

DOI: <https://doi.org/10.22263/2312-4156.2024.4.94>

Разработка программного средства на основе сверточной нейронной сети для обработки данных мультиспиральной компьютерной томографии орбиты

О.Н. Дудич¹, В.С. Осипович², В.Л. Красильникова¹

¹Институт повышения квалификации и переподготовки кадров здравоохранения УО «Белорусский государственный медицинский университет», г. Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный институт информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь

Вестник ВГМУ. – 2024. – Том 23, №4. – С. 94-104.

The development of a software tool based on a convolutional neural network for processing multispiral computed tomography data of the orbit

O.N. Dudich¹, V.S. Osipovich², V.L. Krasilnikova¹

¹The Institute for Advanced Training & Retraining of Healthcare Personnel of the educational institution “Belarusian State Medical University”, Minsk, Republic of Belarus

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Vestnik VGMU. 2024;23(4):94-104.

Резюме.

В статье представлены результаты исследований по разработке и реализации в виде программного средства для расчета объема костной и мягкотканной орбиты, дистопий глаза. Для достижения поставленной цели было использовано глубокое обучение нейронной сети Mask R-CNN. Определяющим моментом в обучении нейросети является определение биомаркеров – основных элементов орбиты, на которые должна обращать свое внимание нейросеть. Основными биомаркерами являлись: костные структуры орбиты, глазное яблоко, экстраокулярные мышцы и смещенная ретробульбарная клетчатка. От точности и правильности выбора биомаркеров зависят дальнейшие возможности искусственного интеллекта правильно их оценивать и интерпретировать. Установлено, что погрешность расчета объемов глазницы по результатам разметки нейронной сети с объемами орбит, рассчитанными по результатам ручной разметки, не превышает 8%. Разработанное программное средство на основе сверточных нейронных сетей показало хорошие результаты по автоматическому расчету основных анатомо-топографических параметров глазницы и может использоваться в клинической практике при оценке результатов хирургического вмешательства по реконструкции тонких костей орбиты.

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

Abstract.

The article presents the results of research on the development and implementation in the form of a software tool for calculating the volume of the bone and soft tissue orbit, eye dystopia. To achieve this set goal, deep learning of the Mask R-CNN neural network was used. The defining moment in training the neural network is the definition of biomarkers – the main elements of the orbit, to which the neural network should pay its attention. The main biomarkers were: bone structures of the orbit, the eyeball, extraocular muscles and displaced retrobulbar tissue. The further capabilities of artificial intelligence to correctly assess and interpret them depend on the accuracy and correctness of the choice of biomarkers. It has been found that the error in calculating the volumes of the orbit based on the results of marking the neural network with the volumes of the orbits calculated based on the results of their manual marking does not exceed 8%. The developed software tool based on convolutional neural networks showed good results in the automatic calculation of

the main anatomical and topographic parameters of the orbit and can be used in clinical practice when assessing the results of surgical intervention to reconstruct thin bones of the orbit.

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

Введение

Одним из критериев оценки результатов хирургического вмешательства по устранению посттравматических дефектов костей орбиты является расчет объема орбиты до и после операции. В настоящее время оценка объема орбиты проводится с использованием программных инструментов для визуализации результатов рентгеновской компьютерной томографии в трех проекциях и методов послойного расчета объема орбиты на основе точек, установленных хирургом [1-3]. Наряду с оценкой объема орбиты проводится оценка тенденции изменения объема различных типов тканей в орбите [4]. В то же время анализ изображений, полученных в мультиспиральной компьютерной томографии (МСКТ) [5-7] в формате DICOM [8], и трехмерная реконструкция черепа позволяют хирургу более надежно оценить анатомические особенности конкретного пациента, локализацию, границы и распространенность патологического процесса, а также планировать объем хирургического вмешательства [9, 10].

Цель проекта – разработка программного средства для расчета объемов орбиты с использованием технологий машинного обучения на основе нейронных сетей.

Материал и методы

Всем пациентам до операции выполнялась МСКТ. Для проведения исследования использовали рентгеновский аппарат «Vision» и мультиспиральный компьютерный томограф LightSpeedPro32 фирмы GE. При выполнении МСКТ глазницы использовали стандартный протокол сканирования: коллимация среза 0,625 мм, общая ширина коллимации 20 мм, толщина среза 0,625 мм, питч 0,53 мм. Для оценки изображений использовали профессиональное программное обеспечение фирмы GE, где полученные аксиальные изображения реформировались в мультипланарных плоскостях (MPR): фронтальной, сагитальной, аксиальной и косых плоскостях

с возможностью построения 3D изображений. Полученные изображения импортировались на внешний носитель в формате DICOM.

При проведении МСКТ оценивали состояние костных структур орбиты, состояние экстраокулярных мышц, орбитальной клетчатки.

Результаты МСКТ пациентов были использованы для разработки программного средства в качестве исходного материала для обучения и результатов тестирования работы нейронной сети.

В качестве исходных данных для обучения нейронной сети были использованы результаты МСКТ 70 пациентов с переломами костей орбиты различной тяжести. По каждому пациенту анализировался набор изображений в формате DICOM.

Подготовка изображений для обучения нейронной сети осуществлялась путём послойной разметки этих изображений. До процесса разметки была осуществлена конвертация DICOM изображений в RGB изображения. В качестве инструмента для разметки данных использовали приложение VGG Image Annotator, это приложение для ручного аннотирования изображений с возможностью осуществлять множественную разметку. Результатом разметки являются файлы в формате csv и json, которые хранят информацию о координатах точек, ограничивающих полигон (результат разметки орбиты) в привязке к названию файла. Рисунок 1 отражает пример разметки исходных файлов.

