

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

Дудич О.Н.¹, Красильникова В.Л.², Осипович В.С.³

1. Кандидат медицинских наук доцент кафедры офтальмологии, УО «Белорусский Государственный медицинский университет», oksana_s20@mail.tu, <https://orcid.org/0009-0004-6554-3230>
2. Доктор медицинских наук, профессор кафедры офтальмологии, УО «Белорусский Государственный медицинский университет», krasilnikova_vik@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5852-2616>
3. Кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной психологии и эргономики, ГУО «Белорусский государственный институт информатики и радиоэлектроники», seth22@yandex.by, <https://orcid.org/0000-0001-9658-286>

Аннотация. Актуальность. Основное место в системе реабилитации пациентов с травмами орбиты занимают реконструктивные операции, целью которых является восстановление нормальной анатомии поврежденной орбиты для достижения хороших функциональных и эстетических результатов. Достижения в области компьютерных технологий, включая трехмерную печать, внедрение программного обеспечения для планирования оперативного лечения, внедрение новых моделей имплантатов позволяют улучшить результаты реконструктивного лечения при травмах орбиты. **Цель исследования.** Апробация в клинике разработанного программного средства для автоматического расчета параметров орбиты и индивидуального орбитального имплантата для реконструкции костных стенок при их повреждении и деформации с построением 3D модели орбиты и орбитального имплантата. **Материалы и методы.** Разработанное в Республики Беларусь программное средство для автоматического расчета параметров орбиты и индивидуального орбитального имплантата. Оценивались показатели распространенности травматического процесса в орбите (объем орбиты, объем пролабированной клетчатки, степень гипопальма и энтофтальма). Данный алгоритм определения размера дефектов орбиты для создания индивидуального имплантата был апробирован на 35 пациентах, составивших две группы. Группа 1 – расчет параметров орбиты производился на основе разработанной автоматизированной программы – 25 пациентов. Группа 2 – расчет параметров орбиты производился полуавтоматическим вариантом программы – 10 пациентов. **Результаты и заключение.** Установлено, что объем здоровой орбиты у пациентов основной группы составил $24,6 \pm 0,47$ см³, контрольной группы – $24,33 \pm 0,49$ см³. На стороне повреждения наблюдалось увеличение объема орбиты у всех пациентов. Средний объем глазничной клетчатки, пролабируемой в верхнечелюстную пазуху, у пациентов с изолированными переломами нижней стенки орбиты составил $2,9 \pm 0,66$ см³ в основной группе и $3,0 \pm 0,37$ см³ в контрольной группе. Время, затраченное на обработку изображений дефекта костных стенок орбиты в автоматическом режиме, в среднем составило $15,5 \pm 1,6$ минут, в полуавтоматическом составило в среднем $153,31 \pm 12,73$ минут. Сравнение объема орбит, рассчитанных по результатам разметки нейронной сети с объемами орбит, рассчитанными по результатам ручной разметки показало, что разница не превышает 4–8% и сравнение виртуального прототипа орбиты и прототипа костного дефекта, рассчитанных по результатам разметки нейронной сети, и рассчитанными по результатам ручной разметки, показало, что разница составляет не более 5,5%. Разработанное программное средство обязательно не только для автоматизации процесса расчета параметров орбиты на этапе подготовки к операции и для оценки результатов операции по устранению дефекта костных стенок орбиты, но и для изготовления индивидуальных имплантатов, полностью повторяющих топографические параметры дефекта костных структур орбиты.

Ключевые слова: мультиспиральная компьютерная томография, перелом орбиты, 3D модель, DICOM изображение, нейронные сети

Для цитирования:

Дудич О.Н., Красильникова В.Л., Осипович В.С. 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. Передовая Офтальмология. 2024;8(2), 152-163.

CLINICAL APPLICATION OF SOFTWARE BASED ON CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK FOR PROCESSING DICOM FILES OF MULTISPIRAL COMPUTED TOMOGRAPHY IN THE TREATMENT OF PATIENTS WITH TRAUMATIC INJURIES AND DEFORMATIONS OF THE ORBIT

Dudich O.N.¹, Krasilnikova V.L.², Osipovich V.S.³

1. PhD, Associate Professor of the Department of Ophthalmology, Institute for Advanced Studies and Retraining of Healthcare Personnel, educational institution "Belarusian State Medical University", oksana_s20@mail.tu, <https://orcid.org/0009-0004-6554-3230>

2. DSc, Professor of the Department of Ophthalmology, Institute for Advanced Studies and Retraining of Healthcare Personnel, educational institution "Belarusian State Medical University", krasilnikova_vik@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5852-2616>

3. PhD, Associate Professor of the Department of Engineering Psychology and Ergonomics, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, seth22@yandex.by, <https://orcid.org/0000-0001-9658-286>

Annotation. Relevance. The main place in the rehabilitation system of patients with orbital injuries is occupied by reconstructive surgeries, the purpose of which is to restore the normal anatomy of the damaged orbit to achieve good functional and aesthetic results. Advances in computer technology, including three-dimensional printing, the introduction of software for planning surgical treatment, the introduction of new models of implants can improve the results of reconstructive treatment for orbital injuries. **Purpose of the study.** Clinical testing of the developed software for automatic calculation of orbital parameters and an individual orbital implant for reconstruction of bone walls in case of their damage and deformation with the construction of a 3D model of the orbit and orbital implant. **Materials and methods.** Software developed in the Republic of Belarus for automatic calculation of orbital parameters and an individual orbital implant. The prevalence of the traumatic process in the orbit (orbital volume, volume of prolapsed tissue, degree of hypophthalmos and enophthalmos) were assessed. This algorithm for determining the size of orbital defects to create an individual implant was tested on 35 patients who made up two groups. Group 1 – orbital parameters were calculated using the developed automated program – 25 patients. Group 2 – orbital parameters were calculated using a semi-automatic version of the program – 10 patients. **Results and conclusion.** It was found that the volume of a healthy orbit in patients of the main group was $24.6 \pm 0.47 \text{ cm}^3$, in the control group – $24.33 \pm 0.49 \text{ cm}^3$. On the side of the injury, an increase in the orbital volume was observed in all patients. The average volume of orbital tissue prolapsed into the maxillary sinus in patients with isolated orbital floor fractures was $2.9 \pm 0.66 \text{ cm}^3$ in the main group and $3.0 \pm 0.37 \text{ cm}^3$ in the control group. The time spent on processing images of the orbital bone wall defect in automatic mode averaged 15.5 ± 1.6 minutes, in semi-automatic mode it averaged 153.31 ± 12.73 minutes. Comparison of the orbit volume calculated based on the results of neural network marking with the orbit volumes calculated based on the results of manual marking showed that the difference does not exceed 4–8%, and comparison of the virtual orbit prototype and the bone defect prototype calculated based on the results of neural network marking and calculated based on the results of manual marking showed that the difference is no more than 5.5%. The developed software is essential not only for automating the process of calculating orbit parameters at the stage of preparation for surgery and for assessing the results of surgery to eliminate the defect of the bone walls of the orbit, but also for the manufacture of individual implants that completely repeat the topographic parameters of the defect of the bone structures of the orbit.

Keywords: multispiral computed tomography, orbital fracture, 3D model, DICOM images, neural networks

For citation:

Dudich O.N., Krasilnikova V.L., Osipovich V.S. Clinical application of software based on convolutional neural network for processing dicom files of multispiral computed tomography in the treatment of patients with traumatic injuries and deformations of the orbit. *Advanced ophthalmology*. 2024;8(2), 152-163.

