



Использование трехмерных сверточных нейронных сетей для выявления интракраниальных аневризм по данным КТ-ангиографии брахиоцефальных артерий

©Е.И. Зяблова^{1,2*}, С.Г. Сеница³, И.А. Заяц³, А.А. Халафян³, Д.О. Кардаильская^{1,2}, В.А. Порханов^{1,2}

¹ Научно-исследовательский институт – Краевая клиническая больница № 1 им. проф. С.В. Очаповского, Краснодар, Россия

² Кубанский государственный медицинский университет, Краснодар, Россия

³ Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

* Е.И. Зяблова, НИИ – ККБ № 1 им. проф. С.В. Очаповского, 350086, Краснодар, ул. 1 Мая, 167, elenazyablova@inbox.ru

Поступила в редакцию: 30 января 2023 г. Исправлена 24 февраля 2023 г. Принята к печати: 5 марта 2023 г.

Резюме

Актуальность: Компьютерно-томографическая ангиография (КТА) является первичным, минимально инвазивным методом визуализации, который проводится с целью диагностики, наблюдения и предоперационного планирования тактики лечения внутричерепных аневризм, однако интерпретация занимает много времени даже у опытных нейрорадиологов. Могут ли обученные нейронные сети повысить производительность врачей при интерпретации медицинских изображений и сократить время постановки диагноза? Насколько эффективна нейронная сеть в выявлении интракраниальных аневризм по данным КТА? На сегодняшний день исследований, посвященных данной теме, крайне мало.

Цель: Оценить диагностическую ценность созданного прототипа сверточной нейронной сети в выявлении интракраниальных аневризм по данным компьютерно-томографической ангиографии брахиоцефальных артерий (БЦА).

Материалы и методы: Исследован прототип трехмерной сверточной нейронной сети, созданный на базе Кубанского государственного университета (г. Краснодар), который определяет вероятность наличия интракраниальных аневризм по данным КТА БЦА. В исследовании проанализированы результаты 451 КТ-ангиографии, выполненной в рентгеновском отделении НИИ – ККБ № 1 им. проф. С.В. Очаповского (г. Краснодар), из которых 205 были с подтвержденными аневризмами интракраниальных артерий и 246 – без аневризм.

Результаты: Чувствительность прототипа трехсверточной нейронной сети в обнаружении аневризм по данным КТА БЦА составила 85,1%, специфичность – 95,1%, общая точность – 91%.

Выводы: Использование трехмерных сверточных систем в диагностике позволяет не только с высокой точностью предсказывать наличие аневризм, но и безошибочно их локализовать в более 90% случаев. Получение таких результатов требует подготовки набора данных большего объема.

Ключевые слова: компьютерная томография, КТ-ангиография, интракраниальные аневризмы, DICOM, машинное обучение, сверточная нейронная сеть

Цитировать: Зяблова Е.И., Сеница С.Г., Заяц И.А., Халафян А.А., Кардаильская Д.О., Порханов В.А. Использование трехмерных сверточных нейронных сетей для выявления интракраниальных аневризм по данным КТ-ангиографии брахиоцефальных артерий. *Инновационная медицина Кубани*. 2023;(2):21–27. <https://doi.org/10.35401/2541-9897-2023-26-2-21-27>

3D Convolutional Neural Networks for Detecting Intracranial Aneurysms on Brachiocephalic Arteries CTA Scans

©Elena I. Zablova^{1,2*}, Sergey G. Sinita³, Ilya A. Zayats³, Alexan A. Khalafyan³, Daria O. Kardailskaya^{1,2}, Vladimir A. Porhanov^{1,2}

¹ Scientific Research Institute – Ochapovsky Regional Clinical Hospital No. 1, Krasnodar, Russian Federation

² Kuban State Medical University, Krasnodar, Russian Federation

³ Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation

* Elena I. Zablova, Scientific Research Institute – Ochapovsky Regional Clinical Hospital No. 1, ulitsa 1 Maya 167, Krasnodar, 350086, Russian Federation, elenazyablova@inbox.ru

Received: January 30, 2023. Received in revised form: February 24, 2023. Accepted: March 5, 2023.

Abstract

Background: Computed tomography angiography (CTA) is the primary and minimally invasive imaging modality currently used for diagnosis and monitoring of intracranial aneurysms as well as preoperative planning of their treatment. However, its interpretation is time-consuming even for specially trained neuroradiologists. Nowadays little is known whether trained neural networks contribute to analyzing medical images and reduce the time to diagnosis, and how effective they are in detecting intracranial aneurysms according to the CTA findings.