Все исходные данные были разделены на тренировочные и тестовые в процентном соотношении 80% и 20% соответственно. Тестовые исходные данные использовались для проверки работы нейронной сети после обучения. Кроме того, тестовые исходные данные использовались в качестве контрольного эксперимента для сравнения результатов расчёта объёма глазниц, размеченных нейронной сетью с объёмом глазниц, размеченных вручную.

Результаты и обсуждение

Обучение нейронной сети. Решение поставленной задачи было осуществлено средствами

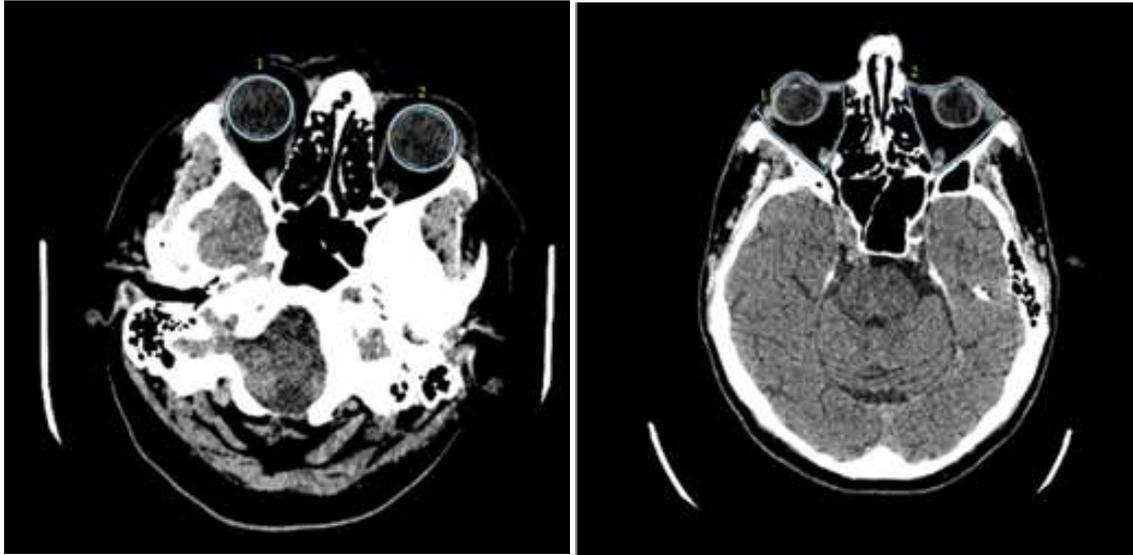


Рисунок 1 – Результат разметки исходных данных в одном слое: слева – глазные яблоки; справа – мягкотканная орбита

языка программирования Python с использованием платформы Anaconda. В качестве основных фреймворков для работы с нейронными сетями использовали Tensorflow и Keras. На основе архитектуры U-net была разработана новая архитектура нейронной сети. Обучение нейронной сети происходило со следующими параметрами: итераций на эпоху – 100, learning rate – 0,001, регуляризация – 0,0001, минимальная вероятность при детектировании – 0,95.

Количество изображений, использованных для обучения нейронной сети: снимков с биомаркерами 800, снимков глазниц 1633. Аугментация в нейронной сети осуществлялась при помощи алгоритма, заложенного в фреймворке Keras, что позволило в 20 раз увеличить наборы изображения для обучения нейронной сети (рис. 2).

Процедурная составляющая нейронной сети представлена на рисунке 2 в виде алгоритма работы нейронной сети.

В результате обучения нейронной сети была получена матрица весовых коэффициентов для каждого слоя нейронной сети, на основе которых происходила разметка глазниц в тестовых наборах данных.

Зависимости значения метрики достоверности и уровня потери данных от времени обучения нейронной сети рассчитываются по формуле (1) и отражены на рисунках 3 и 4 соответственно.

$$Accuracy = \frac{tp + tn}{tp + fp + fn + tn} \quad (1)$$

где:

Accuracy – метрика достоверности;

tp (True Positive) – истинноположительный результат. Классификатор решил, что цвет совпадает, и он совпал;

fp (False Positive) – ложноположительный результат. Классификатор решил, что цвет совпадает, но он не совпал. Это так называемая ошибка первого рода;

fn (False Negative) – ложноотрицательный результат. Классификатор решил, что цвет не совпадает, а он совпал. Это так называемая ошибка второго рода. Обычно при создании модели желательнее минимизировать ошибку второго, даже увеличив тем самым ошибку первого рода;

tn (True Negative) – истинноотрицательный результат. Классификатор решил, что цвет не совпадает, и он не совпал (рис. 4).

На рисунке 4 четко прослеживается сокращение потерь биомаркеров за время обучения нейронной сети.

Функция нейронной сети (L), необходимая для идентификации положительных принципов обучения нейронной сети, рассчитывается по формуле (2):

$$L(y, \hat{y}) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (y * \log(\hat{y}_i) + (1 - y) * \log(1 - \hat{y}_i)) \quad (2)$$