Актуальность. Технология трехмерной печати (3DP), также называемая быстрым прототипированием, широко применяется в различных медицинских специальностях, особенно в черепно-лицевой, пластической и реконструктивной и ортопедической хирургии. Количество публикаций, посвященных медицинским приложениям 3DP, за последние несколько лет увеличилось в геометрической прогрессии. По сравнению с технологией 1980-х годов, когда 3DP была впервые разработана, в настоящее время она значительно дешевле, доступнее и менее трудоемка. Большое разнообразие печатных материалов позволяет адаптировать механические свойства и внешний вид к конкретным приложениям. Разработка, доступного надежного программного средства

для 3D-моделирования является актуальной задачей современной медицины, в том числе и офтальмохирургии.

Поражение нижней стенки орбиты часто встречается при взрывных переломах орбиты (около 50%) [1,2]. Диплопия и энофтальм являются показаниями для хирургической реконструкции дефекта нижней стенки [3]. Аутологичные костные трансплантаты из черепа, пористый полиэтилен и полидиоксанон являются наиболее широко используемыми материалами для реконструкции нижней стенки орбиты [4]. В то же время 3D моделирование и прототипирование предоставляют индивидуальные, адаптированные к конкретным пациентам решения, для хирургических задач. [5-9]. В этой статье

приводятся результаты применения в клинической практике разработанного программного средства, основанного на сверточной нейронной сети для автоматического расчета параметров орбиты пациентов с переломом нижней стенки орбиты, которым была проведена реконструкция с использованием индивидуального, точно сформированного с помощью 3D моделирования и прототипирования имплантата.

Цель исследования – апробировать в клинике разработанное программное средство для автоматического расчета параметров орбиты и индивидуального орбитального имплантата для реконструкции костных стенок при их повреждении и деформации с построением 3D модели орбиты и орбитального имплантата.

Материалы и методы исследования. Алгоритм применения разработанного программного средства в клинике выглядел следующим образом.

В исходном состоянии через Веб-интерфейс (рис. 1) осуществляли загрузку комплектов DICOM файлов с костной и мягкотканой реконструкциями. Далее запускалась обработка исходных файлов. После окончания обработки программным средством исходных DICOM файлов пациента можно было видеть следующие результаты:

1) Результат расчёта волюметрических параметров орбит: костный и мягкотканый объёмы поврежденной орбиты и здоровой орбиты, а также результат расчёта степени дистопии (рис. 2). В дополнении к традиционно рассчитываемым гипoftальму, энофтальму и экзофтальму программным средством осуществ-

ляется также расчёт интегральной дистопии, то есть отклонение глазного яблока относительно нормального положения в трёхмерном пространстве. Кроме того, программное средство позволяет послойно просматривать три проекции черепа для анализа. Возможен просмотр, как мягкотканой, так и костной реконструкций орбиты.

2) Результат построения трёхмерной модели повреждения и результат генерации трёхмерной модели костей лицевого черепа. Оба файла (в формате stl), созданные программным средством, сохраняли на диске локального компьютера и далее использовали для корректировки в трёхмерных редакторах. На рисунке 3 отражена визуализация результата совмещения модели повреждения с моделью костей лицевого черепа в режиме просмотра.

3) Результат построения развёртки трёхмерной модели повреждения (рис. 4) в векторном виде.

После анализа результатов обработки открывались возможности для построения дизайна имплантата, изготовления и поверки имплантата.

Таким образом, программное средство для автоматизированного расчета параметров орбит и имплантата (рисунок 5) состоит из следующих программных модулей, выполняющих определённые функции.

1. Модуль поиска, распознавания и разметки глазных яблок на результатах МСКТ. Он осуществляет поиск таких биомаркеров, как глазные яблоки на всех слоях комплекта DICOM файлов (рис. 6).

2. Модуль расчета дистопии. В данном модуле программой осуществляется поиск откло-

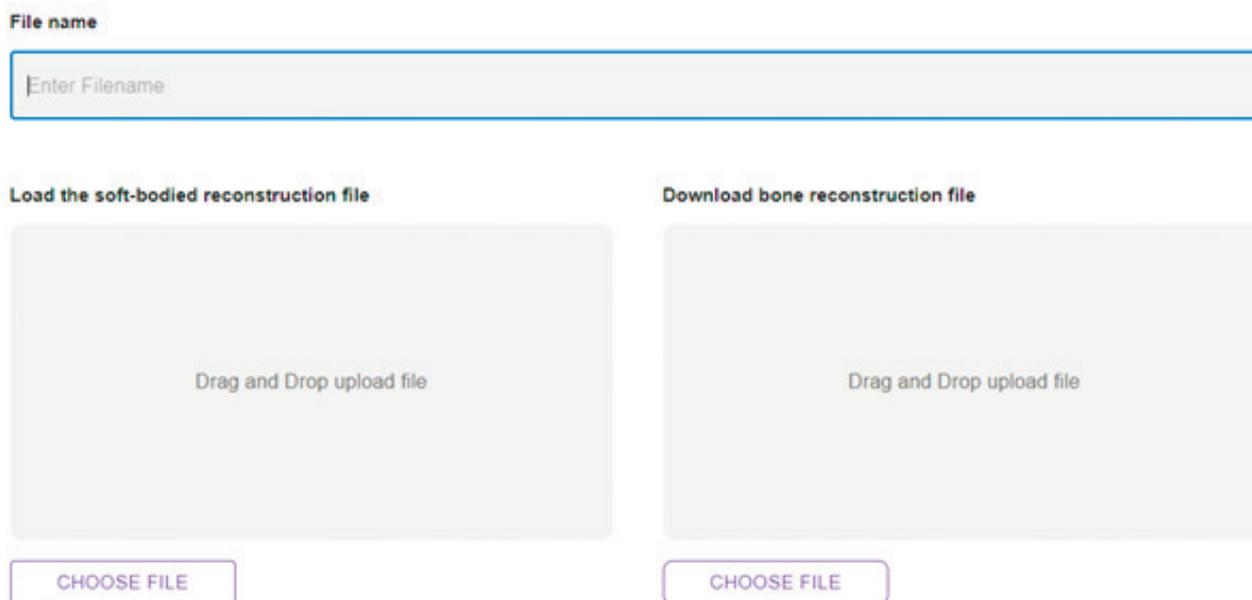


Рис. 1. Окно загрузки в программное средство исходных DICOM файлов пациента.