Objective: To assess the diagnostic value of a convolutional neural network prototype in the intracranial aneurysm detection according to the brachiocephalic arteries CTA findings.

Materials and methods: We analyzed the 3D convolutional neural network prototype based at Kuban State University (Krasnodar, Russian Federation). This prototype was to determine the probability of intracranial aneurysms according to the brachiocephalic arteries CTA findings, obtained in the Radiology Department of Scientific Research Institute – Ochapovsky Regional Clinical Hospital No. 1. The study included 451 CTA scans of 205 patients with confirmed intracranial aneurysms and 246 patients without aneurysms.

Results: The sensitivity of the 3D convolutional neural network prototype in the aneurysms detection according to the brachiocephalic arteries CTA findings was 85.1%, the specificity was 95.1%, and the overall accuracy was 91%.

Conclusions: The 3D convolutional systems may predict aneurysms with a high accuracy as well as localize them with an accuracy of more than 90%. Such results require a larger dataset.

Keywords: computed tomography, CTA, intracranial aneurysms, DICOM, machine learning, high-accuracy neural network

Cite this article as: Zyablova EI, Sinitsa SG, Zayats IA, Khalafyan AA, Kardailskaya DO, Porhanov VA. 3D convolutional neural networks for detecting intracranial aneurysms on brachiocephalic arteries CTA scans. *Innovative Medicine of Kuban*. 2023;(2):21–27. <https://doi.org/10.35401/2541-9897-2023-26-2-21-27>

Введение

Диагностика неразрывавшихся аневризм является критически важной клинической задачей: внутричерепные аневризмы встречаются у 1–3% населения и составляют более 80% нетравматических, угрожающих жизни субарахноидальных кровоизлияний (нСАК) [1]. В настоящее время компьютерно-томографическая ангиография (КТА) является первичным, минимально инвазивным методом визуализации для диагностики, наблюдения и предоперационного планирования внутричерепных аневризм, однако интерпретация занимает много времени даже у опытных нейрорадиологов [2, 3]. Низкая межэкспертная согласованность представляет собой дополнительную проблему для достоверной диагностики [4–7].

Сверхточные нейронные сети продемонстрировали превосходную производительность в ряде визуализационных задач, включая анализ медицинских изображений [8, 9]. Более того, возможности систем машинного обучения для расширения рабочего процесса врача-рентгенолога остаются относительно неизученными [10]. Разработка точной модели машинного обучения для правильной индетификации клинически значимых аневризм при КТ-ангиографии поможет радиологам, нейрохирургам и другим клиницистам пользоваться легкодоступным инструментом диагностической поддержки.

В помощь врачам-рентгенологам нами была разработана модель глубокого обучения для автоматического обнаружения и интерпретации КТ-ангиографических исследований интракраниальных аневризм (ИА). Определены чувствительность, специфичность, точность улучшенной модели нейронной сети в сравнении с интраоперационными данными.

Несмотря на отсутствие повсеместного применения данных систем на практике, эта область быстро развивается и в будущем может занять свою нишу в диагностике ИА и нСАК.

Цель исследования

Разработать и применить модель искусственной сверточной нейронной сети, способной генерировать

точные прогнозы наличия внутричерепных аневризм по данным КТА брахиоцефальных артерий (БЦА). Оценить диагностическую точность полученной модели.

Материалы и методы

На базе ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет» (г. Краснодар) создан прототип трехмерной сверточной нейронной сети, основной функцией которого является определение вероятности наличия интракраниальных аневризм по данным КТА БЦА. Для создания и тестирования прототипа были использованы КТ-ангиографии в формате DICOM, выполненные в рентгеновском отделении ГБУЗ «НИИ – Краевая клиническая больница № 1 им. проф. С.В. Очаповского» (г. Краснодар).

Дизайн исследования представлен на рисунке 1.

Критерии включения КТА БЦА пациентов в исследование:

- возраст старше 18 лет;
- пациенты с острым нСАК, причиной которого являлся разрыв ИА;
- пациенты с ИА в догеморрагическом периоде;
- пациенты в предоперационном периоде.

Критерии исключения:

- возраст менее 18 лет;
- ранее оперированные интракраниальные аневризмы (клипирование, стентирование, эмболизация);
- аневризмы, связанные с артериовенозными мальформациями или болезнью Мойя-Мойя.

Исследования были выполнены на аппаратах Siemens и GE по единому протоколу, который включал сканирование головы и шеи для визуализации интракраниальных артерий и экстракраниальных отделов сонных и позвоночных артерий. Контрастный препарат (с концентрацией йода 350 мг/мл) вводился через периферический венозный катетер (размер 18G), соединяющийся с помощью шприца-инжектора Ульрих. Скорость введения контрастного препарата – 5 мл/с, объем – 50–70 мл.