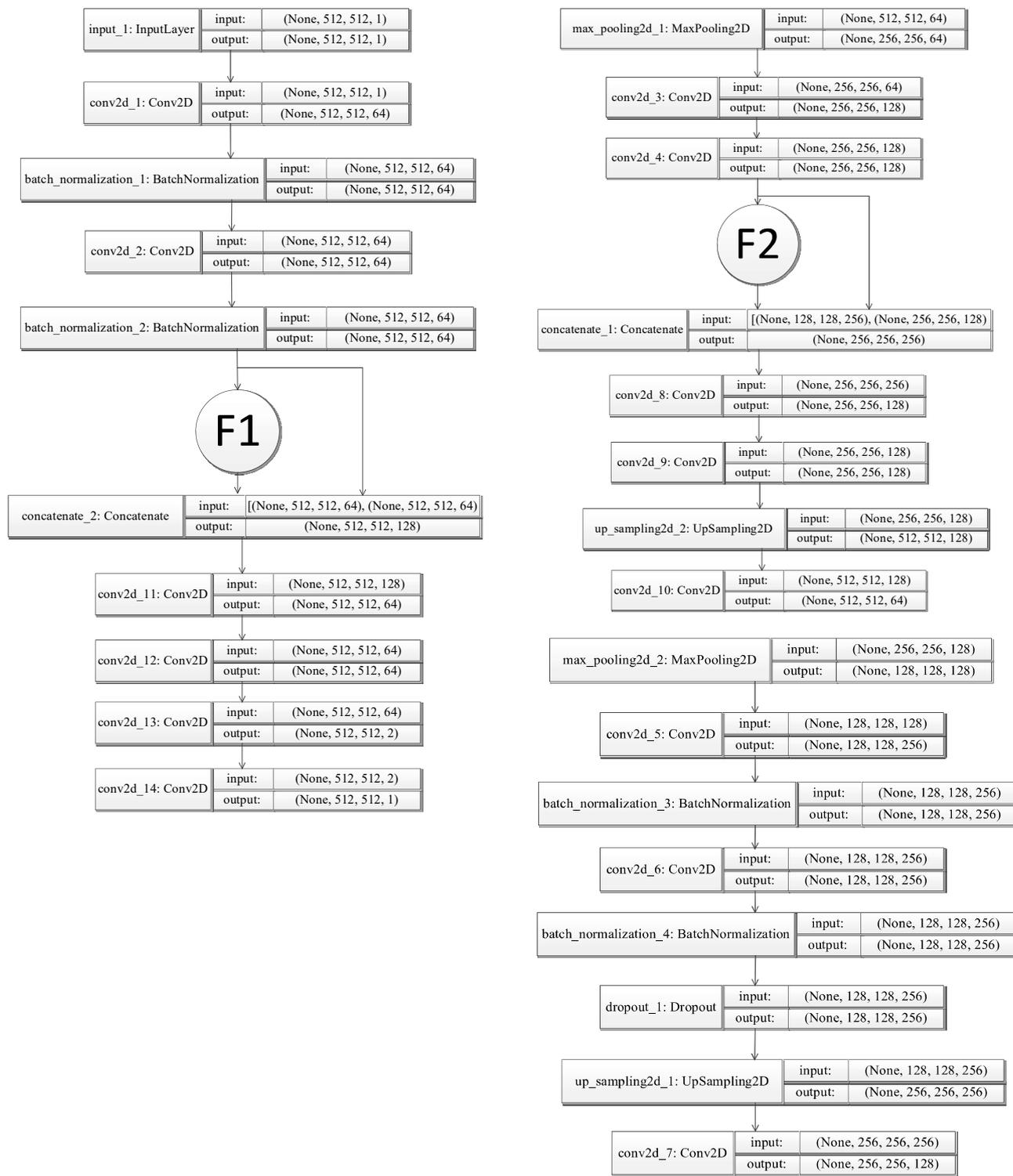


Рисунок 2 – Архитектура алгоритма работы нейронной сети

где:

y – метка класса;

y' – то что предсказывает модель;

L – loss (функция нейронной сети) необходимая для идентификации положительных принци-

пов обучения нейронной сети.

В результате обработки изображений тестовых наборов данных с использованием обученной нейронной сети получаем бинарную маску изображения (вероятности принадлежностей

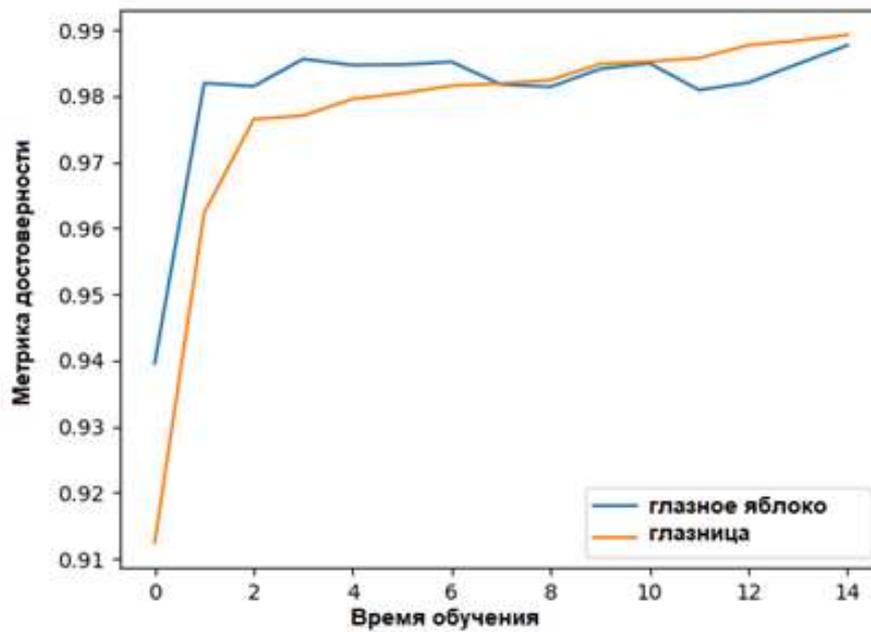


Рисунок 3 – Зависимость значения метрики достоверности от времени обучения (количества итераций)

