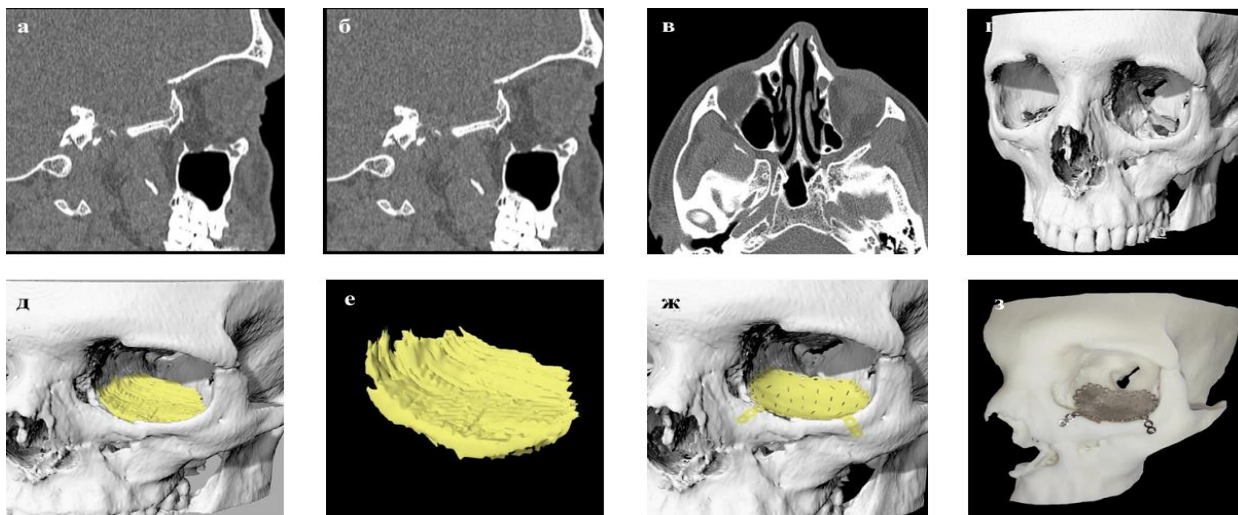


Рисунок 15 – Этапы виртуального планирования реконструктивной операции и моделирования индивидуального имплантата у пациентов с изолированными переломами нижней стенки глазницы:
а — коронарная проекция; б — сагиттальная проекция; в — аксиальная проекция;
г — 3D-реконструкция черепа; д — визуализация границ дефекта на виртуальной 3D-модели глазницы; е — виртуальная 3D-модель дефекта; ж — моделирование ИИ и ретенционных точек фиксации; з — положение титанового имплантата в прототипе глазницы

Предоперационное планирование при сочетанных и комбинированных переломах направлено на воссоздание скелетной архитектоники глазницы. При развитии выраженных посттравматических деформаций целью реконструкции является достижение «скелетного баланса» для восстановления гармоничного внешнего вида пациента. В ходе предоперационного планирования при данных типах орбитальных повреждений для визуализации расположения смещенных костных структур создается трехмерная реконструкция черепа (рисунок 16) и определяются количественные параметры поврежденной и интактной глазницы. Затем выполняются виртуальная репозиция смещенных костных фрагментов в правильное анатомическое положение с учетом зон остеотомий. Это позволяет оценить истинные размеры повреждения и конфигурацию костного дефекта.

При комбинированных и сочетанных переломах дефекты часто распространяются за экватор глазного яблока в направлении вершины глазницы, затрагивая «ключевую зону» и увеличивая объем глазницы, что приводит к развитию Эн. Реконструкция таких дефектов затруднена из-за их сложности, отсутствия опоры для имплантата и тяжести посттравматических изменений.

Использование сПС позволяет моделировать имплантат, точно отражающий анатомию поврежденной зоны, что способствует восстановлению объема глазницы до значений, близких к интактной. Точные данные о локализации, размерах и форме дефекта позволяют изготавливать

модель глазницы пациента с ретенционными точками в масштабе 1 : 1 с использованием методов 3D-моделирования и прототипирования. Наличие модели глазниц пациента с точками фиксации имплантата в условиях операционной существенно облегчает действия хирурга по установке имплантата, снижает до минимума вероятность его репозиционирования, сокращает время операции.

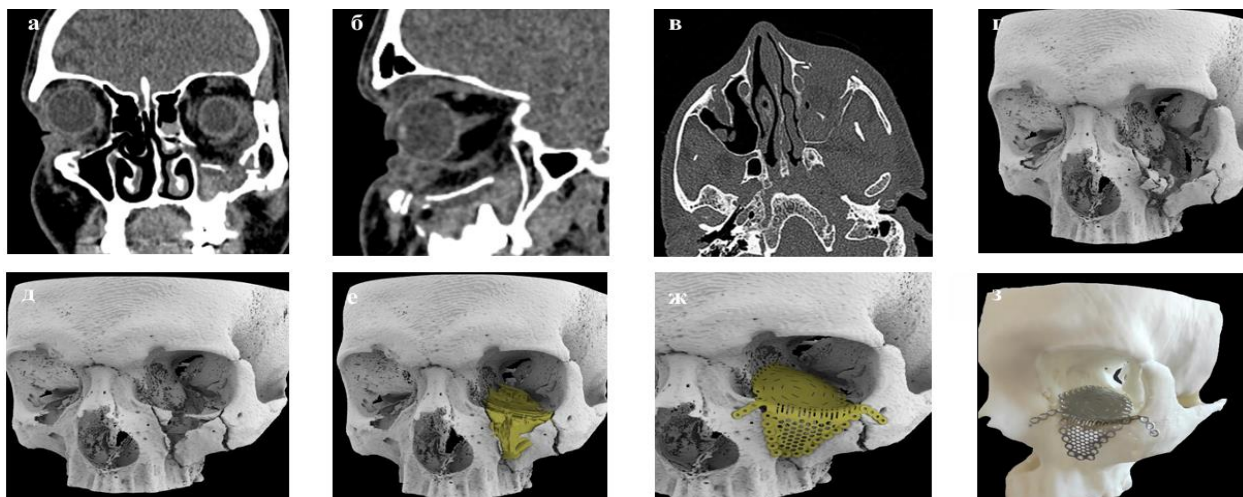


Рисунок 16 – Этапы планирования реконструктивной операции и моделирования индивидуального имплантата у пациентов со сложными дефектами костных структур глазницы:

а — коронарная проекция; б — сагиттальная проекция; в — аксиальная проекция; г — 3D-реконструкция черепа до репозиции скуловой кости; д — 3D-реконструкция черепа после репозиции скуловой кости; е — визуализация границ дефекта на виртуальной 3D-модели глазницы; ж — моделирование ИИ и ретенционных точек фиксации; з — положение титанового имплантата в прототипе глазницы

Отличительной особенностью ИИ является возможность реконструкции наиболее важного участка глазницы — задних отделов медиальной стенки.

