

# Разработка модели сегментации капилляров глазной поверхности по снимкам с офтальмологической щелевой лампы с использованием инструментов искусственного интеллекта

В.В. Нероев<sup>1,2</sup>А.А. Брагин<sup>1</sup>О.В. Зайцева<sup>1,2</sup>Е.В. Яни<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр глазных болезней имени Гельмгольца» Министерства здравоохранения Российской Федерации  
ул. Садовая-Черногрозская, 14/19, Москва, 105062, Российская Федерация

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Московский государственный медико-стоматологический университет им. А.И. Евдокимова»  
Министерства здравоохранения Российской Федерации  
ул. Десятская, 20, стр. 1, Москва, 127473, Российская Федерация

## РЕЗЮМЕ

Офтальмология. 2024;21(1):100–106

**Обоснование и цель исследования.** Изменения сосудов глазной поверхности нередко ассоциированы с наличием различных системных или глазных заболеваний. Сегментация сосудов глазной поверхности с использованием инструментов искусственного интеллекта (ИИ) представляет высокую актуальность в аспекте повышения качества ранней диагностики. Цель работы — разработка модели сегментации капилляров глазной поверхности по снимкам с офтальмологической щелевой лампы с использованием инструментов ИИ и языка Python. **Материалы и методы.** В исследовании использован датасет (700 глаз), находящийся в открытом доступе в сети Интернет и включающий в себя фотографии с офтальмологической щелевой лампы, размеченные вручную. С помощью метода аугментации данный набор для исследования увеличен в несколько раз. Система сегментации капилляров глаза на снимках с офтальмологической щелевой лампы построена на основе обученной нейронной сети U-net. **Результаты.** Основным результатом исследования является разработка алгоритма для автоматической сегментации капилляров глаз на снимках с офтальмологической щелевой лампы. Метрика в ходе обучения модели нейронной сети достигла 85 %. **Заключение.** Показаны высокая эффективность и потенциал методов ИИ при построении системы автоматической сегментации капилляров глазной поверхности на снимках в рамках разрабатываемой в ФГБУ «НМИЦ ГБ им. Гельмгольца» Минздрава России автоматизированной системы принятия врачебных решений. Данный сервис в перспективе может быть использован с целью повышения эффективности ранней диагностики и мониторинга лечения заболеваний глаз в условиях сниженной доступности первичной офтальмологической помощи на части территорий Российской Федерации, в том числе на доврачебном этапе.

**Ключевые слова:** глазная поверхность, воспалительные заболевания переднего отдела глаза, синдром сухого глаза, васкулит, искусственный интеллект, диагностика, сервис

**Для цитирования:** Нероев В.В., Брагин А.А., Зайцева О.В., Яни Е.В. Разработка модели сегментации капилляров глазной поверхности по снимкам с офтальмологической щелевой лампы с использованием инструментов искусственного интеллекта. *Офтальмология*. 2024;21(1):100–106. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2024-1-100-106>

**Прозрачность финансовой деятельности:** никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

**Конфликт интересов отсутствует.**



# Development of a Model of Segmentation of the Capillaries of the Ocular Surface Based on Images from an Ophthalmological Slit Lamp Using Artificial Intelligence Tools

V.V. Neroev<sup>1,2</sup>, A.A. Bragin<sup>1</sup>, O.V. Zaytseva<sup>1,2</sup>, E.V. Yani<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Helmholtz National Medical Research Center of Eye Diseases  
Sadovaya-Chernogryazskaya str., 14/19, Moscow, 105062, Russian Federation

<sup>2</sup> A.I. Yevdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry  
Delegatskaya str., 20/1, Moscow, 127473, Russian Federation