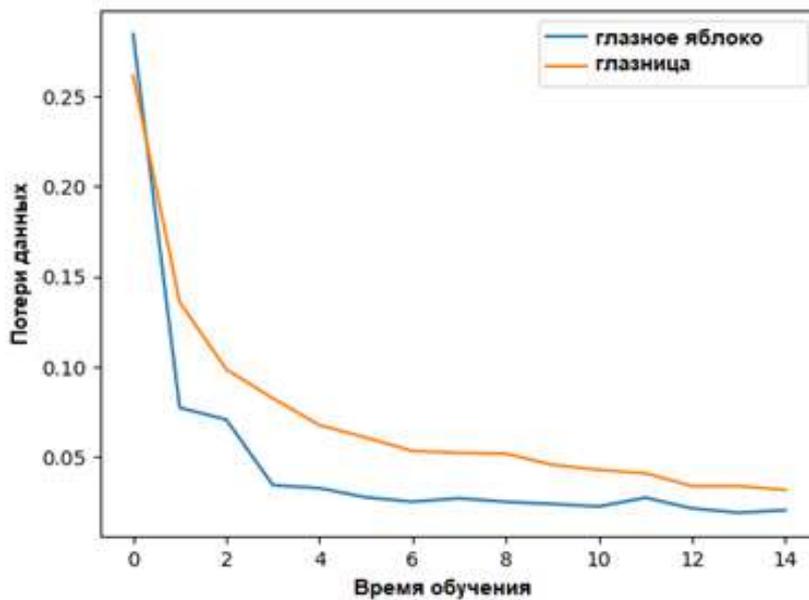


Рисунок 4 – Зависимость потерь данных от времени обучения нейронной сети (количества итераций)

к классу). На рисунках 5, 6 отражён результат поиска контуров глазных яблок, построенных нейронной сетью с использованием исходного изображения слоя, поступившего на вход программного средства.

Разработанное программное средство было использовано для оценки объёмов глазниц, дислокации и площади повреждения костей орбиты.

При этом методика работы с программным обеспечением включает в себя следующие операции:

1 – запуск программного средства.

2 – загрузка диском файлов результатов МСКТ.

Программное средство использует комплекты DICOM файлов с результатами костной (для поиска и разметки глазниц) и мягкотканной (для поиска и разметки глазных яблок) реконструкций.

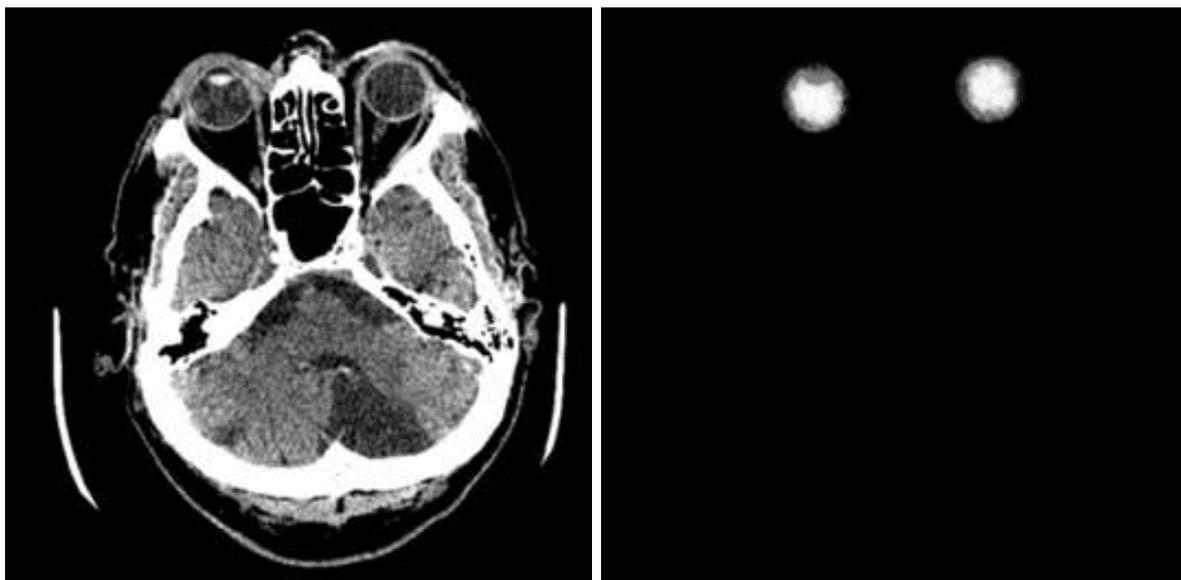


Рисунок 5 – Результат поиска глазного яблока нейронной сетью после обучения

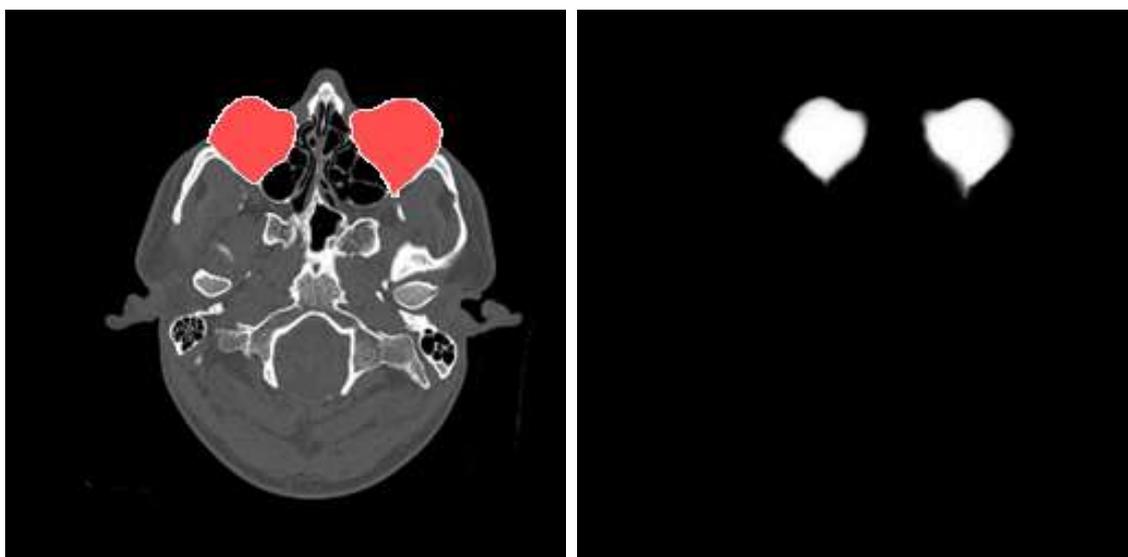


Рисунок 6 – Результат поиска глазниц нейронной сетью после обучения

На рисунке 7 отражен результат загрузки DICOM файлов костной реконструкции. В этом рабочем окне программного средства возможен просмотр костей лицевого черепа в трёх проекциях.