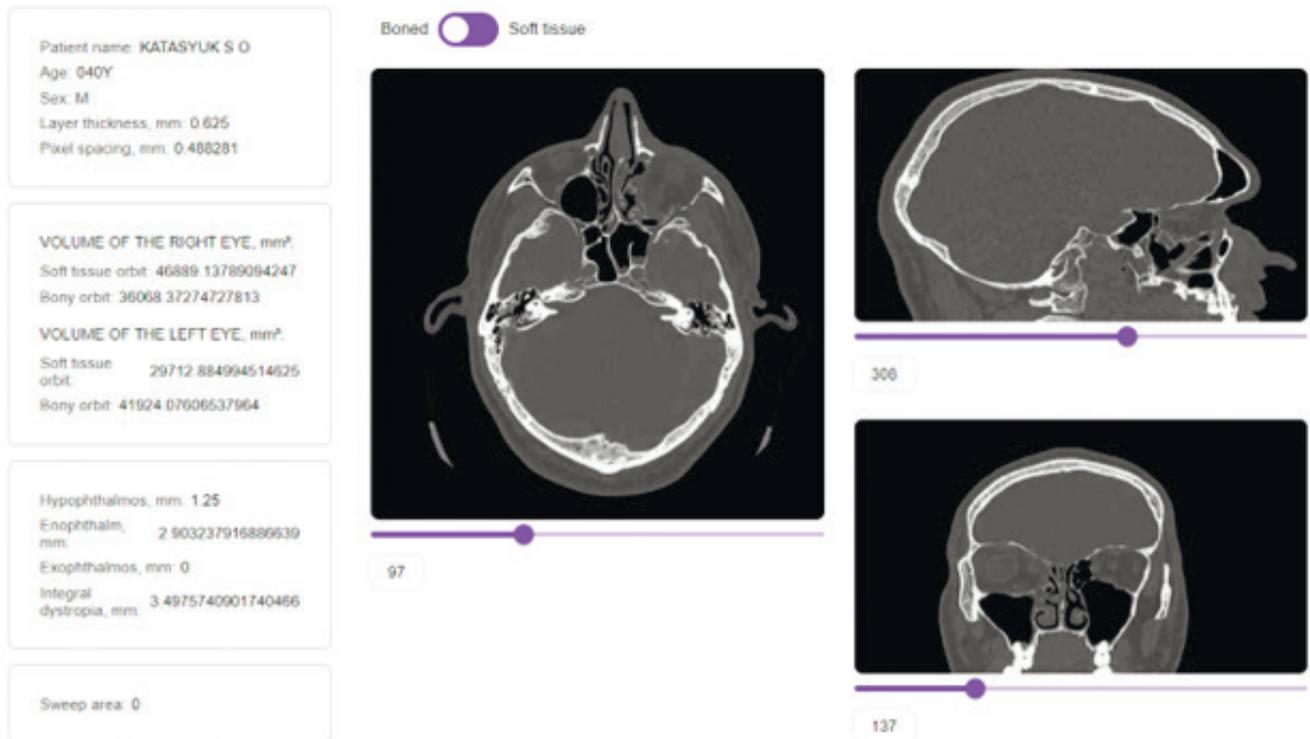


Рис.2. Структурная схема функционирования разработанного программного средства

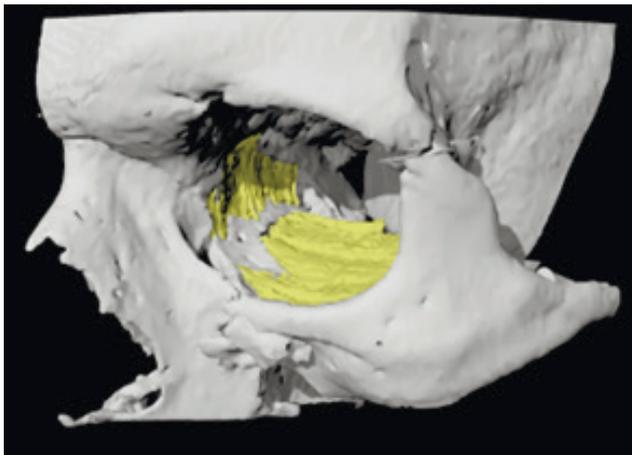


Рис. 3. Визуализация результата совмещения модели повреждения с моделью костей лицевого черепа в режиме просмотра.

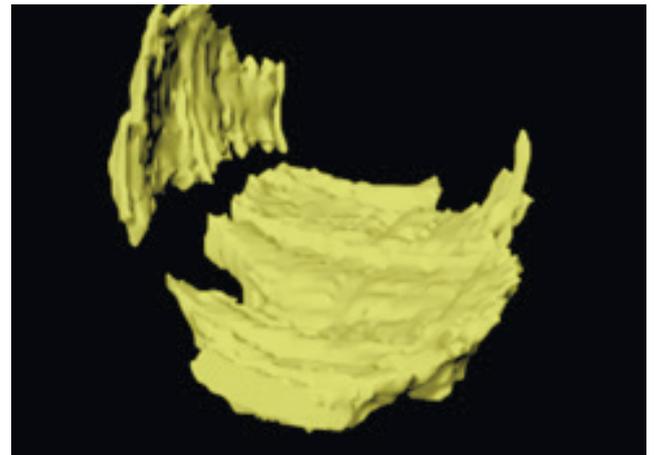


Рис. 4. Модель повреждения

нений глазного яблока от нормы, а именно: гипоптальма, экзофтальма, энофтальма и интегральной дистопии.

3. Модуль поиска, распознавания и разметки контуров орбит на результатах МСКТ. Модуль программного средства осуществляет поиск таких биомаркеров, как орбиты (костная и мягкотканая), после чего фиксирует координаты расположения орбиты и выделяет границы орбиты на снимках DICOM файла (рис. 7, 8).

4. Модуль расчета костного и мягкотканого объемов орбит. Используя результат поиска контуров орбит и данные о режиме сканирования программный модуль рассчитывает волюметрические параметры орбит.

5. Модуль послойной генерации повре-

жденных костей орбиты. Осуществляется автоматическая послойная генерация поврежденных костей орбиты (рис.9).

6. Модуль преобразования DICOM изображений в трехмерную модель в формате stl. Результаты компьютерной томографии преобразовываются

в матрицу координат на основе которой отстраивается 3D модель черепа

(рис. 10) и повреждения костей орбиты.

7. Модуль расчета площади дефекта костей орбиты обеспечивает построение геометрии развёртки верхней поверхности трёхмерной модели повреждения и рассчитывает площадь полученного векторного рисунка.