Именно этот участок играет важную роль в обеспечении анатомического положения глазного яблока в глазнице пациента. Некорректная реконструкция данной зоны не позволяет устранять посттравматический Эн.

Таким образом, применение сПС для анализа выходных данных МСКТ в формате DICOM позволило разработать технологию хирургического лечения пациентов с травматическими дефектами и деформациями глазницы, которая включает в себя трехмерный анализ показателей распространенности травматического процесса, предоперационное планирование реконструктивно-восстановительного лечения и создание ИИ с использованием технологии 3D-моделирования и прототипирования.

Результаты хирургического лечения пациентов с переломами и деформациями глазницы

Оценка эффективности разработанной технологии хирургического лечения пациентов с травматическими дефектами и деформациями глазницы

проводилась с использованием объективных критериев: объема глазницы, вида и степени дистопии, степени диплопии, степени глазодвигательных расстройств, положения имплантата в глазнице. Также оценивалась длительность проведения оперативного вмешательства.

Анализ воллюметрических данных показал, что проведение реконструктивной операции с использованием ИИ в ранний период (1–14-е сутки) после травмы является оптимальным для восстановления поврежденной глазницы: объем реконструированной глазницы ($V_{рг}$) в среднем по группе $26,6 \text{ см}^3$ практически стал идентичным объему интактной глазницы ($V_{иг}$) — $26,4 \text{ см}^3$, $p = 0,47$. Использование СИ у пациентов, оперированных в аналогичный период, также позволило уменьшить объем поврежденной глазницы, однако он не достиг уровня интактной глазницы: $V_{иг}$ — $27,1 \text{ см}^3$, $V_{рг}$ — $28,3 \text{ см}^3$, $p < 0,01$ (таблицы 7, 8).

Таблица 7 – Результаты воллюметрии глазниц у пациентов основной группы, оперированных в разные сроки после травмы

Сроки проведения операции после травмы	Состояние глазниц, объем глазницы, Ме [25; 75] (см^3), количество пациентов (n)			Статистическая значимость различий U -тест, W , $p < 0,05$
	$V_{иг}$	$V_{пг}$	$V_{рг}$	
	1	2	3	
Ранний период (1–14-е сутки после травмы)	$n = 40$ 26,4 [26,0; 27,2]	$n = 40$ 28,9 [27,1; 29,9]	$n = 40$ 26,6 [25,8; 27,2]	$p_{1,2} < 0,001$ $p_{1,3} = 0,47$ $p_{2,3} < 0,001$
Отсроченный период (1–4 месяца)	$n = 118$ 26,5 [25,9; 27,2]	$n = 118$ 30,9 [28,2; 33,2]	$n = 118$ 26,9 [26,1; 27,3]	$p_{1,2} < 0,001$ $p_{2,3} < 0,001$ $p_{1,3} = 0,16$
Поздний период (5 месяцев и более)	$n = 14$ 26,9 [26,1; 27,7]	$n = 14$ 34,3 [32,4; 35,5]	$n = 14$ 27,7 [26,8; 28,0]	$p_{1,2} < 0,001$ $p_{2,3} < 0,001$ $p_{1,3} < 0,001$

Отсроченный период после травмы (1–4 месяца) является сложным в плане реконструкции глазницы, поскольку уже имеются патологические сращения костных отломков, рубцовые деформации в ретробульбарном пространстве. При этих обстоятельствах только применение ИИ позволило восстановить объем глазницы у пациентов основной группы: $V_{иг}$ — $26,5 \text{ см}^3$, $V_{рг}$ — $26,9 \text{ см}^3$, $p = 0,16$ (таблица 7). В группе сравнения объем реконструированной глазницы практически не изменился ($V_{рг}$ — $30,3 \text{ см}^3$) и существенно превышал объем интактной глазницы ($V_{иг}$ — $26,6 \text{ см}^3$), $p < 0,001$ (таблица 8).

В поздний период после травмы (спустя 5 месяцев и более) развитие устойчивых посттравматических деформаций ограничивает возможности хирурга по восстановлению анатомо-топографических соотношений костных структур глазницы. По этим причинам у пациентов основной группы объем

восстановленной глазницы уменьшился ($V_{рг} — 27,7 \text{ см}^3$), но различие с объемом интактной глазницы сохранилось ($V_{иг} — 26,9 \text{ см}^3$), $p < 0,001$. В группе сравнения объем поврежденной глазницы остался на дооперационном уровне ($V_{рг} — 33,7 \text{ см}^3$, $V_{пг} — 34,6 \text{ см}^3$) (таблица 8).

Таблица 8 – Результаты волнометрии глазниц у пациентов группы сравнения, оперированных в разные сроки после травмы

Сроки проведения операции после травмы	Состояние глазниц, объем глазницы, Ме [25; 75] (см^3), количество пациентов (n)			Статистическая значимость различий U -тест, W , $p < 0,05$
	$V_{иг}$	$V_{пг}$	$V_{рг}$	
	1	2	3	
Ранний период (1–14-е сутки после травмы)	$n = 10$ 27,1 [26,5; 27,6]	$n = 10$ 29,2 [28,4; 31,2]	$n = 10$ 28,3 [27,8; 28,7]	$p_{1,2} < 0,01$ $p_{2,3} < 0,05$ $p_{1,3} < 0,01$
Отсроченный период (1–4 месяца)	$n = 18$ 26,6 [26,0; 27,8]	$n = 18$ 30,4 [29,4; 31,1]	$n = 18$ 30,3 [29,1; 32,1]	$p_{1,2} < 0,001$ $p_{1,3} < 0,001$ $p_{2,3} < 0,01$
Поздний период (5 месяцев и более)	$n = 5$ 27,0 [27,1; 28,9]	$n = 5$ 34,6 [34,3; 35,3]	$n = 5$ 33,7 [33,4; 34,3]	$p_{1,2} < 0,05$ $p_{2,3} < 0,05$ $p_{1,3} < 0,05$

Исследование наличия диплопии и степени ее тяжести у пациентов после реконструктивно-восстановительного лечения показало, что регресс диплопии происходит постепенно на протяжении 6 месяцев после операции.

При проведении реконструктивно-восстановительной операции в ранние сроки (1–14 дней) после травмы полное устранение двоения наблюдалось у 100 % пациентов обеих групп как с применением ИИ, так и СИ. Иначе выглядела динамика регресса диплопии у пациентов, оперированных спустя 1–4 месяца после травмы. Через 6 месяцев после операции в основной группе отсутствие двоения наблюдаю у 78 (66 %) пациентов.

У остальных 33 (28 %) и 7 (6 %) пациентов сохранялась функционально допустимая диплопия I и II степени соответственно. В группе сравнения только у 12 (67 %) пациентов наблюдалась II степень тяжести, а у остальных 6 (33 %) пациентов сохранялась III тяжелая степень расстройства бинокулярного зрения. Межгрупповое различие статистически достоверно: $\chi^2 = 96,74$, $p < 0,001$.