3 – расчёт мягкотканного и костного объёмов обеих глазниц, а также уровня дистопии травмированного глазного яблока. Запуск расчёта осуществляется путём перехода к выпадающему меню «Инструменты» и нажатия кнопки «Симптомы и объёмы». Результаты расчётов будут выведены в левой части рабочего окна (рис. 7).

4 – послойное построение рисунка повреждения костей орбиты. Запуск функции построения

повреждений осуществляется путём перехода к выпадающему меню «Инструменты» и нажатия кнопки «Работа с повреждением». В открывшемся окне (рис. 8) требуется дважды выделить область построения повреждения и ось, относительно которой будет происходить послойное отзеркаливание костной ткани здоровой орбиты в сторону травмированной с вычитанием. Дважды выделить область и ось необходимо для учёта наклона головы при сканировании: смещении вниз/вверх правой орбиты относительно левой орбиты. Один раз выделение необходимо осуществить в нижней части орбиты, зажав правую кнопку мыши, другой раз выделение необхо-

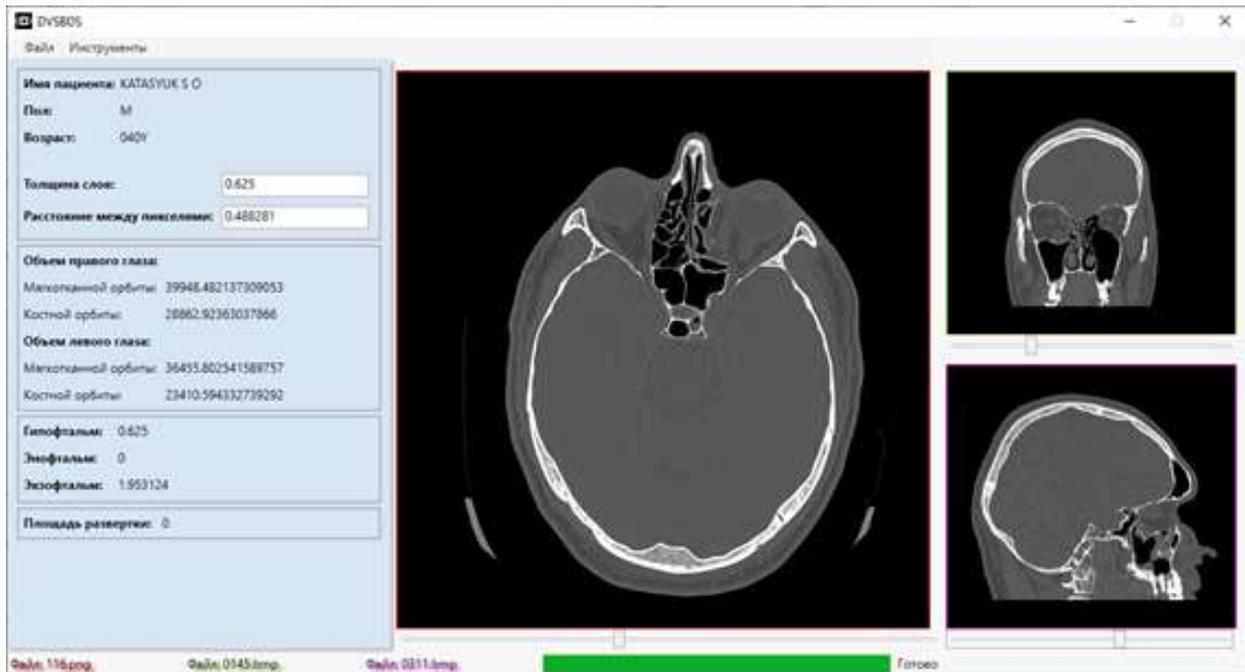


Рисунок 7 – Результат распознавания и разметки мягкотканной орбиты



Рисунок 8 – Выделение области отзеркаливания и оси симметрии

можно осуществить в верхней части орбиты, зажав левую кнопку мыши.

После выделения нужно выбрать, какая орбита будет отзеркаливаться, правая или левая и

нажать кнопку «Выполнить операцию». Результат послойного построения повреждения с выводом слоя, в котором построена линия повреждения, отражён на рисунке 9.