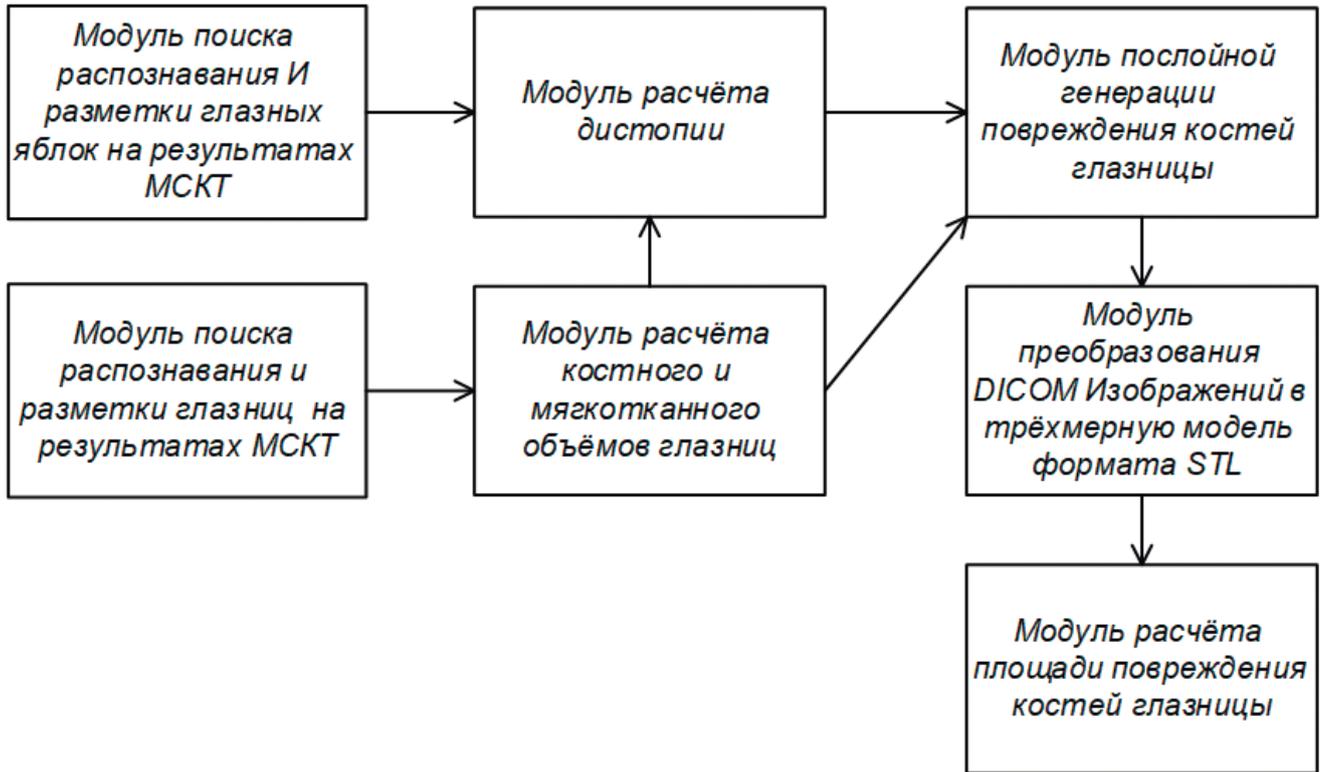


Рис. 5. Структурная схема программного средства.

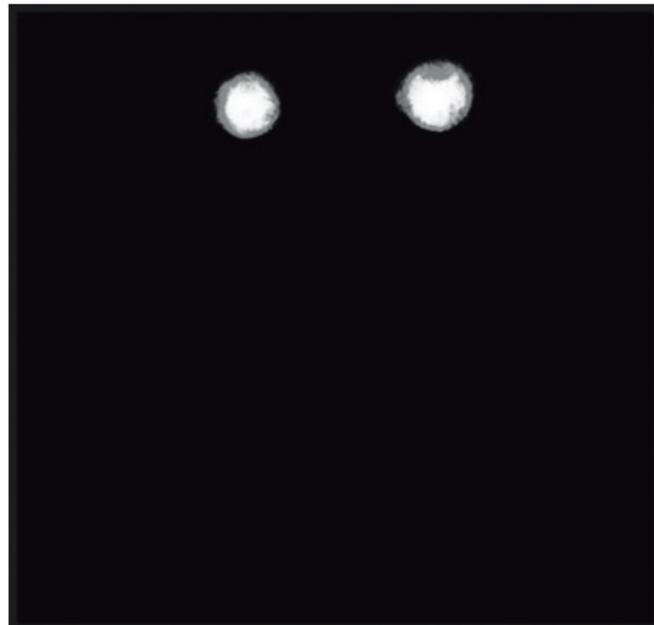


Рис. 6. Результат поиска нейросетью биомаркера – глазные яблоки.

Сравнение объема орбит, рассчитанных по результатам разметки нейронной сети, с объемами орбит, рассчитанными по результатам ручной разметки, показало, что разница не превышает 4–8%. Это свидетельствует о высокой точности разметки орбит нейронной сетью. Предлагаемое программное средство полезно также для автоматизации процесса расчета параметров орбиты на этапе подготовки к операции и для оценки результатов операции по устранению дефекта костных стенок орбиты.

Следует отметить, что разработанное программное средство обеспечивает генерацию трёхмерной модели костей лицевого черепа без потери информации о костях орбиты, что можно видеть по правому изображению сравнивая рисунки 10 и 11. В трёхмерной модели созданной программным пакетом 3D Slicer имеется перфорация в нижней и медиальной костях орбиты. Эта перфорация отсутствует в трёхмерной модели, созданной разработанным программным средством.

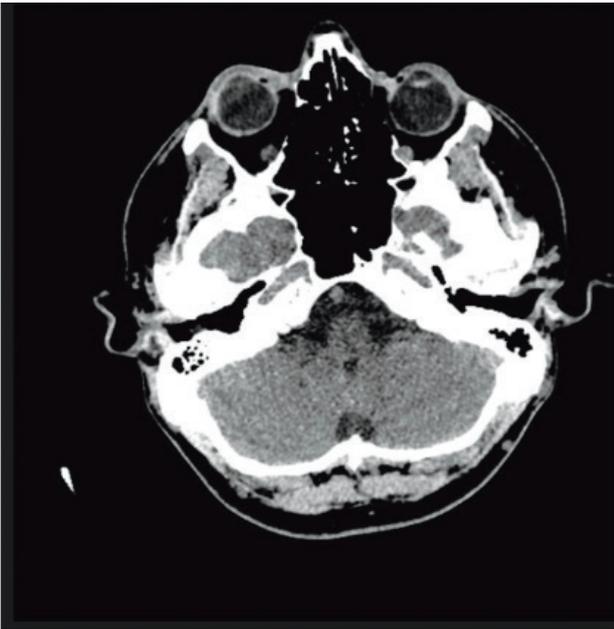


Рис. 7. Результат поиска нейросетью биомаркера – мягкотканый контур орбиты.

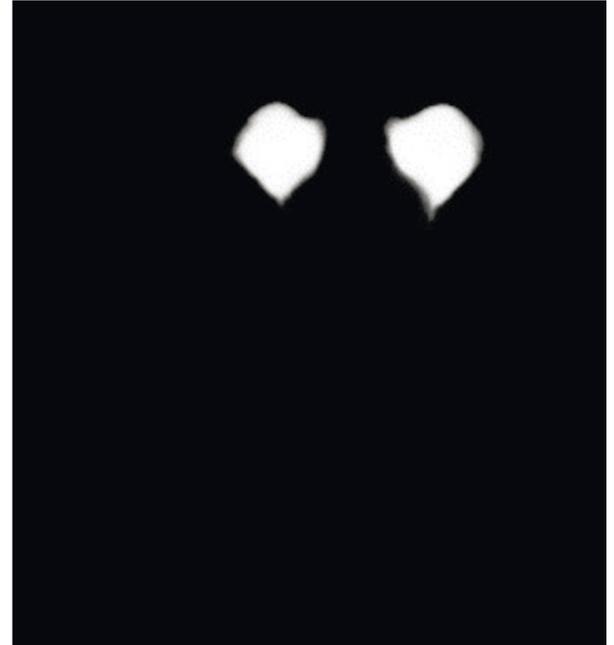
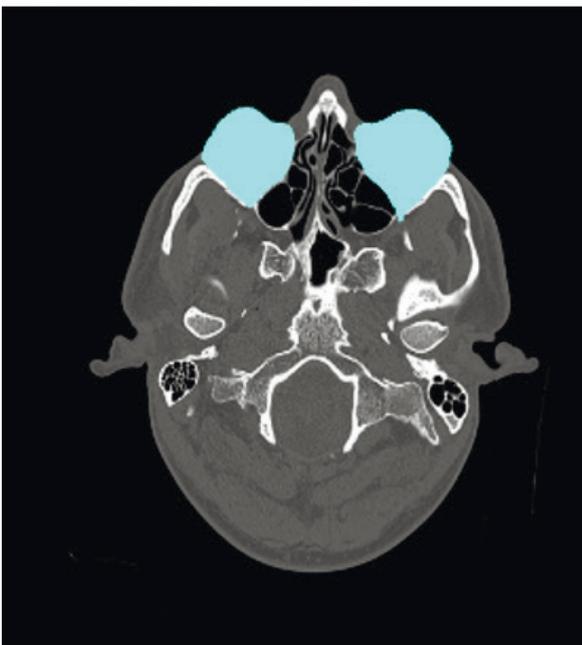


Рис.8. Результат поиска нейросетью биомаркера – мягкотканый контур орбиты (справа) в сравнении с результатом ручной разметки контура орбит (слева).