У пациентов, оперированных спустя 5 и более месяцев после травмы, снижение степени тяжести диплопии протекало менее выражено как в основной группе, так и в группе сравнения. К 6-му месяцу после операции тяжесть диплопии снизилась. В основной группе у 9 (64 %) пациентов наблюдалась II степень диплопии и у остальных 5 (36 %) — III степень. В группе сравнения у 1 (20 %) пациента выявлена II степень тяжести диплопии, у 4 (80 %) — III степень.

Изучение глазодвигательных расстройств показало, что до операции группы являлись однородными по данному признаку: тяжелые III–IV степени глазодвигательные расстройства наблюдались у 95 % пациентов основной группы и у 94 % группы сравнения, $\chi^2 = 5,32$, $p = 0,07$.

Через 6 месяцев после операции у 38 (95 %) пациентов основной группы, оперированных в течение 14 дней после травмы, произошло восстановление подвижности глазного яблока в полном объеме и у 2 (5 %) пациентов сохранились остаточные проявления глазодвигательных расстройств I степени. В группе сравнения глазодвигательные расстройства отсутствовали у 8 (80 %) пациентов, у 2 (20 %) пациентов зафиксированы расстройства I–II степени. Межгрупповое различие отсутствовало ($\chi^2 = 4,53$, $p = 0,1$). При выполнении операции спустя 1–4 месяца после травмы в основной группе полное восстановление подвижности глазного яблока зафиксировано у 47 (40 %) пациентов, у 71 (60 %) пациента наблюдалось остаточное, I–II степени, функционально допустимое нарушение подвижности глазного яблока. В группе сравнения у 12 (67 %) пациентов глазодвигательные расстройства соответствовали II степени, у 6 (33 %) пациентов — III степени. Межгрупповые различия регресса глазодвигательных расстройств в данный период носили статистически значимый характер ($\chi^2 = 92,72$, $p < 0,001$).

Наиболее сложными в плане устранения глазодвигательных расстройств являлись пациенты, которым реконструктивное лечение проводилось через 5 и более месяцев после травмы. К 6-му месяцу после операции в основной группе у 11 (79 %) пациентов наблюдалась II степень глазодвигательных расстройств, у 3 (21 %) пациентов — III степень тяжести. В группе сравнения преобладала III степень тяжести глазодвигательных расстройств у 3 (60 %) пациентов, у 2 (40 %) пациентов — II степень данного расстройства. Межгрупповое различие отсутствовало ($\chi^2 = 92,72$, $p = 0,11$).

При изолированном переломе анализ волюметрии глазниц показал, что использование ИИ привело к статистически достоверному уменьшению объема поврежденной глазницы: $V_{пг} — 27,8 \text{ см}^3$, $V_{рг} — 26,7 \text{ см}^3$, $p < 0,001$ (таблица 9). У пациентов удалось практически полностью нормализовать объем поврежденной глазницы: $V_{иг} — 26,4 \text{ см}^3$, $V_{рг} — 26,7 \text{ см}^3$, $p > 0,05$. В группе сравнения наблюдаемые различия оказались недостоверными: $V_{пг} — 28,1 \text{ см}^3$, $V_{рг} — 27,8 \text{ см}^3$, $p > 0,05$; не удалось добиться восстановления объема поврежденной глазницы: $V_{иг} — 26,7 \text{ см}^3$, $V_{рг} — 27,8 \text{ см}^3$, $p < 0,05$ (таблица 10).

Использование ИИ при сочетанном переломе привело к уменьшению объема поврежденной глазницы по сравнению с дооперационным уровнем ($V_{пг} — 31,7 \text{ см}^3$, $V_{рг} — 26,6 \text{ см}^3$, $p < 0,001$). Объем реконструированной глазницы был максимально приближен к значению интактной ($V_{рг} — 26,6 \text{ см}^3$, $V_{иг} — 26,3 \text{ см}^3$, $p > 0,05$) (таблица 9).

В группе сравнения объем глазницы также уменьшился, однако данные изменения не оказались статистически достоверными ($V_{пг} — 30,1 \text{ см}^3$, $V_{рг} — 28,8 \text{ см}^3$, $p > 0,05$). Объем реконструированной глазницы не достиг уровня интактной ($V_{рг} — 28,8 \text{ см}^3$, $V_{иг} — 26, \text{ см}^3$, $p < 0,05$).

Таблица 9 – Результаты волюметрии интактной ($V_{иг}$), поврежденной до операции ($V_{пг}$) и реконструированной после операции ($V_{рг}$) глазниц у пациентов основной группы с различным типом перелома

Тип перелома глазницы	Состояние глазниц, объем глазницы, Me [25; 75] (см^3), количество пациентов (n)			Статистическая значимость различий U -тест, W , $p < 0,05$
	$V_{иг}$	$V_{пг}$	$V_{рг}$	
	1	2	3	
Изолированный	$n = 71$ 26,4 [25,8; 27,0]	$n = 71$ 27,8 [26,9; 28,7]	$n = 71$ 26,7 [25,8; 27,0]	$p_{1,2} < 0,001$ $p_{1,3} > 0,05$ $p_{2,3} < 0,001$
Сочетанный	$n = 44$ 26,3 [25,8; 27,2]	$n = 44$ 31,7 [30,5; 32,8]	$n = 44$ 26,6 [25,9; 27,1]	$p_{1,2} < 0,001$ $p_{1,3} > 0,05$ $p_{2,3} < 0,001$
Комбинированный	$n = 57$ 26,8 [26,3; 27,5]	$n = 57$ 33,7 [32,2; 34,7]	$n = 57$ 27,5 [26,8; 28,0]	$p_{1,2} < 0,001$ $p_{1,3} < 0,05$ $p_{2,3} < 0,001$

При комбинированном переломе использование обоих типов имплантатов позволило уменьшить объем поврежденной границы. В основной группе $V_{пг} — 33,7 \text{ см}^3$, $V_{рг} — 27,5 \text{ см}^3$, $p < 0,001$, в группе сравнения $V_{пг} — 33,3 \text{ см}^3$, $V_{рг} — 32,1 \text{ см}^3$, $p < 0,001$. Но полного восстановления объема поврежденной глазницы не произошло как в основной группе ($V_{иг} — 26,8 \text{ см}^3$, $V_{рг} — 27,5 \text{ см}^3$, $p < 0,05$), так и в группе сравнения ($V_{иг} — 26,7 \text{ см}^3$, $V_{рг} — 32,1 \text{ см}^3$, $p < 0,001$) (таблицы 9, 10).