## ABSTRACT

Ophthalmology in Russia. 2024;21(1):100-106

**Justification and purpose of the study.** Changes in the vessels of the ocular surface are often associated with the presence of various systemic or ocular diseases. Segmentation of the vessels of the ocular surface using artificial intelligence (AI) tools is highly relevant in terms of improving the quality of early diagnosis of pathology. Purpose: to develop a model of segmentation of the capillaries of the ocular surface based on images from an ophthalmic slit lamp using AI tools using Python. **Materials and methods.** The study used a dataset (700 eyes), which is publicly available on the Internet and includes photos from an ophthalmological slit lamp, marked up manually. With the help of the augmentation method, this set for research has been increased several times. The system of segmentation of the capillaries of the eye in the images from the ophthalmological slit lamp is based on the trained neural network Unet. **Results.** The main result of the study is the development of an algorithm for automatic segmentation of eye capillaries in images from an ophthalmic slit lamp. The metric reached 85% during the training of the neural network model. **Conclusion.** The high efficiency and potential of all methods in the construction of an automatic segmentation system of the capillaries of the ocular surface in the images within the framework of the developed in the Helmholtz National Medical Research Center of Eye Diseases automated system of medical decision-making. In the future, this service can be used to improve the effectiveness of early diagnosis and monitoring of treatment of eye diseases in conditions of reduced availability of primary ophthalmological care in part of the territories of the Russian Federation, including at the pre-medical stage.

**Keywords:** ocular surface, inflammatory diseases of the anterior eye, dry eye syndrome, vasculitis, artificial intelligence, diagnostics, service

**For citation:** Neroev V.V., Bragin A.A., Zaytseva O.V., Yani E.V. Development of a Model of Segmentation of the Capillaries of the Ocular Surface Based on Images from an Ophthalmological Slit Lamp Using Artificial Intelligence Tools. *Ophthalmology in Russia*. 2024;21(1):100-106. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2024-1-100-106>

**Financial Disclosure:** No author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

**There is no conflict of interests.**

## ОБОСНОВАНИЕ И ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Заболевания глазной поверхности составляют весомую часть всех видов офтальмопатологии и являются одной из наиболее частых причин обращений пациентов за офтальмологической помощью [1]. Спектр этиологических причин, в результате которых развивается то или иное заболевание, достаточно широк и может быть представлен как местными, так и системными факторами, в результате воздействия которых формируется ответ с соответствующей клинической картиной. Патологические изменения могут развиваться в любой оболочке глазного яблока — конъюнктиве, склере, роговице — и обеспечивать характерный симптомокомплекс заболевания, заставляющий пациента обратиться к врачу. Чаще всего воспалительные заболевания глазной поверхности начинаются остро с быстрым развитием клинической картины и нарастанием субъективных жалоб. Диагностика данных состояний, как правило, не представляет сложности и включает в себя анализ анамнестических данных, клинической картины, инструментальных и лабораторных методов исследования. В настоящее время оснаще-

ние офтальмологических кабинетов позволяет провести широкий спектр диагностических манипуляций, а также, при необходимости, дополнительное высокотехнологичное обследование.

В то же время существует огромный пласт заболеваний глазной поверхности, имеющих вялотекущее, хроническое, медленно прогрессирующее течение. Как правило, эти патологические процессы в начальной стадии своего развития протекают бессимптомно и не имеют ярко выраженной клинической картины и, соответственно, своевременно не диагностируются офтальмологами.

К таким патологическим процессам относятся изменения сосудов глазной поверхности при системных заболеваниях, например васкулитах. В основе этой группы заболеваний лежит иммунопатологическое воспаление сосудистой стенки с последующей ее деструкцией. В зависимости от заболевания возможно поражение сосудов различного калибра. При этом исследование глазной поверхности может быть информативно для раннего выявления сосудистых изменений [2–4].

Болезнь Бехчета, синдром Когана чаще всего ассоциируются с развитием ирита, переднего и заднего увеита,

V.V. Neroev, A.A. Bragin, O.V. Zaytseva, E.V. Yani

Contact information: Bragin Aleksei A. [bragin\\_aa@igb.ru](mailto:bragin_aa@igb.ru)

Development of a Model of Segmentation of the Capillaries of the Ocular Surface...

хориоретинита. Однако васкулит мелких сосудов конъюнктивы и склеры может предшествовать развитию внутриглазного воспаления [5–9].

В случае системных васкулитов клинические проявления изменений сосудов глазной поверхности неярки и сложны в диагностике [10–12].

В других случаях выраженные субъективные жалобы пациентов не коррелируют с минимальными видимыми при биомикроскопии клиническими изменениями или показателями диагностических проб. Наиболее характерным примером является синдром сухого глаза. В случае стертой клинической картины врачу-офтальмологу бывает сложно принять решение, а запоздалая диагностика не дает возможности вовремя начать адекватную терапию.

Хотя патологические изменения переднего отдела глаза полностью доступны для биомикроскопии, мельчайшие субклинические признаки изменений сосудов подчас не регистрируются специалистами.