Сравнение виртуального прототипа орбиты и прототипа костного дефекта, рассчитанных по результатам разметки нейронной сети, с виртуальными прототипами орбит и прототипами индивидуальных имплантатов, рассчитанными по результатам ручной разметки, показало, что разница составляет не более 5,5%. Это подтверждает высокую точность разметки орбит нейронной сетью. Время, затраченное на обработку данных, в автоматическом режиме в среднем составляло $15,5 \pm 1,6$ минут.

Данный алгоритм определения размера дефектов орбиты для создания индивидуального имплантата был апробирован на 35 пациентах, составивших две группы.

Группа 1 (основная) – расчет параметров орбиты производился на основе разработанной автоматизированной программы – 25 пациентов.

Группа 2 (контрольная) – расчет параметров орбиты производился полуавтоматическим вариантом программы – 10 пациентов.

Результаты и их обсуждение. В результате апробации работы разработанного программного средства были получены высокие цифры вероятности правильной интерпретации результатов, полученных при использовании заявленного средства, что представлено на рисунке 12.

Разработанное программное средство при изготовлении индивидуальных имплантатов,

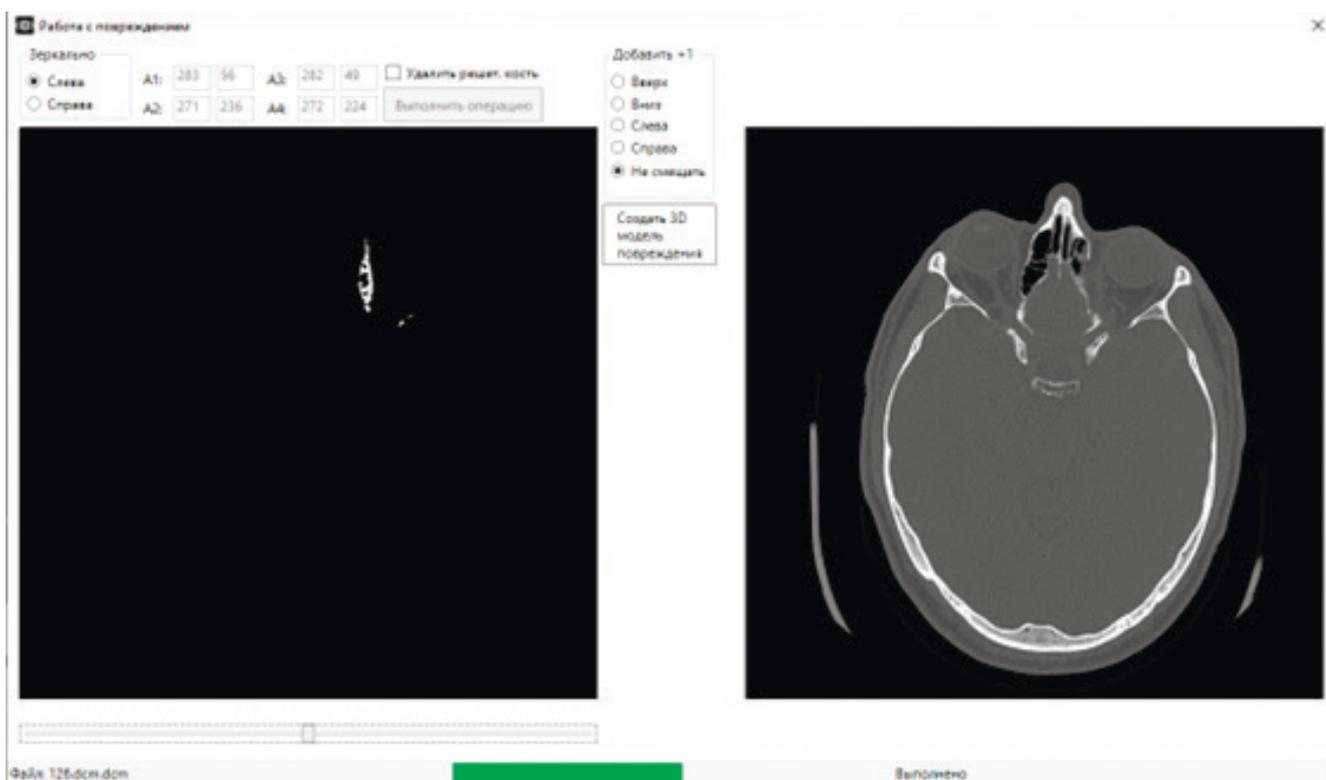
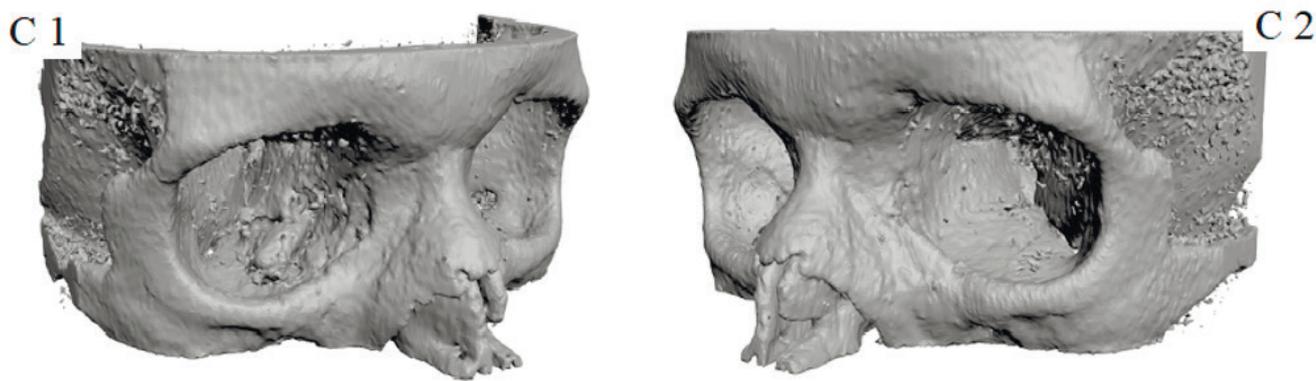


Рис.9. Результат построения повреждения костей орбиты в одном из слоёв.



C1 – поврежденная орбита, C2 – здоровая орбита.

Рис.10. Вид трёхмерной модели костей лицевого черепа, генерированный программным средством.