Толщина среза при сканировании на аппарате Siemens составляла 0,75 мм, питч – 0,7 мм; на аппарате GE – 1,25 мм, питч – 1,25 мм.

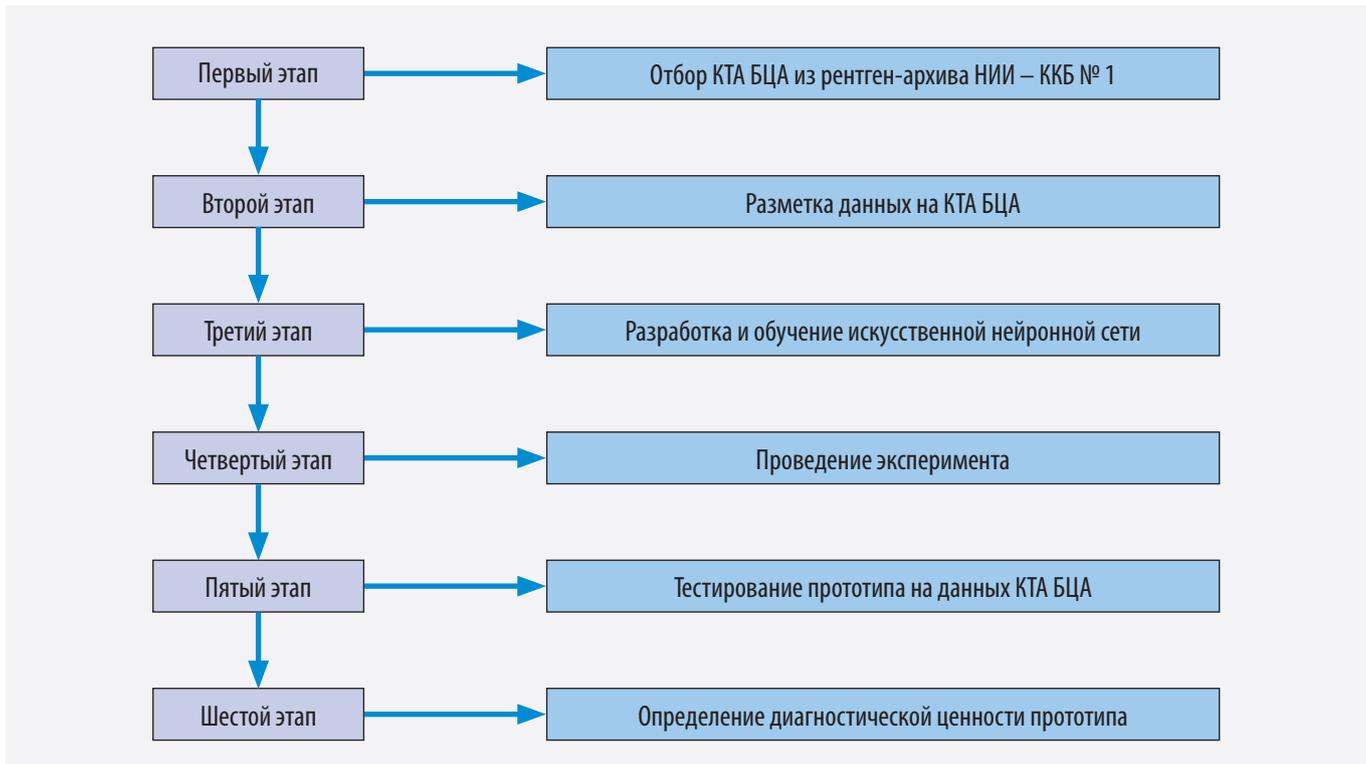


Рисунок 1. Схема дизайна исследования
Figure 1. Study design scheme

Классификация выполнялась с помощью методов машинного обучения с применением искусственных трехмерных сверточных нейронных сетей [11, 12]. Создание и тестирование прототипа проводилось в следующем порядке:

- сбор и разметка данных на КТА;
- подготовка данных;
- разработка и обучение искусственной нейронной сети;
- проведение эксперимента.

На этапе сборки и разметки данных врачи-рентгенологи НИИ – ККБ № 1 подготовили набор данных (датасет) из 206 КТА БЦА пациентов с интракраниальными аневризмами (подтвержденными интраоперационно или с помощью церебральной ангиографии). Регионы интереса с аневризмами были размечены овалами в программе OsiriX DICOM Viewer. Дополнительно для создания и тестирования прототипа были использованы также 250 КТА БЦА пациентов с атеросклерозом БЦА, у которых аневризмы отсутствовали.