Таблица 10 – Результаты волюметрии глазниц до операции и после операции у пациентов группы сравнения с различным типом перелома

Тип перелома глазницы	Состояние глазниц, объем глазницы, Me [25; 75] (см^3), количество пациентов (n)			Статистическая значимость различий U -тест, W , $p < 0,05$
	$V_{иг}$	$V_{пг}$	$V_{рг}$	
	1	2	3	
Изолированный	$n = 8$ 26,7 [26,6; 27,6]	$n = 8$ 28,1 [26,7; 28,9]	$n = 8$ 27,8 [26,5; 28,4]	$p_{1,2} < 0,05$ $p_{1,3} < 0,05$ $p_{2,3} > 0,05$
Сочетанный	$n = 9$ 26,9 [26,5; 27,6]	$n = 9$ 30,1 [29,3; 31,2]	$n = 9$ 28,8 [28,5; 29,5]	$p_{1,2} < 0,01$ $p_{1,3} < 0,05$ $p_{2,3} > 0,05$
Комбинированный	$n = 16$ 26,7 [26,1; 27,8]	$n = 16$ 33,3 [32,0; 34,3]	$n = 16$ 32,1 [30,7; 33,4]	$p_{1,2} < 0,001$ $p_{1,3} < 0,001$ $p_{2,3} < 0,001$

Применение ИИ позволило достоверно снизить степень тяжести Эн у пациентов основной группы при всех типах перелома глазницы (таблица 11).

Полное устранение посттравматического Эн ($p < 0,001$) было диагностировано у 71 (100 %) пациента с изолированным и у 44 (100 %) пациентов с сочетанным переломом. У 46 (81 %) пациентов с комбинированным переломом глазницы также наблюдалось отсутствие Эн ($p < 0,001$). У 6 (10 %) пациентов этой группы наблюдался остаточный Эн I степени. Однако у 5 (9 %) пациентов с комбинированным переломом была зафиксирована II степень Эн, что было обусловлено как тяжестью повреждений, так и длительностью существования посттравматического процесса в глазнице.

Таблица 11 – Распределение пациентов основной группы с различным типом перелома глазницы по степени тяжести энтофтальма до и после операции

Тип перелома	Сроки определения		Степень тяжести энтофтальма, количество пациентов n/%			
			0 (0 мм)	I (1–2 мм)	II (3–4 мм)	III (5 мм и более)
Изолированный (n = 71/100 %)	до операции	1	47/66	20/28	4/6	–/–
	после операции	2	71/100	–/–	–/–	–/–
Сочетанный (n = 44/100 %)	до операции	3	11/25	22/50	10/23	1/2
	после операции	4	44/100	–/–	–/–	–/–
Комбинированный (n = 57/100 %)	до операции	5	–/–	12/19	26/46	20/35
	после операции	6	46/81	6/10	5/9	–/–
Sing Test $p < 0,05$			$p_{1,2} < 0,001, p_{3,4} < 0,001, p_{5,6} < 0,001$			

В группе сравнения в послеоперационный период отсутствовали статистически достоверные изменения ($p > 0,05$) по степени тяжести Эн в сравнении с дооперационным состоянием (таблица 12).

Таблица 12 – Распределение пациентов группы сравнения с различным типом перелома глазницы по степени тяжести энтофтальма до и после операции

Тип перелома	Сроки определения		Степень тяжести энтофтальма, количество пациентов n/%			
			0 (0 мм)	I (1–2 мм)	II (3–4 мм)	III (5 мм и более)
Изолированный (n = 8/100 %)	до операции	1	8/100	–/–	–/–	–/–
	после операции	2	8/100	–/–	–/–	–/–
Сочетанный (n = 9/100 %)	до операции	3	5/56	4/44	–/–	–/–
	после операции	4	5/56	4/44	–/–	–/–
Комбинированный (n = 16/100 %)	до операции	5	–/–	1/6	6/38	9/56
	после операции	6	–/–	1/6	6/38	9/56
Sing Test, $p < 0,05$			$p_{1,2} > 0,05; p_{3,4} > 0,05; p_{5,6} > 0,05$			

Анализ динамики изменений степени тяжести Г у пациентов исследуемых групп после операции показал, что у пациентов основной группы посттравматический Г устранен у 71 (100 %) пациента с изолированным переломом и у 44 (100 %) пациентов с сочетанным переломом ($p < 0,001$),

а также у 54 (95 %) пациентов с комбинированным переломом глазницы. Лишь у 3 (5 %) пациентов зафиксирован остаточный Г I степени ($p < 0,001$).

В группе сравнения Г полностью устранен у 8 (100 %) пациентов с изолированным переломом. У пациентов с сочетанными комбинированным переломами после операции наблюдалась лишь тенденция к снижению степени тяжести Г по сравнению с дооперационным периодом ($p > 0,05$ и $p > 0,05$ соответственно). Клинически значимый Г II степени сохранялся у 4 (44 %) пациентов с сочетанным и у 9 (56 %) пациентов с комбинированным переломами.

Тип повреждения костей стенки глазницы оказывает значительное влияние на выбор имплантата для восстановления. В случаях изолированных переломов ИИ продемонстрировал более высокую эффективность по сравнению со стандартным в устранении симптомов двоения, глазодвигательных расстройств и дистопии глазного яблока, однако СИ может оставаться приемлемым вариантом в определенных клинических случаях. При комбинированных и сочетанных переломах применение ИИ является обязательным. В основной группе у всех пациентов имплантат плотно прилегал к стенке глазницы, тогда как в группе сравнения у 4 из 33 пациентов было выявлено смещение СИ вглубь глазницы, у 3 пациентов зафиксировано смещение заднего края имплантата в верхнечелюстную пазуху, что являлось следствием отсутствия опоры для имплантата в задних отделах глазницы. Внедрение новой технологии хирургического лечения с ИИ позволило сократить продолжительность операции в 1,8 раза по сравнению с группой, использующей СИ ($p < 0,05$).

Результаты внедрения в клиническую практику лечебных учреждений разработанной технологии хирургического лечения пациентов с дефектами и деформациями глазницы

Результаты разработки и внедрения новых методов диагностики и лечения последствий травматических дефектов и деформаций костных стенок глазницы с использованием ИИ легли в основу создания алгоритма обследования и лечения пациентов с дефектами и деформациями костных структур глазницы (рисунок 17), обеспечили достижение как медицинских, так и социально-экономических эффектов.

Применение разработанной технологии хирургического лечения у пациентов основной группы позволило устранить: двоение в функционально значимых направлениях зрения у 97 % пациентов (при использовании традиционной технологии — только у 70 % пациентов); клинически значимый посттравматический Эн у 97 % пациентов (при традиционной технологии — у 54 % пациентов); Г у 100 % пациентов (при традиционной технологии —

у 61 % пациентов), что является следствием полноценного восстановления архитектоники глазницы ИИ.