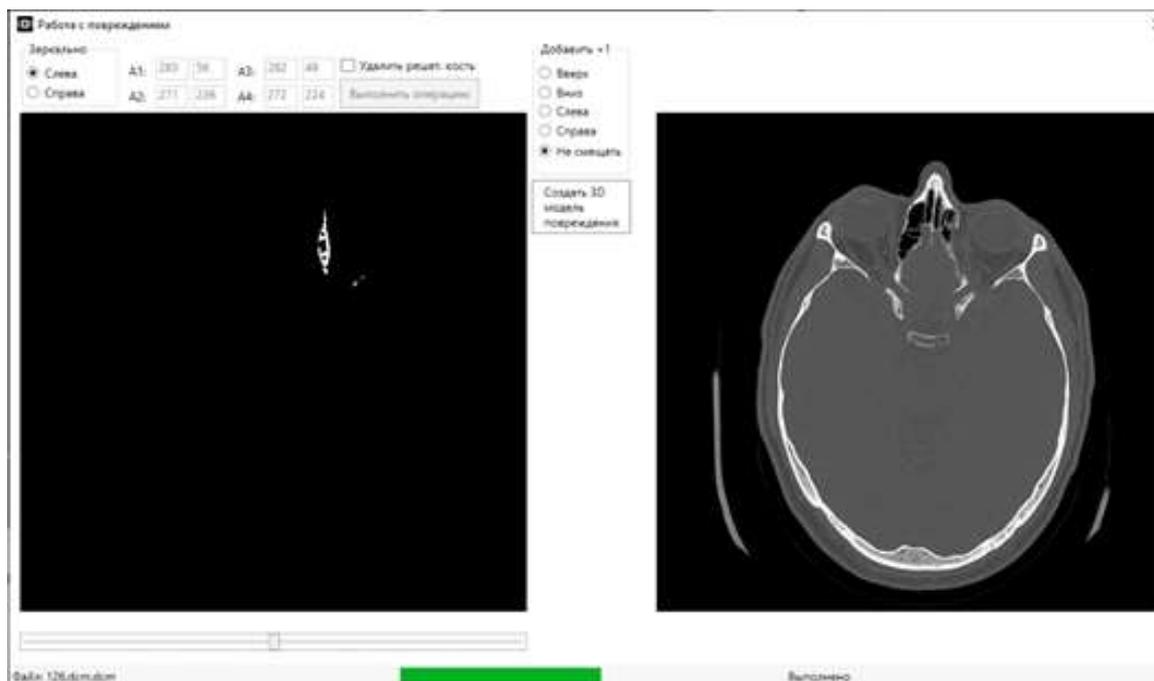


Рисунок 9 – Результат послойного отстроения повреждения путём отзеркаливания здоровой орбиты

5 – анализ результатов построения трёхмерной модели повреждения и корректировка этой модели перед построением развёртки и расчётом площади дефекта. Запуск функции анализа корректировки модели повреждения осуществляется путём перехода к выпадающему меню «Инструменты» и нажатия кнопки «Редактор модели повреждения». В окне возможно открытие трёхмерной модели костей лицевого черепа и повреждения с наложением (рис. 10). Такая функция позволяет визуально оценить правильность построения трёхмерной модели повреждения и скорректировать её с точки зрения освобождения нервных и мышечных каналов от модели повреждения, если произошло наложение. Скрыв трёхмерную модель костей лицевого черепа, можно скорректировать трёхмерную модель повреждения перед построением развёртки.

6 – расчёт площади поверхности модели повреждения.

Расчёт площади поверхности модели повреждения, использованной при формировании рисунка 10 А, составил 538,9 мм².

Для оценки результатов расчёта объёмов орбит и дистопии были проведены сравнительные расчёты. Для проверки использовались методики расчёта объёмов орбит и дистопии в ручном режиме.

Результаты расчёта объёмов орбит десяти пациентов и их дистопии приведены в таблице 1 и 2 соответственно.

При использовании ручной методики для расчёта объёма повреждённой орбиты, которая по сути использует сумму объёмов усечённых конусов, вписанных в орбиту, обнаружен следующий недостаток. В случае перелома медиальной кости орбиты при нетронутой нижней кости расчёт объёма орбиты по этой методике даёт ошибочный результат. Это связано с тем, что радиусы усечённых конусов должны быть определены по вертикальному сечению орбиты на уровне середины глазного яблока.

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

Заключение

Сравнение объема орбит, рассчитанных по результатам разметки нейронной сети, с объемами орбит, рассчитанными по результатам ручной разметки, показало, что различия не превышали 8%.

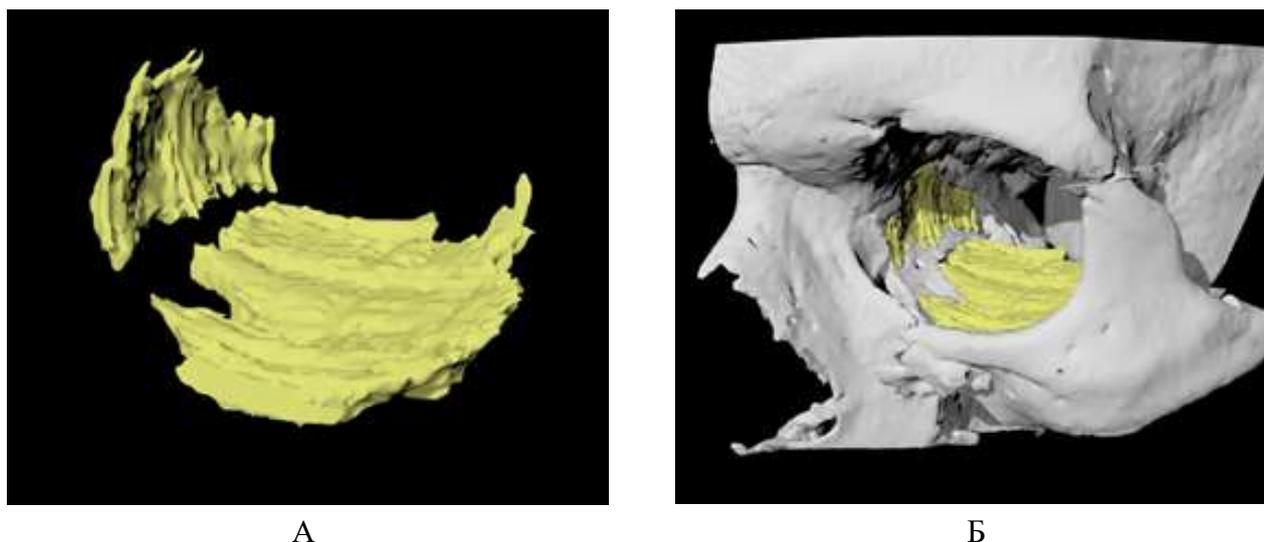


Рисунок 10 – Результат совмещения модели повреждения – А с моделью костей лицевого черепа – Б