Таким образом, текущий набор данных (датасет) представлял собой 456 исследований, каждый слой которого хранится в формате DICOM.

На этапе подготовки данных исходный набор данных КТА БЦА был преобразован в формат Nifti с помощью библиотеки dicom2nifti для дальнейшего использования при машинном обучении.

Для извлечения информации о размеченных регионах интереса с аневризмами была написана программа

на языке C++ с библиотеками Qt6 и DCMTK (OFFIS DCM Tool Kit). В результате был сформирован текстовый файл с информацией о кадрах и координатах размеченных аневризм.

Каждый КТ скан в исследованиях содержит необработанную интенсивность вокселей в единицах Хаунсфилда (HU) от -1000 HU до более чем 2000 HU. Костям разной плотности соответствует 400 HU и более, поэтому это значение было использовано как верхняя граница. Для нормализации КТ сканов был выбран интервал от -1000 HU до 400 HU. Данные прошли следующую предварительную обработку:

1. Зафиксирована ориентация объемов поворотом на 90 градусов.
2. Промасштабированы значения HU от 0 до 1 в выбранном интервале.
3. Уменьшена размерность данных до ширины, высоты и глубины 128 , 128 и 64 вокселей соответственно.

На каждой итерации обучения (эпохе) из 456 исследований было случайным образом отобрано 100 исследований. Набор данных был разделен на тренировочный и проверочный подмножества в пропорции 70 на 30 соответственно.

Для увеличения количества примеров обучения тренировочный набор данных был подвергнут аугментации. Дополнительные данные были сформированы из исходных поворотом на случайный угол -20 , -10 , -5 , $+5$, $+10$ или $+20$ градусов.

На этапе разработки и обучения искусственной нейронной сети была создана модель трехмерной сверточной нейронной сети с размерностью $128 \times 128 \times 64$. Для реализации использованы библиотеки Keras и Tensorflow, язык программирования Python. Модель нейронной сети состояла из 4-х слоев свертки с ядром размерности 3, функцией максимального пулинга и функцией активации ReLU. Для классификации использовался полносвязный слой с 512 выходами, функцией активации ReLU, Dropout 0.3, а затем полносвязный слой с одним выходом и функцией активации sigmoid.

На этапе эксперимента обучение проводилось в 100 эпох (итераций). Валидация осуществлялась в конце каждой итерации обучения. Полученные в ходе обучения веса сети были сохранены в бинарный файл для получения прогнозов. По завершению обучения были рассчитаны метрики Точности (*Precision*) и Полноты (*Recall*) классификации.

$$Precision = TP / (TP + FP)$$

$$Recall = TP / (TP + FN), \text{ где}$$

TP – истинно-положительные решения;

FP – ложноположительные решения;

FN – ложноотрицательные решения.

Вероятность наличия как минимум одной аневризмы по данным КТА БЦА прототип выдавал в процентах от 0 до 100, по вероятности ответы разделили на 3 группы: высокая вероятность (71–100%), средняя вероятность (51–70%), низкая вероятность (1–50%).

Решение считалось истинно положительным, если для исследования с аневризмами нейросеть предсказывала вероятность 71% и более. Решение считалось ложноположительным, если для исследования без аневризм нейросеть предсказывала вероятность 71% и более. Решение считалось ложноотрицательным, если для исследования с аневризмами нейросеть предсказывала вероятность менее 70%.

Ответ прототипа сравнивали с данными лучевой диагностики (КТА БЦА и церебральная ангиография), а также с интраоперационными данными (микрохирургическое клипирование). Диагностическую точность определяли по ответам прототипа в группе пациентов с одиночными аневризмами и без аневризм.

Полученные результаты

В результате исследования получен прототип нейронной сети по данным 451 КТА БЦА. Среди изученных ангиографий 44,5% (205 пациентов) были с аневризмами, 55,5% (246 пациентов) – без аневризм. При этом у 141 пациента выявлены одиночные аневризмы, а у 64 – множественные (от 2 до 8 аневризм).

Среди пациентов со множественными аневризмами: у 55 – определялось по 2 аневризме, у 5 – по 3, у 4 – по 4, у 1 пациента – 8.

С интактными аневризмами в догеморрагическом периоде было 26 пациентов (13%), остальные 180 (87%) – с острым нСАК в результате разрыва аневризмы (рис. 3).