Рисунок 17 – Алгоритм обследования и лечения пациентов с дефектами и деформациями костных структур глазницы

Индекс удовлетворенности пациентов с орбитальными переломами оказанной медицинской помощью в основной группе составил в отношении диплопии и Эн 0,97 (в группе сравнения в отношении диплопии — 0,70, Эн —

0,55). Внедрение разработанной технологии хирургического лечения пациентов с травматическими дефектами и деформациями глазницы способствовало росту обращаемости за специализированной помощью с $29,2 \pm 4,2$ до $105,7 \pm 12,5$ обращений в год, увеличению количества реконструктивных операций на глазнице в лечебных учреждениях Республики Беларусь с $5,0 \pm 1,4$ до $29,7 \pm 5,9$ в год. Интегральный коэффициент превышения значимых медицинских результатов от новой технологии по сравнению с традиционной составил 1,63. Техничко-технологические и ценовые характеристики представленной инновационной разработки также позволяют констатировать ее высокую конкурентоспособность и возможность успешного экспорта медицинских услуг на ее основе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. При изучении процессов фиброваскуляризации, происходящих на поверхности экспериментальных моделей имплантатов, морфогистологическим методом и ЭСМ установлено, что на всех моделях имплантатов происходило образование оформленной соединительной ткани. Наибольшая интенсивность данных процессов была выявлена у имплантатов с округлыми перфорациями. При удалении имплантатов с округлыми перфорациями наблюдалось максимальное сопротивление окружающих его тканей, что указывает на глубокую интеграцию. Имплантаты с неперфорированной поверхностью (щелевидные просечки) легко отделялись от капсулы, но имели максимальные прочностные свойства. По результатам эксперимента разработана новая конструкция титанового имплантата, которая характеризуется наличием отверстий диаметром 1,5 мм на периферии и щелевидных просечек в центральной части. Данная конструкция имплантата улучшает позиционирование и интеграцию с тканями [1–А, 2–А, 3–А, 5–А, 19–А].

2. Разработано, протестировано и внедрено в клиническую практику специальное программное средство автоматической обработки выходных данных МСКТ в формате DICOM с использованием обученной нейросети Mask R-CNN. Разработанное специальное программное средство позволило снизить уровень потерь информации о состоянии наиболее тонких костей глазницы при построении 3D-модели костей лицевого черепа с 22–31 % при ручной обработке до 3–5 % в автоматическом режиме. Сравнение значений объема глазницы, рассчитанных по результатам разметки нейросети и ручной разметки, показало, что различия составляют не более 8 %. Время обработки изображений дефекта костных стенок глазницы в автоматическом режиме

составило $(15,5 \pm 1,6)$ минут, а при ручной обработке офтальмологом совместно с рентгенологом и инженером — $(153,31 \pm 12,73)$ минут [7–А, 8–А, 15–А, 17–А, 20–А, 22–А, 24–А, 26–А, 28–А, 29–А, 30–А].

3. Разработанный и внедренный в клиническую практику алгоритм комплексного обследования и хирургического лечения пациентов с дефектами и деформациями глазницы с использованием специального программного средства для автоматической обработки DICOM-файлов МСКТ позволил сформировать комплекс базовых показателей, определяющих состояние травмированной глазницы, необходимость и объем реконструктивной операции. Цифровизация объема поврежденной и интактной глазниц, дистопии глазного яблока, размерно-геометрических параметров дефекта обеспечивает получение исчерпывающей информации для составления плана реконструктивной операции, изготовления титанового ИИ, 3D-модели глазницы пациента с ретенционными точками фиксации в масштабе 1 : 1, а также для верификации качества выполненной операции [2–А, 4–А, 6–А, 8–А, 11–А, 16–А, 18–А, 19–А, 21–А, 23–А, 25–А, 28–А].

4. Применение разработанной технологии лечения у пациентов с орбитальными переломами в сравнении с традиционным методом лечения позволило добиться лучших результатов по восстановлению преморбидной анатомии глазницы и устранению клинически значимых степеней тяжести функциональных расстройств: объем поврежденной глазницы полностью восстановлен как при проведении операции в ранний ($V_{иг} — 26,4 \text{ см}^3$, $V_{рг} — 26,6 \text{ см}^3$, $p = 0,47$), так и в отсроченный периоды после травмы ($V_{иг} — 26,5 \text{ см}^3$, $V_{рг} — 26,9 \text{ см}^3$, $p = 0,16$); у 100 % пациентов устранена диплопия и глазодвигательные расстройства; у пациентов, оперированных в поздний период, объем поврежденной глазницы уменьшился, однако сохранились достоверные различия с интактной глазницей ($V_{иг} — 26,9 \text{ см}^3$, $V_{рг} — 27,7 \text{ см}^3$, $p < 0,001$), устранены диплопия и глазодвигательные расстройства у 64 и 79 % пациентов соответственно. Использование традиционного метода с применением СИ привело к уменьшению объема поврежденной глазницы только у пациентов, оперированных в ранний период после травмы, однако различия с интактной глазницей являлись достоверными ($V_{иг} — 27,1 \text{ см}^3$, $V_{рг} — 28,3 \text{ см}^3$, $p < 0,01$), функциональные расстройства устранены у 100 % пациентов. У пациентов, оперированных в другие сроки, достоверных положительных изменений объема глазницы не достигнуто, а также с большей частотой встречались тяжелые степени функциональных расстройств [9–А, 10–А, 11–А, 18–А, 19–А, 21–А, 27–А].

5. При изолированном и сочетанном переломах использование ИИ позволило в полной мере восстановить объем поврежденной глазницы ($V_{рг} — 26,7 \text{ см}^3$, $V_{иг} — 26,4 \text{ см}^3$, $p > 0,05$ и $V_{рг} — 26,6 \text{ см}^3$, $V_{иг} — 26,3 \text{ см}^3$,

$p > 0,05$ соответственно). У всех пациентов устранены клинически значимые проявления энофтальма и гипофтальма. При комбинированном переломе использование ИИ также способствовало существенному уменьшению объема поврежденной глазницы, но не до уровня интактной ($V_{рг} — 27,5 \text{ см}^3$, $V_{иг} — 26,8 \text{ см}^3$, $p < 0,05$). Клинически значимый энофтальм устранен у 91 % пациентов, гипофтальм — у 100 % пациентов. Использование СИ при изолированном переломе не привело в полной мере к нормализации объема поврежденной глазницы, различие с интактной глазницей являлись достоверными ($V_{иг} — 26,7 \text{ см}^3$, $V_{рг} — 27,8 \text{ см}^3$, $p < 0,05$), гипофтальм устранен у 100 % пациентов. У пациентов с сочетанным и комбинированным переломами использование СИ не позволило восстановить архитектуру глазницы ($V_{иг} — 26,9 \text{ см}^3$, $V_{рг} — 28,8 \text{ см}^3$, $p < 0,05$; $V_{иг} — 26,7 \text{ см}^3$, $V_{рг} — 32,1 \text{ см}^3$, $p < 0,001$ соответственно), у всех сохранилась исходная степень тяжести дистопии [6–А, 9–А, 13–А, 14–А, 18–А, 19–А, 27–А]. Внедрение разработанной технологии хирургического лечения пациентов с дефектами и деформациями глазницы способствовало росту направлений пациентов на оказание специализированной помощи с $29,2 \pm 4,2$ до $105,7 \pm 12,5$ обращений в год, а также позволило увеличить количество проводимых реконструктивных хирургических операций на глазнице, в том числе с участием хирургов смежных специальностей в лечебных учреждениях Республики Беларусь с $5,0 \pm 1,4$ до $29,7 \pm 5,9$ в год [12–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов:

1. Пациенты с травматическими дефектами и деформациями глазницы должны находиться под динамическим наблюдением офтальмолога, который определяет необходимость, этапность и объем оказания специализированной офтальмологической помощи [24–А].