В настоящее время для решения сложных диагностических задач разрабатывается Система поддержки принятия врачебных решений (СППВР) — программное обеспечение, позволяющее путем сбора и анализа информации содействовать врачу на этапах диагностики и выработки тактики ведения пациента с целью снижения риска ошибок и повышения качества оказываемой медицинской помощи.

В настоящее время для диагностики патологических изменений глаза используется целый спектр манипуляций, вынуждающих офтальмологов вручную обрабатывать огромное количество данных, проводить типовые измерения, их анализ и расчеты. Распространенность и многообразие патологий глазной поверхности, минимальные клинические изменения в начальных стади-

ях ряда заболеваний, индивидуальные анатомические особенности капиллярной сети предъявляют высокие требования к квалификации врача-офтальмолога, проводящего осмотр. В последние годы развивается новое направление диагностики, связанное с компьютерной обработкой цифровых снимков глаза, полученных с помощью специализированного офтальмологического оборудования (цифровых фотощелевых ламп), основанной на методах машинного обучения [13–17].

Уникальность настоящей разработки заключается в новой диагностической методике на основе сегментации сосудов глазной поверхности с применением технологии компьютерного зрения, позволяющей производить эту сегментацию автоматически.

В ходе исследования была разработана модель семантической сегментации капилляров глазной поверхности человека по снимкам, полученным с помощью офтальмологической фотощелевой лампы. Данная модель должна помочь в распознавании начальных, субклинических патологических изменений капилляров, что позволит офтальмологу получать максимально точную информацию о данных клинических изменениях.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании использовался датасет (700 глаз), включающий в себя снимки глаз с щелевой лампы, размеченные вручную. К каждому изображению было прикреплено по маске в формате geojson. Разрешение изображений: (1232, 1624, 3). Тестовая выборка: 300 изображений разрешения (1232, 1624, 3).

Примеры неразмеченных и размеченных изображений снимков глаз представлены на рисунках 1 и 2.

Модель нейронной сети, использовавшаяся для сегментации капилляров глаз, изображена на рисунке 3.