Аневризмы разделили по размерам на 3 группы: до 3 мм (миллиарные), от 3 до 5 мм и более 5 мм. Количество аневризм размерами до 3 мм составило 32, от 3 до 5 мм – 126, более 5 мм – 133.

По локализации аневризмы распределились следующим образом: самое большое количество аневризм наблюдали в СМА ($n = 118$), ПСоА ($n = 81$) и ВСА ($n = 52$), в 13 случаях аневризмы наблюдали в ЗСоА и 11 – в ОА. Количество случаев аневризм в ПКА,

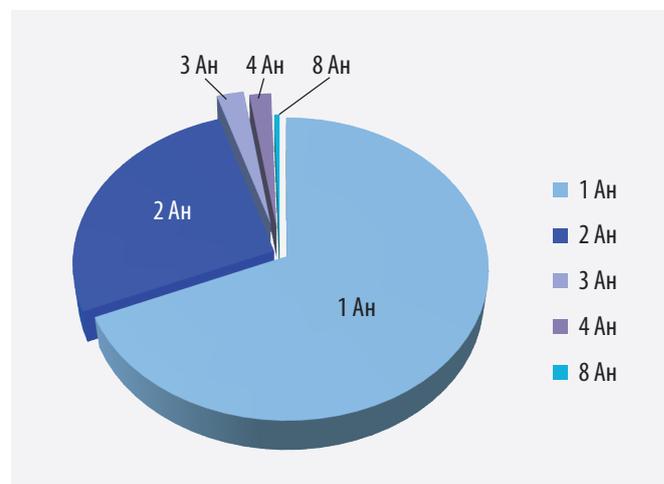


Рисунок 2. Распределение пациентов по количеству интракраниальных аневризм

Figure 2. Distribution of patients by the number of intracranial aneurysms



Рисунок 3. Количество пациентов с острым нСАК и аневризмами в догеморрагическом периоде

Figure 3. Number of patients with spontaneous SAH and pre-hemorrhagic aneurysms

ЗНМА, ЗМА, ПМА, ВМА и ПА составляло от 3 до 6. Частота выявления аневризм по артериям представлена в таблице 1.

Таблица 1

Локализация интракраниальных аневризм по артериям

Table 1

Distribution of intracranial aneurysms according to arteries

Артерия	Количество аневризм (n)	Частота встречаемости, %
СМА	118	39,3
ПСоА	81	27
ВСА	52	17,3
ЗСоА	13	4,3
ОА	11	3,7
ПКА	5	1,7
ЗНМА	2	0,7
ЗМА	4	1,3
ПМА	6	2
ВМА	5	1,7
ПА	3	1

Прим.: СМА – средняя мозговая артерия, ПСоА – передняя соединительная артерия, ВСА – внутренняя сонная артерия, ЗСоА – задняя соединительная артерия, ОА – основная артерия, ПКА – перикаллезная артерия, ЗНМА – задняя нижняя мозжечковая артерия, ЗМА – задняя мозговая артерия, ПМА – передняя мозговая артерия, ВМА – верхняя мозжечковая артерия, ПА – позвоночная артерия

Note: СМА – middle cerebral artery, ПСоА – anterior communicating artery, ВСА – internal carotid artery, ЗСоА – posterior communicating artery, ОА – basilar artery, ПКА – pericallosal artery, ЗНМА – posterior inferior cerebellar artery, ЗМА – posterior cerebral artery, ПМА – anterior cerebral artery, ВМА – superior cerebellar artery, ПА – vertebral artery

В результате эксперимента были получены следующие значения:

$$TP = 183; FP = 18; FN = 25$$

$$Precision = \frac{183}{183 + 18} = \frac{183}{201} \approx 0,91$$

$$Recall = \frac{183}{183 + 25} = \frac{183}{208} \approx 0,879$$

Эксперимент показал значения полноты и точности классификации – 91 и 88% соответственно.

При анализе ответов искусственного интеллекта (ИИ) у пациентов со множественными аневризмами (подтвержденными интраоперационно), ИИ во всех случаях указал на наличие как минимум 1-й аневризмы с вероятностью от 51 до 100%: 4 случая со средней вероятностью от 51 до 70% и 60 случаев с высокой вероятностью – от 71 до 100%.

У пациентов с единичными аневризмами (подтвержденными интраоперационно) высокая вероят-

ность наличия аневризм составила 120 случаев, средняя – 10, низкая – 11.

При сравнении ответов ИИ и описаний врача-рентгенолога, искусственный интеллект дал высокую вероятность наличия аневризм у 4-х из 5 пациентов, у которых рентгенолог пропустил миллиарные аневризмы.