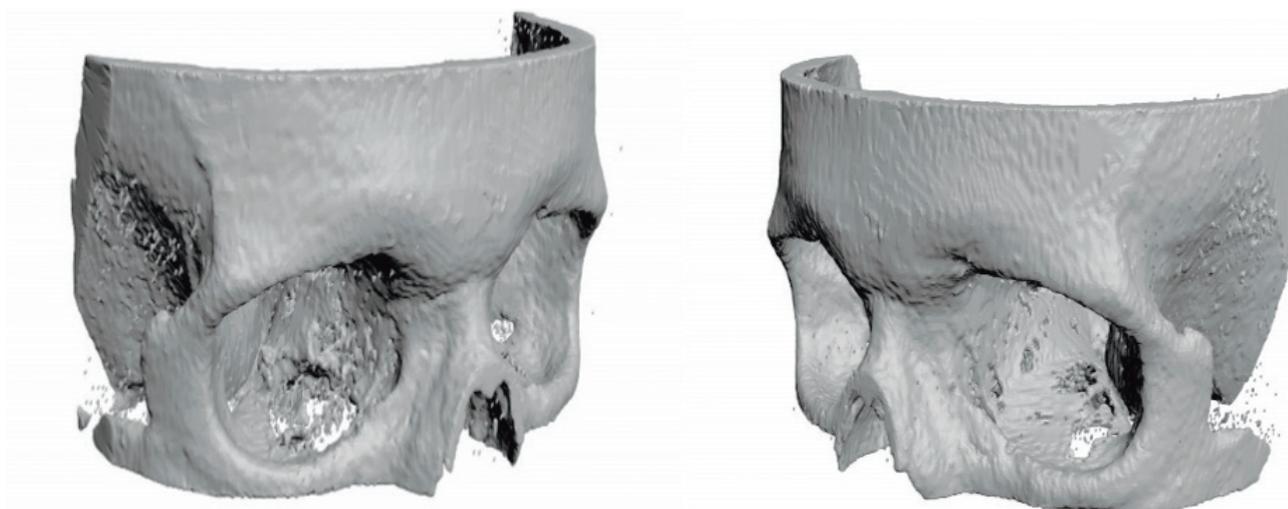


Рис. 11. Вид трёхмерной модели костей лицевого черепа, генерированный программным пакетом 3D Slicer.

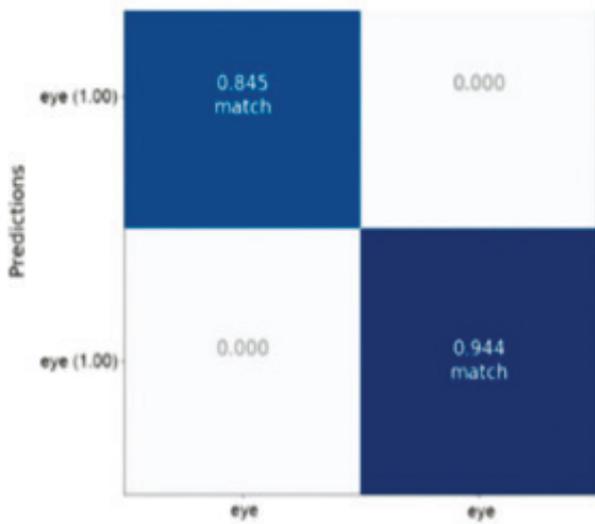


Рис. 12. Прогностические показатели работы предложенного алгоритма.

полностью повторяющих топографические параметры дефекта костных структур орбиты, позволяет получить результат в 3 раза быстрее, чем при использовании ручного или полуавто-

в контрольной группе в сравнении со здоровой орбитой.

У пациентов с комбинированными повреждениями объем орбиты увеличивался в среднем на 4 см³ в основной, на 4,8 см³ в контрольной группе и составил 28,6±1,56 и 29,1±1,59 см³ соответственно в сравнении со здоровой орбитой.

Наибольшее увеличение объема в сравнении со здоровой орбитой наблюдалось у пациентов основной группы с переломами нижней стенки в сочетании с повреждением подглазничного края на 14,9 см³. Средний объем поврежденной орбиты составил 39,5±5,19 см³. Данные измерения объема орбиты представлены в таблице 1.

Увеличение объема орбиты на стороне поражения носило статистически значимое значение (p = 0,005) во всех группах наблюдения. Анализ изображений томограмм показал, что изменения затрагивали не только костные, но и мягкотканые образования глазничного органоконтекста: экстраокулярные мышцы и глазничную клетчатку, что приводило в свою очередь к изменению положения глаза относительно виртуального центра орбиты.

Таблица 1. Результаты определения объема здоровой и поврежденной орбиты у пациентов исследуемых групп до операции

Группа пациентов	Объем не поврежденной орбиты	Локализация перелома, объем поврежденной орбиты n, X±m (см ³)		
		Изолированный перелом нижней стенки орбиты	Перелом нижней стенки сочетающийся с переломом медиальной стенки орбиты	Комбинированные переломы с повреждением костного края орбиты и смещением скуло-глазничного комплекса
основная группа (n=25)	24,6±0,47	28,1±1,27	28,6±1,56	39,5±5,19
контрольная группа (n=10)	24,33±0,49	27,9±1,4	29,1±1,59	-

матического метода расчета параметров орбиты и дефекта костных стенок орбиты, что в свою очередь сокращает время подготовки к хирургическому лечению пациентов с травматическими повреждениями орбиты.

Одним из важных параметров является определение объема поврежденной орбиты до операции, после операции и сравнение его с контралатеральной.

В результате измерений установлено, что объем здоровой орбиты у пациентов основной группы составил 24,6±0,47 см³, контрольной группы – 24,33±0,49 см³. На стороне повреждения наблюдалось увеличение объема орбиты у всех пациентов. Так, у пациентов с изолированными переломами нижней стенки объем поврежденной орбиты составил 28,1±1,27 в основной и 27,9±1,4 в контрольной группе, т.е. увеличение объема у пациентов с изолированным переломом нижней стенки произошло на 3,5 см³ в основной и 3,6 см³

Результаты измерения объема пролабируемой клетчатки поврежденной орбиты у пациентов исследуемых групп до операции представлены в таблице 2.

Из данных представленных в таблице 2 видно, что у пациентов всех групп наблюдалось пролабирование глазничной клетчатки в область верхнечелюстной пазухи и решетчатого лабиринта. Наибольший объем выпавших тканей наблюдался при комбинированных переломах с повреждением орбитального края.

Средний объем глазничной клетчатки, пролабируемой в верхнечелюстную пазуху, у пациентов с изолированными переломами нижней стенки орбиты составил 2,9±0,66 см³ в основной группе и 3,0±0,37 см³ в контрольной группе. Объем пролабируемой клетчатки у пациентов с переломом нижней стенки, сочетающийся с переломом медиальной стенки орбиты, составил 3,76±0,51 см³ в основной и 4,1±0,31 см³ в контрольной группе.

Таблица 2. Результаты определения объема пролабириванной клетчатки поврежденной орбиты у пациентов исследуемых групп до операции

Группа пациентов	Локализация перелома, объем пролабириванной клетчатки n, X±Sx (см3)		
	Изолированный перелом нижней стенки орбиты	Перелом нижней стенки сочетающийся с переломом медиальной стенки орбиты	Комбинированные переломы с повреждением костного края орбиты и смещением скулоглазничного комплекса
основная группа (n=25)	(n=11) 2,9±0,66	(n=9) 3,76±0,51	(n=5) 4,9±1,37
контрольная группа (n=10)	(n=5) 3,0±0,37	(n=5) 4,1±0,31	-

Объем пролабириванной клетчатки у пациентов с комбинированными переломами, с повреждением костного края орбиты и смещением скулоглазничного комплекса составил 4,9±1,37 в основной группе.

Определение объема выпавшей клетчатки является вторым важным рентгенологи-

мости оценки третьего основного клинического элемента – дистопии.