2. Клинически апробированный алгоритм обследования пациентов с травматическими дефектами и деформациями глазницы предусматривает документальное подтверждение наличия и степени тяжести энофтальма, гипофтальма, диплопии и глазодвигательных расстройств, а также степени увеличения объема травмированной глазницы.

3. Проведение МСКТ с использованием сПС при обследовании пациентов с травматическими дефектами и деформациями глазницы является обязательным условием получения достоверной информации о состоянии травмированной глазницы.

4. При выявлении клинически значимых проявлений травматических повреждений костных структур глазницы (увеличение $V_{пг}$ более чем на 3 см^3 , энофтальма более чем на 2,5 мм, гипофтальма более чем на 2,5 мм),

сопровождающихся функциональными и эстетическими нарушениями, показано хирургическое лечение [23–А, 24–А].

5. Разработанное сПС обязательно не только для автоматизации процесса расчета параметров глазницы на этапе подготовки к операции, при планировании операции и для оценки результатов операции по устранению дефекта костных стенок глазницы, но и для изготовления ИИ [23–А, 24–А].

6. Пациенты, обратившиеся за оказанием специализированной помощи непосредственно после травмы и нуждающиеся в хирургическом лечении, должны быть оперированы в первые 14 суток после получения травмы [24–А].

7. Использование СИ допустимо в ранние сроки после травмы при изолированных переломах. При сочетанных и комбинированных переломах глазницы как в ранние, так и в поздние сроки с момента получения травмы должны быть использованы индивидуально изготовленные имплантаты [9–А, 10–А, 11–А, 18–А, 19–А, 21–А, 27–А].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1–А. Сканирующая электронная микроскопия в изучении поверхностных тканевых реакций при выборе титановых имплантатов для реконструктивной хирургии области орбиты / О. Н. Дудич, И. С. Абельская, В. Л. Красильникова, И. А. Швед // Здравоохранение. — 2018. — № 9. — С. 63–66.

2–А. Моделирование повреждений стенок орбиты и определение размерно-геометрических параметров костного дефекта в эксперименте на кроликах / В. Л. Красильникова, О. Н. Дудич, В. С. Осипович, И. С. Абельская // Офтальмология. Вост. Европа. — 2021. — Т. 11, № 3. — С. 273–282.

3–А. Обоснование выбора конструкции имплантата из титана, предназначенного для устранения костных дефектов стенок орбиты, на основе морфогистологического исследования тканей мелких лабораторных животных / В. Л. Красильникова, О. Н. Дудич, И. А. Швед, И. С. Абельская // Здравоохранение. — 2021. — № 11. — С. 24–34.

4–А. Возможности использования мультиспиральной компьютерной томографии при моделировании и устранении дефекта орбиты у кроликов / О. Н. Дудич, В. Л. Красильникова, Ю. Н. Патупчик, М. М. Салех // Здравоохранение. — 2023. — № 4. — С. 70–77.

5–А. Дудич, О. Н. Доклинические исследования моделей титановых имплантатов для устранения костных дефектов стенок орбиты / О. Н. Дудич, В. Л. Красильникова // Мед. новости. — 2023. — № 4. — С. 63–68.

6–А. Опыт хирургического лечения посттравматических дефектов и деформаций краниофациальной области с использованием предоперационного планирования и аддитивных технологий (клинический случай) / О. Н. Дудич, В. Л. Красильникова, В. С. Осипович, И. И. Малиновская, М. М. Салех // Передовая офтальмология = Advanced Ophthalmology. — 2024. — Т. 7, № 1. — С. 57–64.

7–А. Дудич, О. Н. Клиническое применение программного средства на основе сверточной нейронной сети для обработки файлов DICOM мультиспиральной компьютерной томографии при лечении пациентов с травматическими повреждениями и деформациями орбиты / О. Н. Дудич, В. Л. Красильникова, В. С. Осипович // Передовая офтальмология = Advanced Ophthalmology. — 2024. — Т. 8, № 2. — С. 152–163.

8–А. Осипович, В. С. Разработка алгоритма обработки результатов мультиспиральной компьютерной томографии глазницы в автоматическом режиме для построения трехмерной модели глазницы и орбитального

имплантата / В. С. Осипович, О. Н. Дудич, В. Л. Красильникова // Журн. Гродн. гос. мед. ун-та. — 2024. — Т. 22, № 4. — С. 349–359.

9–А. Дудич, О. Н. Применение стандартных по форме и размерам титановых имплантатов для замещения дефекта костной стенки глазницы / О. Н. Дудич // Мед. новости. — 2024. — № 7. — С. 64–67.

10–А. Дудич, О. Н. Результаты хирургического устранения диплопии при травматических повреждениях орбиты / О. Н. Дудич, В. Л. Красильникова // Мед. новости. — 2024. — № 8. — С. 56–59.

11–А. Красильникова, В. Л. Индивидуальные титановые орбитальные имплантаты при реконструкции травматических деформаций орбиты / В. Л. Красильникова, О. Н. Дудич // Мед. новости. — 2024. — № 8. — С. 73–76.

12–А. Дудич, О. Н. Переломы орбиты как медико-социальная проблема современной офтальмологии / О. Н. Дудич, В. Л. Красильникова, М. М. Салех // Здоровоохранение. — 2024. — № 8. — С. 52–58.

13–А. Дудич, О. Н. Дистопии как проявления травматических повреждений глазницы / О. Н. Дудич // Здоровоохранение. — 2024. — № 8. — С. 59–64.

14–А. Дудич, О. Н. Волуметрические показатели глазницы при ее травматических повреждениях и деформациях до и после хирургического лечения / О. Н. Дудич, В. Л. Красильникова // Вестн. Витеб. гос. мед. ун-та. — 2024. — Т. 23, № 4. — С. 51–62.