В 8 случаях ИИ указал на низкую вероятность наличия ИА у пациентов с одиночными аневризмами (описанными на КТ и подтвержденными интраоперационно). Среди пропущенных ИА локализации были следующими: 4 – в ПСоА, 2 – СМА, 1 – ПМА, 1 – ПА. В 3-х случаях из 8 – это были неразорвавшиеся аневризмы. В 7 случаях они были выявлены при первичном описании и при втором чтении, 5 – разорвавшиеся, на фоне массивного паренхиматозного и внутрижелудочкового кровоизлияний.

ИИ дал 12 ложноположительных результатов среди пациентов без ИА.

На основании полученных данных чувствительность прототипа нейронной сети составила 85,1% (доверительный интервал 78–90%), специфичность – 95,1% (ДИ 88–94%), общая точность – 91%.

Обсуждение

Учитывая потенциальный катастрофический исход пропущенной аневризмы, особенно в период ее разрыва, желательно иметь автоматизированный инструмент обнаружения, который надежно выявляет и повышает эффективность работы врачей. Разрыв аневризмы приводит к летальному исходу у 40% пациентов и необратимой неврологической инвалидности у 2/3 выживших, поэтому точное и своевременное обнаружение имеет первостепенное значение [13]. В дополнение к значительному повышению точности при интерпретации КТ-ангиограмм, автоматический инструмент обнаружения аневризм, такой как представленный в этом исследовании, потенциально приводит к сокращению времени лечения и более благоприятным результатам. Следовательно, такое дополнение врачам с разным уровнем опыта и специальностей в виде данной улучшенной модели может привести к более точным и последовательным рентгенологическим интерпретациям.

В настоящее время для улучшения визуализации аневризм при работе с КТ-ангиограммами используются трехмерная визуализация сосудистой сети и исключение костных структур, которые основаны на применении настроек контрастного порога [14–17].

Наши результаты показывают, что прототип нейронной сети имеет высокие показатели чувствительности, специфичности и общей точности (85,1, 95,1 и 91% соответственно) в выявлении церебральных аневризм с помощью КТ-ангиографии. Представленная модель сможет расширить возможности клиницистов и улучшить их диагностические возможности.

Данное исследование также имеет и ограничения: во-первых, сосредоточено только на аневризмах в предоперационном периоде. Эффективность модели при обнаружении аневризмы после рецидива поражения после спирального или хирургического клипирования или аневризм, связанных с артерио-венозными мальформациями, не исследовалась. Во-вторых, поскольку исследования, содержащие хирургическое оборудование или устройства, были исключены, эффективность модели при их наличии неизвестна. В клинических условиях КТ-ангиография обычно используется не только для выявления аневризм, но и для оценки многих типов сосудистых заболеваний. Таким образом, высокая распространенность аневризм в наборе тестов и бинарная задача врача могли внести погрешность в интерпретацию. Кроме того, это исследование проводилось в одном лечебном учреждении с использованием сканеров только двух производителей и может не отражать эффективность при применении относительно данных из других учреждений с другими сканерами и протоколами визуализации.

Заключение

В ходе исследования был получен прототип трехмерной сверточной нейронной сети, позволяющий автоматически определять вероятность наличия интракраниальных аневризм по данным КТА БЦА ангиографии. Нами обнаружено, что данная модель имеет высокую диагностическую точность. Будущая работа должна исследовать влияние прототипа на повышение чувствительности описания врачей, точности и межэкспертной надежности, а также эффективности этой модели при применении данных из других специализированных сосудистых учреждений и больниц, где ИА встречаются реже.

Возможно также совершенствование прототипа за счет увеличения объема данных для обучения, а также постановки новых задач с последующим обучением отдельных нейросетей: разделение аневризм на разорвавшиеся и не разорвавшиеся, одиночные и множественные, уточнение локализации ИА.

Литература/References

1. Зяблова Е.И., Ачмиз Н.З., Ткачев В.В., Порханов В.А. КТ-ангиография брахиоцефальных артерий при неотложной диагностике разрыва аневризм головного мозга. *Российский электронный журнал лучевой диагностики*. 2022;12(2):65–73. <https://doi.org/10.21569/2222-7415-2022-12-2-65-73>
2. Zhablova EI, Achmiz NZ, Tkachev VV, Porhanov VA. Cerebrovascular CT-angiography in the emergency diagnostics of ruptured cerebral aneurysms. *Russian Electronic Journal of Radiology*. 2022;12(2):65–73. (In Russ.). <https://doi.org/10.21569/2222-7415-2022-12-2-65-73>
3. Turan N, Heider RA, Roy AK, et al. Current perspectives in imaging modalities for the assessment of unruptured intracranial aneurysms: a comparative analysis and review. *World Neurosurg*.