Дистопии встречаются практически у всех пациентов, нуждавшихся в хирургическом лечении. Выраженность и частота встречаемости данного клинического элемента представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты определения дистопии у пациентов исследуемых групп до операции.

Вид дистопии	Группы пациентов, типы перелома орбиты, n, X±Sx (мм)					
	основная группа (n=25)			контрольная группа (n=10)		
	Изолированный перелом нижней стенки орбиты	Перелом нижней стенки сочетающийся с переломом медиальной стенки орбиты	Комбинированные переломы с повреждением костного края орбиты и смещением скулоглазничного комплекса	Изолированный перелом нижней стенки орбиты	Перелом нижней стенки сочетающийся с переломом медиальной стенки орбиты	Комбинированные переломы с повреждением костного края орбиты и смещением скулоглазничного комплекса
энофтальм	n=7 1,67±0,66 (1,44 - 2,06)	n=11 2,13±0,66 (2,06-2,22)	n=5 4,25±0,8 (3,9-4,6)	n=4 1,4±0,8 (1,06-1,8)	n= 5 3,3±0,8 (2,8-4,8)	-
гипофтальм	n=4 2,13±0,66 (1,06-2,22)	n=7 2,3±0,4 (2,06-2,4)	n=5 2,6±0,8 (2,2-3,22)	n=2 2,2±0,5 (1,9-2,2)	n=4 2,35±0,6 (2,2-2,54)	-

ческим диагностическим критерием, так как чем больше объем выпавшей клетчатки, тем сильнее выражены явления дистопии и тем более тщательно данная клетчатка должна быть возвращена в полость орбиты.

При изучении мягкотканых структур орбиты, пролабирующих в нижнечелюстную пазуху видно, что у 56% пациентов основной и 50% пациентов контрольной группы с тотальными изолированными, одностворчатными переломами нижней стенки наблюдалось провисание нижней прямой мышцы (НПМ) одновременно с клетчаткой в полость верхнечелюстной пазухи без признаков ущемления. Также наблюдалось округление брюшка НПМ, что по данным литературы является следствием утраты ее костной и соединительнотканной поддержки при тотальных переломах. Все вышеперечисленные критерии перелома костных структур орбиты приводят к необходи-

Наиболее часто встречаемым вариантом дистопии является энофтальм, чем больше и сложнее перелом, тем больше выражен энофтальм.

При сравнении между группами данный показатель не носил статистически значимого характера и составил в среднем 2,6±0,8 мм в основной группе и 2,4±0,6 мм в контрольной, но при сравнении его значений в зависимости от типа перелома отмечалось статистически значимое отличие между изолированными переломами и комбинированными в каждой группе.

Вторым проявлением дистопии является – гипофтальм. Его частота встречаемости незначительно отличается от встречаемости энофтальма, так если энофтальм составил 92% в основной группе и 90% в контрольной, то процент встречаемости гипофтальма составил 64% и 60% соответственно в основной и контрольной группах.

Таблица 4. Результаты определения объема орбиты у пациентов исследуемых групп до и после операции.

Объем орбиты	Группы пациентов, типы перелома орбиты, n, X±Sx (мм3)					
	основная группа (n=25)			контрольная группа (n=10)		
	Изолированный перелом нижней стенки орбиты	Перелом нижней стенки сочетающийся с переломом медиальной стенки орбиты	Комбинированные переломы с повреждением костного края орбиты и смещением скулоглазничного комплекса	Изолированный перелом нижней стенки орбиты	Перелом нижней стенки сочетающийся с переломом медиальной стенки орбиты	Комбинированные переломы с повреждением костного края орбиты и смещением скулоглазничного комплекса
До операции	n=11 28,1±1,27 (27,06-32,4)	n=9 28,6±1,56 (27,5-32,2)	n=5 39,5±2,19 (35,4-42,8)	n=5 27,9±1,4 (25,6-31,2)	n=5 29,1±1,59 (26,8-33,7)	-
После операции	n=11 23,67±1,8 (20,09 - 24,4)	n=9 23,6±1,4 (21,5-25,8)	n=5 24,25±0,8 (22,9-26,6)	n=5 23,93±0,8 (23,06-24,8)	n=5 23,3±0,8 (2,8-4,8)	-
разница	n=11 4,43±1,8	n=9 5,6±1,4	n=5 15,25±0,8	n=5 3,97±0,4	n=5 5,8±0,8	

При сравнении между группами цифровой показатель гипофтальма не носил статистически значимого характера и составил в среднем -2,4±0,8 мм в основной группе и -2,3±0,6 мм в контрольной, но при сравнении его значений в зависимости от типа перелома отмечалось статистически значимое отличие между изолированными и комбинированными переломами в каждой группе. Данная тенденция полностью повторяла вышеописанную при оценке энофтальма.

Таким образом можно утверждать, что наряду с классическими рентгенологическими признаками перелома орбиты, основными объективными показателями для принятия решения о необходимости хирургического лечения перелома орбиты являются энофтальм и гипофтальм более 2,5 мм, которые провоцируют появления диплопии, увеличение объема орбиты на 3 см³ и более, наличие рентгенологических и тактильных признаков ущемления нижней прямой мышцы.

Объективные данные о состоянии глазничных тканей и имплантата в послеоперационном периоде были получены с помощью МСКТ и разработанного программного средства, позволивших представить анатомо-топографические взаимоотношения мягкотканого содержимого орбит после устранения дефекта костных структур орбиты в зависимости от давности патологического процесса и типа повреждений костных структур. Оценивались следующие объективные данные: объем орбиты после операции, выраженность энофтальма и гипофтальма, положение имплантата в орбите. Результаты исследования представлены в таблицах 4-6.

Первым анализируемым параметром был объем орбиты (таблица 4).

Во всех случаях наблюдения удалось добиться уменьшения объема орбиты по сравнению с дооперационными показателями. При этом полное восстановление объема параметров орбиты (при сравнении контрлатеральных орбит) удалось добиться при переломах, не сопровождающихся повреждением контура орбиты. При комбинированных переломах наблюдались трудности при восстановлении «первоначального» объема орбиты. Тем не менее, в данной группе переломов отмечается статистически значимое изменение объема орбиты до операции и после (p=0,005).

Следующие параметры, подлежащие обязательному анализу это энофтальм и гипофтальм, которые не только влияют на косметический эффект от проведенной операции, но и на функциональный результат, нивелирование дооперационной диплопии. Результаты исследования этих показателей представлены в таблицах 5-6.

В обеих исследуемых группах наблюдалось уменьшение цифровой выраженности энофтальма и гипофтальма, при этом данные результаты имели статистическую достоверность при сравнении с дооперационными показателями. Наилучшие показатели по данным параметрам наблюдались в основной группе по сравнению с контрольной. В то же время проще устранялись энофтальм и гипофтальм у пациентов с изолированными переломами нижней стенки орбиты при условии восстановления «основной» зоны орбиты, расположенной в области вершины орбиты.

В послеоперационном периоде МСКТ орбит позволило оценить положение имплантата, адекватность выбранного объема имплантата, а также состояние экстраокулярных мышц и клетчатки.

Таблица 5. Результаты определения энтофтальма у пациентов исследуемых групп до операции и после операции.