Таблица 1 – Результаты расчёта объёма орбит

Номер пациента	Объёмы, мм ³							
	Ручная методика		Slicer		Правая глазница		Левая глазница	
	Правая глазница КО	Левая глазница КО	Правая глазница КО	Левая глазница КО	МО	КО	МО	КО
1	20978,43	19163,28	34412,25	32180,65	39804,22	21512,40	36609,90	20117,26
2	26017,34	24048,04	28866,56	23412,07	39948,48	28862,92	36455,80	23410,59
3	27347,51	32564,09	28542,32	34408,35	37045,38	28572,57	51005,91	34439,05
4	21267,17	24244,06	23668,56	25306,75	30080,93	23664,24	31534,62	25304,47
5	21526,78	30575,47	29185,25	28845,21	26592,63	23199,04	33415,89	28882,74
6	22458,147	24615,61	23258,58	28104,05	36515,87	23262,51	42167,14	28106,13
7	23742,54	27087,02	23571,98	28063,57	36035,66	23538,57	34596,42	28074,66
8	29017,04	23239,78	28970,65	24202,81	34207,94	28981,61	28263,44	24213,68
9	26358,64	21723,21	25696,70	22760,58	31666,99	25696,50	28598,14	22760,85
10	27359,35	20678,84	29978,37	21802,28	33070,76	29998,63	26316,72	21812,82

Примечание: КО – костная орбита; МО – мягкотканная орбита (объем глазничного органокомплекса).

Таблица 2 – Результат расчёта дистопии

Номер пациента	Дистопия глазного яблока, мм					
	Программное средство			Ручная методика		
	Гипофтальм	Энофтальм	Экзофтальм	Гипофтальм	Энофтальм	Экзофтальм
1	2,5	3,808	0	2,0	3,5	0
2	0,625	0	1,953	0,1	0	2,0
3	3,75	7,734	0	3,5	5	0
4	0	0	3,636	0	0	2,6
5	3,25	2,27	0	3	2,5	0
6	0,625	0	2,406	1,0	0	2,0
7	1,25	2,27	0	2,0	2,0	0
8	2,5	0	3,09	3,0	0	2,0
9	0,625	2,441	0	1,0	2,5	0
10	2,5	0	0,97	2,0	0	1,0

Примечание: КО – костная орбита; МО – мягкотканная орбита (объем глазничного органокомплекса).

Определение биомаркеров – основных элементов орбиты, на которые должна обращать свое внимание нейросеть, – один из определяющих моментов в обучении нейросети. От точности и правильности выбора биомаркеров зависят дальнейшие возможности ИИ правильно их оценивать и интерпретировать. Основными биомаркерами были выбраны: костные структуры орбиты, глазное яблоко, экстраокулярные мышцы и смещенная ретробульбарная клетчатка.

Разработанное программное средство на основе сверточных нейронных сетей показало хорошие результаты по автоматическому расчету основных анатомо-топографических параметров глазницы и может использоваться в клинической практике.

Литература

1. Рентгеновская компьютерная томография для оценки эффективности хирургической реконструкции посттравматических дефектов и деформаций глазницы / О. В. Левченко [и др.] // *Нейрохирургия*. 2014. № 1. С. 29–33.
2. Левченко, О. В. Безрамная навигационная система для хирургического лечения посттравматических дефектов и краниоорбитальных деформаций / О. В. Левченко, В. М. Михайлюков, Д. В. Давыдов // *Нейрохирургия*. 2013. № 3. С. 9–14. doi: 10.17650/1683-3295-2013-0-3-9-14
3. Давыдов, Д. В. МСКТ-диагностика и планирование хирургического лечения при травмах и посттравматических деформациях стенок глазниц / Д. В. Давыдов, Д. А. Лежнев, Д. И. Костенко // *Доктор.Ру. Гастроэнтерология*. 2016. № 1. С. 116–120.
4. Стучилов, В. А. Оптимизация диагностики и хирургического лечения больных при переломах глазницы : пособие для врачей / В. А. Стучилов, А. А. Никитин. Москва,

2015. 36 с.
5. Масалитина, Н. Н. Применение автоматизированного классификатора результатов компьютерной томографии для построения геометрической модели позвонка человека / Н. Н. Масалитина, К. С. Курочка // *Докл. БГУИР*. 2017. Т. 105, № 3. С. 12–19.
6. Пластина Рыбальченко для реконструкции повреждённых костных структур скулоглазничноверхнечелюстного комплекса и способ реконструкции повреждённых костных структур скулоглазничноверхнечелюстного комплекса с её использованием : пат. 2202302 Рос. Федерация : МПК А 61 В 17/80, А 61 В 17/56, А 61 F 2/28 / Рыбальченко Г. Н. ; заявитель и патентообладатель Закрытое акционер. о-во «КОНМЕТ Инкорпорейтед». № 2000125015/14 ; заявл. 04.10.00 ; опубл. 20.04.03.
7. Способ изготовления индивидуализированного прецизионного имплантата для восполнения сложного субтотального полиоссального дефекта глазницы : пат. 2164392 Рос. Федерация : МПК А 61 F 2/28 / Шалумов А.-С. З. № 2000116451/14 ; заявл. 27.06.00 ; опубл. 27.03.01.
8. The DICOM Standard is managed by the Medical Imaging & Technology Alliance – a division of the National Electrical Manufacturers Association [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.dicomstandard.org/current/>. Date of access: 21.08.2024.
9. Path Aggregation Network for Instance Segmentation [Electronic resource] / S. Liu [et al.] Mode of access: <https://arxiv.org/pdf/1803.01534>. Date of access: 21.08.2024.
10. Mask R-CNN – Inspect Weights of a Trained Model [Electronic resource]. Mode of access: https://github.com/matterport/Mask_RCNN/blob/master/samples/coco/inspect_weights.ipynb. Date of access: 21.08.2024.
11. Использование нейронных сетей в обработке медицинских изображений / А. А. Каракулько [и др.] // *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. Ч. 1 / редкол.: В. А. Богуш [и др.]. Минск : Бестпринт, 2020. С. 294–302. Каракулько, А. А. Медведев, О. С. Мороз, П. А. Дудич, О. Н. Красильникова, В. Л. Осипович, В. С. Яшин, К. Д.*

Поступила 20.06.2024 г.