- 2018;113:280–292. PMID: 29360591. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2018.01.054>
4. Yoon NK, McNally S, Taussky P, Park MS. Imaging of cerebral aneurysms: a clinical perspective. *Neurovasc Imaging*. 2016;2(1). <https://doi.org/10.1186/s40809-016-0016-3>
5. Jayaraman MV, Mayo-Smith WW, Tung GA, et al. Detection of intracranial aneurysms: multi-detector row CT angiography compared with DSA. *Radiology*. 2004;230(2):510–518. PMID: 14699177. <https://doi.org/10.1148/radiol.2302021465>
6. Bharatha A, Yeung R, Durant D, et al. Comparison of computed tomography angiography with digital subtraction angiography in the assessment of clipped intracranial aneurysms. *J Comput Assist Tomogr*. 2010;34(3):440–445. PMID: 20498551. <https://doi.org/10.1097/RCT.0b013e3181d27393>
7. Lubicz B, Levivier M, François O, et al. Sixty-four-row multisection CT angiography for detection and evaluation of ruptured intracranial aneurysms: interobserver and intertechnique reproducibility. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2007;28(10):1949–1955. PMID: 17898200. PMCID: PMC8134231. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A0699>
8. White PM, Teasdale EM, Wardlaw JM, Easton V. Intracranial aneurysms: CT angiography and MR angiography for detection prospective blinded comparison in a large patient cohort. *Radiology*. 2001;219(3):739–749. PMID: 11376263. <https://doi.org/10.1148/radiology.219.3.r01ma16739>
9. Rajpurkar P, Irvin J, Ball RL, et al. Deep learning for chest radiograph diagnosis: a retrospective comparison of the CheXNeXt algorithm to practicing radiologists. *PLoS Med*. 2018;15(11):e1002686. PMID: 30457988. PMCID: PMC6245676. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002686>
10. Приходько И.В., Ерогодский Е.А., Кузьмина Д.В., Сидница С.Г., Зяблова Е.И., Халафян А.А. Алгоритмы поиска пространственного расположения интракраниальных аневризм. В: *Прикладная математика: современные проблемы математики, информатики и моделирования: материалы III всероссийской научно-практической конференции молодых ученых*. Т. 1. Краснодарский ЦНТИ – филиал ФГБУ «РЭА» Минэнерго России; 2021:313–320.
11. Prikhodko IV, Erogodskii EA, Kuzmina DV, Sinitza SG, Zhablova EI, Khalafyan AA. Algorithms for detection of intracranial aneurysms location. In: *Applied Mathematics: Modern Issues of Mathematics, Informatics, and Modeling: Proceedings of III Russian Scientific and Practical Conference for Young Scientists*. Vol. 1. Krasnodar Center of Scientific and Technical Information – branch of Russian Energy Agency of the Ministry of Energy of Russia; 2021:313–320. (In Russ.).
12. UCAS Japan Investigators, Morita A, Kirino T, et al. The natural course of unruptured cerebral aneurysms in a Japanese cohort. *N Engl J Med*. 2012;366(26):2474–2482. PMID: 22738097. <https://doi.org/10.1056/NEJMoal113260>
13. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. *Глубокое обучение*. Пер. с англ. А.А. Слинкина. 2-е изд., испр. ДМК Пресс; 2018.
14. Goodfellow I, Bengio Y, Courville A. *Deep Learning*. Slinkin AA, trans. 2nd rev ed. DMK Press; 2018. (In Russ.).
15. Николенко С., Кадуринов А., Архангельская Е. *Глубокое обучение*. Питер; 2018.
16. Nikolenko S, Kadurin A, Arkhangelskaya E. *Deep Learning*. Питер; 2018. (In Russ.).
17. Зяблова Е.И., Ткачев В.В., Порханов В.А. Вклад КТ-ангиографии в верификацию источника нетравматического внутричерепного кровоизлияния в условиях экстренного приемного покоя. *Инновационная медицина Кубани*. 2021;(1):34–38. <https://doi.org/10.35401/2500-0268-2021-21-1-34-38>
18. Zhablova EI, Tkachev VV, Porhanov VA. CT angiography for detecting the cause of intracranial hemorrhage in the emergency

department. *Innovative Medicine of Kuban*. 2021;(1):34–38. (In Russ.). <https://doi.org/10.35401/2500-0268-2021-21-1-34-38>

14. Tomandl BF, Hammen T, Klotz E, Ditt H, Stemper B, Lell M. Bone-subtraction CT angiography for the evaluation of intracranial aneurysms. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2006;27(1):55–59. PMID: 16418356. PMCID: PMC7976055.