15–А. Дудич, О. Н. Разработка программного средства на основе сверточной нейронной сети для обработки данных мультиспиральной компьютерной томографии орбиты / О. Н. Дудич, В. С. Осипович, В. Л. Красильникова // Вестн. Витеб. гос. мед. ун-та. — 2024. — Т. 23, № 4. — С. 94–104.

Материалы конференций и тезисы докладов

16–А. Технология получения 3D-модели костей лицевого черепа / В. С. Осипович, О. Н. Дудич, К. Д. Яшин, А. Ю. Николаев, С. К. Дик, О. С. Медведев // Медэлектроника – 2015. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : сб. науч. ст. IX Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 4–5 дек. 2015 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники, Белорус. мед. акад. последиплом. образования; редкол.: Л. М. Лыньков [и др.]. — Минск, 2015. — С. 43–44.

17–А. Processing of large amounts of information for reconstructive facial surgery / V. Osipovich, O. Dudzich, V. Krasilnikova, S. Dzik, A. Nikolaev, U. Kovalenko, K. Yashin // BIG DATA and Advanced Analytics. Использование BIG DATA для оптимизации бизнеса и информационных технологий: сб. материалов II Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 15–17 июня 2016 г. /

Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол.: М. П. Батура [и др.]. — Минск, 2016. — С. 89–97.

18–А. Дудич, О. Н. Реконструкция костных структур глазницы индивидуальным титановым имплантатом, произведенным с использованием технологий трехмерного моделирования и прототипирования / О. Н. Дудич, В. Л. Красильникова, Ю. Д. Коваленко // Сборник материалов дней белорусской науки в г. Москве. Научные достижения Республики Беларусь. — Минск, 2017. — С. 75–79.

19–А. Углубленный анализ больших данных инновационной лицевой хирургии / О. Н. Дудич, В. Л. Красильникова, В. С. Осипович, А. Ю. Николаев, А. Л. Радненок, К. Д. Яшин // BIG DATA and Advanced Analytics. BIG DATA и анализ высокого уровня: сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 13–14 марта 2019 г.: в 2 ч. / Беларус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. — Минск, 2019. — Ч. 2. — С. 54–68.

20–А. Возможности использования мультиспиральной компьютерной томографии в визуализации посттравматических дефектов нижней стенки глазницы / А. Н. Михайлов, Ю. Н. Патупчик, О. Н. Дудич, В. Л. Красильникова // Лучевая визуализация заболеваний скелета и внутренних органов: сб. науч. работ, посвящ. 125-летию юбилею открытия рентгеновского излучения / Беларус. мед. акад. последиплом. образования; под ред. А. Н. Михайлова. — Минск, 2020. — С. 121–123.

21–А. Возможности трехмерного моделирования в реконструктивной хирургии глазницы / О. Н. Дудич, В. Л. Красильникова, Ю. Н. Патупчик, В. С. Асипович, В. В. Рубис, Т. Ф. Воронович, Д. С. Дудич // Современный многопрофильный стационар — мультидисциплинарный подход к пациенту: материалы науч.-практ. конф., посвящ. 35-летию УЗ «10-я гор. клин. больница», Минск, 22 мая 2020 г. / 10-я гор. клин. больница, Беларус. гос. мед. ун-т, Беларус. мед. акад. последиплом. образования; под общ. ред. В. П. Исачкина. — Минск, 2020. — С. 51–52.

22–А. Использование нейронных сетей в обработке медицинских изображений / А. А. Каракулько, О. С. Медведев, П. А. Мороз, О. Н. Дудич, В. Л. Красильникова, В. С. Осипович, К. Д. Яшин // BIG DATA and Advanced Analytics. BIG DATA и анализ высокого уровня: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 20–21 мая 2020 г.: в 3 ч. / редкол.: В. А. Богуш [и др.]. — Минск, 2020. — Ч. 1. — С. 294–302.

Инструкции по применению

23–А. Метод реконструкции костных структур глазницы индивидуальным титановым имплантатом, изготовленным с использованием

технологий трехмерного моделирования и прототипирования : инструкция по применению № 071-1116 : утв. М-вом здравоохранения Респ. Беларусь 25.11.2016 / Беларус. мед. акад. последиплом. образования; В. Л. Красильникова, О. Н. Дудич, С. Н. Ильина, В. Г. Мармыш, Ю. Н. Патупчик. — Минск, 2016. — 14 с.

24–А. Метод определения анатомо-топографических параметров глазницы : инструкция по применению № 139-1220: утв. М-вом здравоохранения Респ. Беларусь 16.12.2020 / Беларус. мед. акад. последиплом. образования; В. Л. Красильникова, О. Н. Дудич, В. С. Осипович. — Минск, 2020. — 15 с.

Патенты

25–А. Патент ВУ 22331, МПК А 61В 17/00 (2006.01), А 61F 2/28 (2006.01) Способ реконструкции индивидуальным титановым имплантатом костных структур глазницы у пациентов с травматическим дефектом: № а 20160438: заявлено 01.12.2016: опубл. 30.12.2018 / Дудич О. Н., Красильникова В. Л., Ильина С. Н., Мармыш В. Г., Патупчик Ю. Н.; заявитель Беларус. мед. акад. последиплом. образования. — URL: <https://search.ncip.by/database/index.php?pref=inv&lng=ru&page=3&target=36110> (дата обращения: 07.10.2024).

Прочие

26–А. Algorithm of processing microspiral CT-scan results for constructing a three-dimensional model of orbit thin bones / A. Radnionok, V. Asipovich, A. Dudzich, V. Krasilnikova, A. Nikolayeu, K. Yashin // J. of Engineering Science. — 2018. — Vol. 25, № 4. — P. 39–46.

27–А. Компьютерное моделирование индивидуальных лицевых имплантов / О. Н. Дудич, В. Л. Красильникова, В. С. Осипович, А. Ю. Николаев, А. Л. Раднёнок, К. Д. Яшин // Доклады БГУИР. — 2018. — № 7. — С. 106–111.

28–А. Deep learning in processing medical images and calculating the orbit volume / V. S. Asipovich, O. N. Dudich, V. L. Krasilnikova, A. A. Karakulko, A. L. Radnionok, P. A. Moroz, A. Y. Nikolaev, M. A. Konovalova, K. D. Yashin // 4th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering Proceedings of ICNBME-2019, Sept. 18–21, 2019, Chisinau, Moldova. — Springer, 2020. — P. 519–522. — URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-31866-6_93 (date of access: 07.10.2024).

29–А. Технология преобразования результатов компьютерной томографии в трехмерные модели / В. С. Осипович, О. С. Медведев,

О. Н. Дудич, В. Л. Красильникова, К. Д. Яшин // Информ. технологии. — 2021. — Т. 27, № 11. — С. 600–606.

30–А. Свидетельство о добровольной регистрации депонировании объекта авторского права «Программное средство автоматического расчета параметров глазницы» № 1729-КП от 29.04.2024 / О. Н. Дудич, В. С. Осипович, О. С. Медведев, В. Л. Красильникова.