Принята в печать 28.08.2024 г.

References

1. Levchenko OV, Krylov VV, Davydov DV, Lezhnev DA, Mikhaylyukov VM, Sharifullin FA, i dr. X-ray computed tomography to evaluate the effectiveness of surgical reconstruction of posttraumatic ocular defects and deformities. *Neirokhirurgiya*. 2014;(1):29-33. (In Russ.)
2. Levchenko OV, Mikhaylyukov VM, Davydov DV. Frameless navigation system for surgical treatment of posttraumatic defects and cranio-orbital deformities. *Neirokhirurgiya*. 2013;(3):9-14. (In Russ.). doi: 10.17650/1683-3295-2013-0-3-9-14
3. Davydov DV, Lezhnev DA, Kostenko DI. MSCT diagnosis and planning of surgical treatment in traumas and posttraumatic deformations of ocular walls. *DoktorRu. Gastroenterologiya*. 2016;(1):116-20. (In Russ.)
4. Stuchilov VA, Nikitin AA. Optimization of diagnostics and surgical treatment of patients with fractures of the eye socket: posobie dlya vrachei. Moscow, RF; 2015. 36 p. (In Russ.)
5. Masalitina NN, Kurochka KS. Application of an automated classifier of computed tomography results to construct a geometric model of the human vertebrae. *Dokl BGUIR*. 2017;105(3):12-9. (In Russ.)
6. Rybalchenko GN; zayavitel' i patentoobladatel' Zakrytoe aktsioner o-vo «KONMET Inkorporeited». Rybalchenko plate for reconstruction of damaged bone structures of the zygomaticomandibular complex and method of reconstruction of damaged bone structures of the zygomaticomandibular complex with its use: pat 2202302 Ros Federatsiya: MPK A 61 B 17/80, A 61 B 17/56, A 61 F 2/28. № 2000125015/14; zayavl 04.10.00; opubl 20.04.03. (In Russ.)
7. Shalumov A-SZ. Method of manufacturing an individualized precision implant for replenishment of complex subtotal polyosseous ocular defect: pat 2164392 Ros Federatsiya: MPK A 61 F 2/28. № 2000116451/14; zayavl 27.06.00;

- opubl 27.03.01. (In Russ.)
8. The DICOM Standard is managed by the Medical Imaging & Technology Alliance – a division of the National Electrical Manufacturers Association [Internet]. Available from: <https://www.dicomstandard.org/current/>. [Accessed 21th August 2024].
 9. Liu S, Qi L, Qin H, Shi J, Jia J. Path Aggregation Network for Instance Segmentation [Internet]. Available from: <https://arxiv.org/pdf/1803.01534>. [Accessed 21th August 2024].
 10. Mask R-CNN – Inspect Weights of a Trained Model [Internet]. Available from: https://github.com/matterport/Mask_RCNN/blob/master/samples/coco/inspect_weights.ipynb. [Accessed 21th August 2024].
 11. Karakulko AA, Medvedev OS, Moroz PA, Dudich ON, Krasilnikova VL, Osipovich VS, i dr. The use of neural networks in medical image processing. V: Bogush VA, i dr, redkol. BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA i analiz vysokogo urovnya: sb materialov VI Mezhdunar nauch-prakt konf, Minsk, 20-21 maya 2020 g: v 3 ch. Ch 1. Minsk, RB: Bestprint; 2020. P. 294-302. (In Russ.)

Submitted 20.06.2024

Accepted 28.08.2024

Сведения об авторах:

О.Н. Дудич – к.м.н., доцент кафедры офтальмологии, Институт повышения квалификации и переподготовки кадров в здравоохранении УО «Белорусский государственный медицинский университет», <https://orcid.org/0009-0004-6554-3230>,

e-mail: oksana_s20@mail.tu – Дудич Оксана Николаевна;

В.С. Осипович – к.т.н., доцент кафедры инженерной психологии и эргономики, Белорусский государственный институт информатики и радиоэлектроники, <https://orcid.org/0000-0001-9658-2866>;

В.Л. Красильникова – д.м.н., профессор кафедры офтальмологии, Институт повышения квалификации и переподготовки кадров в здравоохранении УО «Белорусский государственный медицинский университет», <https://orcid.org/0000-0002-5852-2616>.

Information about authors:

O.N. Dudich – Candidate of Medical Sciences, associate professor of the Chair of Ophthalmology, the Institute for Advanced Training and Retraining of Healthcare Personnel of the Educational Institution “Belarusian State Medical University”, <https://orcid.org/0009-0004-6554-3230>,

e-mail: oksana_s20@mail.tu – Oksana N. Dudich;

V.S. Osipovich – Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Chair of Engineering Psychology and Ergonomics, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, <https://orcid.org/0000-0001-9658-2866>;

V.L. Krasilnikova – Doctor of Medical Sciences, professor of the Chair of Ophthalmology, the Institute for Advanced Training and Retraining of Healthcare Personnel of the Educational Institution “Belarusian State Medical University”, <https://orcid.org/0000-0002-5852-2616>.