15. Shi WY, Li YD, Li MH, et al. 3D rotational angiography with volume rendering: the utility in the detection of intracranial aneurysms. *Neurol India*. 2010;58(6):908–913. PMID: 21150058. <https://doi.org/10.4103/0028-3886.73743>

16. Lin N, Ho A, Gross BA, et al. Differences in simple morphological variables in ruptured and unruptured middle cerebral artery aneurysms. *J Neurosurg*. 2012;117(5):913–919. PMID: 22957531. <https://doi.org/10.3171/2012.7.JNS111766>

17. Villablanca JP, Jahan R, Hooshi P, et al. Detection and characterization of very small cerebral aneurysms by using 2D and 3D helical CT angiography. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2002;23(7):1187–1198. PMID: 12169479. PMCID: PMC8185733.

Сведения об авторах

Зяблова Елена Игоревна, к. м. н., доцент, заведующая рентгеновским отделением, Научно-исследовательский институт – Краевая клиническая больница № 1 им. проф. С.В. Очаповского; заведующая кафедрой лучевой диагностики № 2 ФПК и ППС, Кубанский государственный медицинский университет (Краснодар, Россия). <https://orcid.org/0000-0002-6845-5613>

Синица Сергей Геннадьевич, к. техн. н., доцент кафедры информационных технологий, Кубанский государственный университет (Краснодар, Россия). <https://orcid.org/0000-0002-6340-127X>

Илья Алексеевич Заяц, студент 3-го курса факультета компьютерных технологий и прикладной математики, Кубанский государственный университет (Краснодар, Россия). <https://orcid.org/0009-0008-9984-8269>

Алексан Альбертович Халафян, д. техн. н., профессор кафедры анализа данных и искусственного интеллекта, Кубанский государственный университет (Краснодар, Россия). <https://orcid.org/0000-0003-2324-3649>

Кардаильская Дарья Олеговна, врач-рентгенолог, Научно-исследовательский институт – Краевая клиническая больница № 1 им. проф. С.В. Очаповского; ассистент кафедры лучевой диагностики №2 ФПК и ППС, Кубанский государствен-

ный медицинский университет (Краснодар, Россия). <https://orcid.org/0000-0002-4725-4345>

Порханов Владимир Алексеевич, академик РАН, д. м. н., профессор, главный врач, НИИ – ККБ № 1 им. проф. С.В. Очаповского; заведующий кафедрой онкологии с курсом торакальной хирургии ФПК и ППС, Кубанский государственный медицинский университет (Краснодар, Россия). <https://orcid.org/0000-0003-0572-1395>

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Author credentials

Elena I. Zyablova, Cand. Sci. (Med.), Associate Professor, Head of the Radiology Department, Scientific Research Institute – Ochapovsky Regional Clinical Hospital No. 1; Head of Diagnostic Radiology Department No. 2, Faculty of Continuing Professional Development and Retraining, Kuban State Medical University (Krasnodar, Russian Federation). <https://orcid.org/0000-0002-6845-5613>

Sergey G. Sinitza, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Information Technology Department, Kuban State University (Krasnodar, Russian Federation). <https://orcid.org/0000-0002-6340-127X>

Ilya A. Zayats, Student, Faculty of Computer Technologies and Applied Mathematics, Kuban State University (Krasnodar, Russian Federation). <https://orcid.org/0009-0008-9984-8269>

Alexan A. Khalafyan, Dr. Sci. (Tech.), Professor at the Data Analysis and Artificial Intelligence Department, Kuban State University (Krasnodar, Russian Federation). <https://orcid.org/0000-0003-2324-3649>

Daria O. Kardailskaya, Radiologist, Scientific Research Institute – Ochapovsky Regional Clinical Hospital No. 1; Assistant, Diagnostic Radiology Department No. 2, Faculty of Continuing Professional Development and Retraining, Kuban State Medical University (Krasnodar, Russian Federation). <https://orcid.org/0000-0002-4725-4345>

Vladimir A. Porhanov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Med.), Professor, Chief Physician, Scientific Research Institute – Ochapovsky Regional Clinical Hospital No. 1; Head of the Oncology Department with the Thoracic Surgery Course, Faculty of Continuing Professional Development and Retraining, Kuban State Medical University (Krasnodar, Russian Federation). <https://orcid.org/0000-0003-0572-1395>

Conflict of interest: none declared.