РЭЗІЮМЭ

Дудзіч Аксана Мікалаеўна

Хірургічнае лячэнне пацыентаў з траўматычнымі дэфектамі і дэфармацыямі вачніцы з выкарыстаннем тэхналогіі трохвымернага мадэлявання (эксперыментальна-клінічнае даследаванне)

Ключавыя словы: траўматычныя дэфекты і дэфармацыі вачніцы, імплантаты, мультыспіральная камп'ютарная тамаграфія (МСКТ), праграмны сродак, трохвымернае мадэляванне, нейронавыя сеткі, рэканструкцыйна-аднаўленчае лячэнне

Мэта даследавання: абгрунтаванне, распрацоўка і ўкараненне ў клінічную практыку тэхналогіі хірургічнага лячэння пацыентаў з траўматычнымі дэфектамі і дэфармацыямі вачніцы на аснове вынікаў эксперыментальных і клінічных даследаванняў з выкарыстаннем лічбавых тэхналогій, магчымасцей 3D-мадэлявання і прататыпіравання.

Метады даследавання: эксперыментальны, клінічны, аналітычны, марфалагічны, інструментальны, клініка-экспертны, метады статыстычнага аналізу.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Упершыню распрацаваны і ўкаранёны ў клінічную практыку персаналізаваны афтальмалагічны імплантат са сплаваў тытана з улікам індывідуальных анатама-тапаграфічных параметраў вачніцы пацыента, які палягчае яго формаўтварэнне і пазіцыянаванне падчас аперацый. Устаноўлены біямаркеры для навучання нейронавай сеткі пры вызначэнні памерна-геаметрычных параметраў вачніцы, распаўсюджанасці траўматычнага працэсу, формы і памеру дэфекту касцявой структуры вачніцы. Упершыню распрацаваны і ўкаранёны ў клінічную практыку праграмны сродак для аўтаматычнага разліку параметраў вачніцы, формы і памераў персаналізаванага імплантата на аснове апрацоўкі растравых выяваў МСКТ, і на яго аснове навукова абгрунтаваны алгарытм абследавання пацыентаў для выбару адэкватных памерна-геаметрычных параметраў імплантата і планавання хірургічнага лячэння. Доказна абгрунтавана эфектыўная тэхналогія персаніфікаванага лячэння пацыентаў з траўматычнымі дэфектамі і дэфармацыямі вачніцы з выкарыстаннем магчымасцей 3D-мадэлявання і прататыпіравання.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: матэрыялы дысертацыйнай працы ўкаранёны ва ўстановах аховы здароўя Рэспублікі Беларусь.

Галіна прымянення: афтальмалогія, сківічна-тварная хірургія, рэабіліталогія, імпланталогія, эксперыментальная медыцына.

РЕЗЮМЕ

Дудич Оксана Николаевна

Хирургическое лечение пациентов с травматическими дефектами и деформациями глазницы с использованием технологии трехмерного моделирования (экспериментально-клиническое исследование)

Ключевые слова: травматические дефекты и деформации глазницы, имплантаты, мультиспиральная компьютерная томография (МСКТ), программное средство, трехмерное моделирование, нейронные сети, реконструктивно-восстановительное лечение

Цель исследования: обоснование, разработка и внедрение в клиническую практику технологии хирургического лечения пациентов с травматическими дефектами и деформациями глазницы на основе результатов экспериментальных и клинических исследований с использованием цифровых технологий, возможностей 3D-моделирования и прототипирования.

Методы исследования: экспериментальный, клинический, аналитический, морфологический, инструментальный, клинико-экспертный, методы статистического анализа.

Полученные результаты и их новизна. Впервые разработан и внедрен в клиническую практику персонализированный офтальмологический имплантат из сплавов титана с учетом индивидуальных анатомо-топографических параметров глазницы пациента, облегчающий его формообразование и позиционирование в ходе операции. Установлены биомаркеры для обучения нейронной сети при определении размерно-геометрических параметров глазницы, распространенности травматического процесса, формы и размера дефекта костной структуры глазницы. Впервые разработано и внедрено в клиническую практику программное средство для автоматического расчета параметров глазницы, формы и размеров персонализированного имплантата на основе обработки растровых изображений МСКТ, и на его основе научно обоснован алгоритм обследования пациентов для выбора адекватных размерно-геометрических параметров имплантата и планирования хирургического лечения. Доказательно обоснована эффективная технология персонифицированного лечения пациентов с травматическими дефектами и деформациями глазницы с использованием возможностей 3D-моделирования и прототипирования.

Рекомендации по использованию: материалы диссертационной работы внедрены в учреждениях здравоохранения Республики Беларусь.

Область применения: офтальмология, челюстно-лицевая хирургия, реабилитология, имплантология, экспериментальная медицина.

SUMMARY

Dudich Oksana Nikolaevna

**Surgical treatment of patients with traumatic defects
and orbit deformations using three-dimensional modeling technology
(experimental and clinical studies)**

Keywords: traumatic defects and deformations of the orbit, implants, multispiral computed tomography (MSCT), software, three-dimensional modeling, neural networks, reconstructive treatment

Purpose of the study: substantiation, development and implementation a surgical treatment technology for patients with traumatic orbital defects and deformations based on experimental and clinical studies. Digital technologies, 3D modeling and prototyping capabilities into clinical practice are integrated in this approach.

Research methods: experimental, clinical, analytical, morphological, instrumental, clinical and expert, statistical analysis methods.

The obtained results and their novelty. A personalized ophthalmic implant made of titanium alloys was for the first time developed and introduced into clinical practice, based on individual anatomical and topographic parameters of the patient's orbit, thus facilitating its shaping and positioning during surgery.

Biomarkers were identified to train a neural network for determining dimensional and geometric parameters of the orbit, assessing the prevalence of traumatic injuries, as well as defining the shape and size of orbital bone defects. A software tool for automatic calculation of orbital parameters and personalized implant dimensions were for the first time developed based on raster MSCT image processing. This tool was integrated into clinical practice, and an algorithm for examining patients to select adequate dimensional and geometric parameters of the implant and plan surgical treatment was scientifically substantiated on its basis. An effective, personalized treatment technology for traumatic orbital defects and deformations using the capabilities of 3D modeling and prototyping was developed and validated.

Recommendations for use: the materials of the dissertation were implemented in healthcare institutions of the Republic of Belarus.

Application area: ophthalmology, maxillofacial surgery, rehabilitation, implantology, experimental medicine.

Подписано в печать 16.04.25. Формат 60×84/16. Бумага писчая «PROJECTA Special».
Ризография. Гарнитура «Times».
Усл. печ. л. 2,56. Уч.-изд. л. 2,41. Тираж 60 экз. Заказ 266.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный медицинский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/187 от 24.11.2023.
Ул. Ленинградская, 6, 220006, Минск.