Энтофтальм	Группы пациентов, типы перелома орбиты, n, X±Sx (мм)					
	основная группа (n=25)			контрольная группа (n=10)		
	Изолированный перелом нижней стенки орбиты	Перелом нижней стенки сочетающийся с переломом медиальной стенки орбиты	Комбинированные переломы с повреждением костного края орбиты и смещением скулоглазничного комплекса	Изолированный перелом нижней стенки орбиты	Перелом нижней стенки сочетающийся с переломом медиальной стенки орбиты	Комбинированные переломы с повреждением костного края орбиты и смещением скулоглазничного комплекса
До операции	n=7 1,67±0,66 (1,44 - 2,06)	n=11 2,13±0,66 (2,06-2,22)	n=5 4,25±0,8 (3,9-4,6)	n=4 1,4±0,8 (1,06-1,8)	n= 5 3,3±0,8 (2,8-4,8)	-
После операции	n=7 0,37±0,1 (0,06-0,69)	n=11 0,53±0,66 (0,16-0,94)	n=5 1,36±0,8 (0,5-2,22)	n=4 0,38±0,7 (0,06-0,72)	n=5 0,68±0,5 (0,1-1,3)	-
разница	n=7 1,3±0,4	n=11 1,63±0,8	n=5 2,89±0,8	n=4 1,02±0,8	n=5 2,62±1,2	-

Таблица 6. Результаты определения гипофтальма у пациентов исследуемых групп до операции и после операции.

Гипофтальм	Группы пациентов, типы перелома орбиты, n, X±Sx (мм)					
	основная группа (n=25)			контрольная группа (n=10)		
	Изолированный перелом нижней стенки орбиты	Перелом нижней стенки сочетающийся с переломом медиальной стенки орбиты	Комбинированные переломы с повреждением костного края орбиты и смещением скулоглазничного комплекса	Изолированный перелом нижней стенки орбиты	Перелом нижней стенки сочетающийся с переломом медиальной стенки орбиты	Комбинированные переломы с повреждением костного края орбиты и смещением скулоглазничного комплекса
До операции	n=4 2,13±0,66 (1,06-2,22)	n=7 2,3±0,4 (2,06-2,4)	n=5 2,6±0,8 (2,2-3,22)	n=2 2,05±0,5 (1,9-2,2)	n=4 2,35±0,6 (2,2-2,54)	-
После операции	n=4 0,1±0,2 (0,0-0,2)	n=7 0,3±0,2 (0,0-0,6)	n=5 0,96±0,8 (0,6-1,5)	n=2 0,25±0,5 (0,0-0,5)	n=4 0,4±0,6 (0,0-0,8)	-
разница	n=4 2,03±0,1	n=7 2,0±0,1	n=5 1,64±0,8	n=2 1,8±0,6	n=4 1,95±0,5	-

Анализ томограмм орбит пациентов основной группы после реконструкции костных дефектов индивидуальным титановым имплантатом показал, что у всех пациентов отмечалось максимальное восстановление костной анатомии орбиты. Положение имплантата в орбите четко совпадало с запланированным положением его в прототипе. Согласно данным МСКТ имплантат в передне-заднем направлении и по всей ширине перекрывал дефект, плотно прилежал к костной стенке как при изолированных дефектах, так и у пациентов с комбинированными повреждениями костных структур. Положение мышц,

пролабирующих в верхнечелюстную пазуху, или ущемленных между костными отломками до операции, в послеоперационном периоде оценивалось на данных томограммах как удовлетворительное. Что касается глазничной клетчатки, то на контрольных томограммах, сделанных в первые сутки после реконструкции, отмечалось неоднородное уплотнение глазничной клетчатки между имплантатом и экстраокулярной мышцей. Ретробульбарная клетчатка в полости ВЧП у пациентов после реконструкции костных дефектов орбиты индивидуальным титановым имплантатом не определялась.

Выше представленные результаты подтверждают эффективность предложенных программных средств в объективизации результатов выполненных хирургических операций, направленных на устранение дефектов костных стенок орбиты. Автоматическое программное средство позволяет не только точно определять основные анатомо-топографические особенности орбиты, но и ускорять процесс подготовки к операции и оценки ее результатов.

Выводы.

1. Время, затраченное на обработку изображений дефекта костных стенок орбиты в автоматическом режиме в среднем составляло $15,5 \pm 1,6$ минут и на порядок было меньшим времени при ручной обработке указанных данных врачом-офтальмологом совместно с врачом-рентгенологом и инженером-техником, которое составило в среднем $153,31 \pm 12,73$ минут, сравнение объема орбит, рассчитанных по результатам разметки нейронной сети, с объемами орбит, рассчитанными по результатам ручной разметки,

показало, что разница не превышает 4–8 % и сравнение виртуального прототипа орбиты и прототипа костного дефекта, рассчитанных по результатам разметки нейронной сети, и рассчитанными по результатам ручной разметки, показало, что разница составляет не более 5,5 %.

2. Использование рПС существенно расширяет возможности хирурга в плане диагностики состояния поврежденной орбиты до и после реконструктивной операции, при подготовке плана операции и в ходе самой операции.
3. Разработанное программное средство обязательно не только для автоматизации процесса расчета параметров орбиты на этапе подготовки к операции и для оценки результатов операции по устранению дефекта костных стенок орбиты, но и для изготовления индивидуальных имплантатов, полностью повторяющих топографические параметры дефекта костных структур орбиты.

ЛИТЕРАТУРА /REFERENCE

1. Sun MT, Wu W, Watanabe A. Orbital blowout fracture location in Japanese and Chinese patients. *Jpn J Ophthalmol*. 2015; 59(1):65-9.
2. Chodankar N, Dhupar V, Vijay V. Classifications and Theories of Orbital Fractures: A Review of Literature. *J Med Res Chronicles*. 2023; 10 (4): 248–260.
3. Burnstine MA. Clinical recommendations for repair of isolated orbital floor fractures: an evidence-based analysis. *Ophthalmology*. 2002;109(7): 1207–1210.
4. Vasile VA, Istrate S, Iancu RC, et al. Biocompatible Materials for Orbital Wall Reconstruction—An Overview *Materials (Basel)*. 2022; 15(6): 2183. doi:10.3390/ma15062183
5. Sigron GR, Rudy N, Chammartin F, Meyer S, Msallem B, Kunz C. Three-dimensional analysis of isolated orbital floor fractures before and after reconstruction using standard titanium meshes and patient-specific «hybrid» implants. *J Clin Med*. 2020; 9(5): 1579 <https://doi.org/10.3390/jcm9051579>
6. Vignesh U, Mehrotra D, Dichen, Anand V, Howlader D. Three dimensional reconstruction of late post traumatic orbital wall defects by customized implants using CAD-CAM, 3D stereolithographic models: A case report. *J Oral Biol Craniofac Res*. 2017; 7(3): 212–218.
7. Choi JW, Kim N. Clinical Application of Three-Dimensional Printing Technology in Craniofacial Plastic Surgery. *Arch Plast Surg*. 2015; 42(04): 513-513
8. Hamwood J, Schmutz B, Collins M J, Allenby MC, Alonso-Caneir D. A deep learning method for automatic segmentation of the bony orbit in MRI and CT images. *Sci Rep*. 2021; 11: 13693. doi: 10.1038/s41598-021-93227-3
9. Moolenaar JZ, Tümer N, Checa S/ Computer-assisted preoperative planning of bone fracture fixation surgery: A state-of-the-art review. *Front Bioeng Biotechnol*. 2022; 14:10:1037048. doi: 10.3389/fbioe.2022.1037048

Конфликт интересов отсутствует.