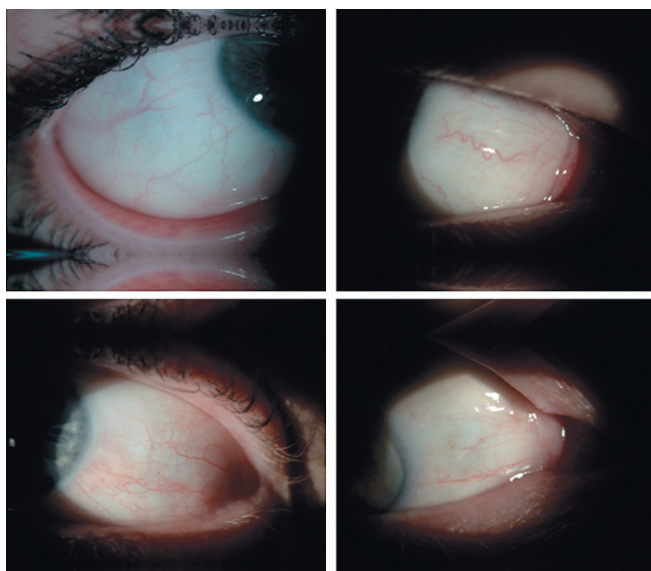


Рис. 1. Примеры неразмеченных снимков глаз

Fig. 1. Examples of unmarked eye shots

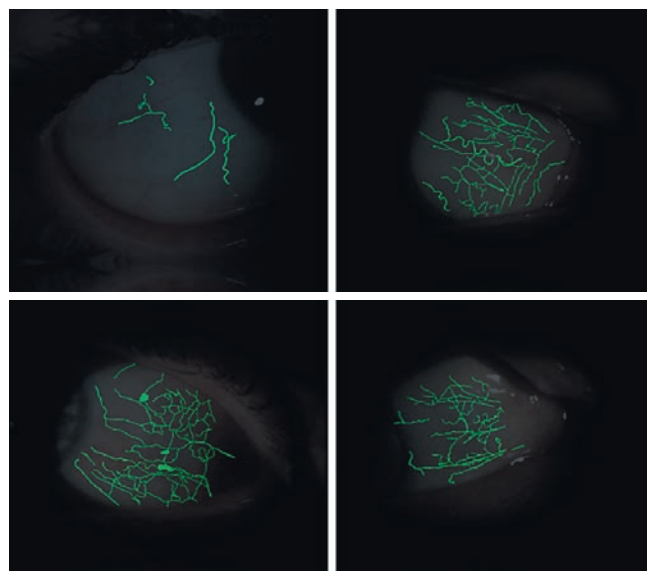


Рис. 2. Примеры размеченных снимков глаз

Fig. 2. Examples of posted eye shots

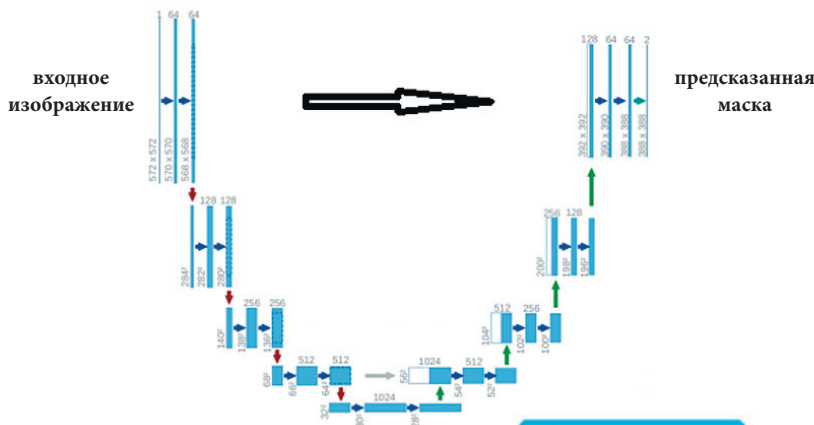


Рис. 3. Модель нейронной сети Unet

Fig. 3. The Unet neural network model

$$F = \frac{2TP}{(TP + FN) + (TP + FP)}$$

Рис. 4. Формула и графическая интерпретация метрики

Fig. 4. Formula and graphical interpretation of the metric

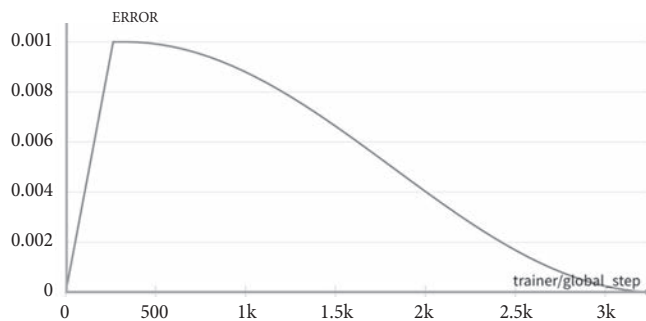
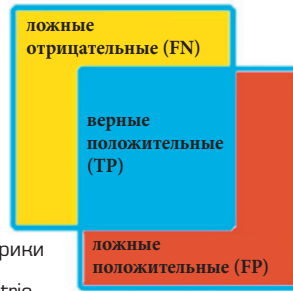


Рис. 5. График изменения ошибки в процессе обучения нейронной сети

Fig. 5. Graph of error changes in the neural network learning process

Формула метрики для оценки качества обучения (F) и графическая интерпретация представлены на рисунке 4.

Исследование включало в себя пре-процессинг данных и сохранение масок в формате .png, визуальную оценку разметки изображений, создание последовательности для обучения нейронной модели на фрагментах изображения размером 896×896, прогон изображений размером 1232×1624 через нейронную сеть с помощью выделения фрагментов на сетке 2×3 из тестовых изображений, обучение модели нейронной сети с EfficientNet энкодером, аугментацию в виде горизонтального поворота и сдвига разметки, кросс-валидацию на 5 фолдах, оценку качества на валидации, подбор гиперпараметров модели нейронной сети, построение ансамбля моделей, обученных на различных фолдах, прогон моделей и визуальную оценку предсказаний моделей.

В результате сравнительного анализа энкодера EfficientNet [18, 19] по отношению к другим типам энкодеров (ResNet34, ResNet50, ResNeXt) был сделан вывод о том, что энкодер EfficientNet показывает лучшие значения метрики по сравнению с другими типами.

В процессе обучения применялся оптимизатор Adam с начальным шагом обучения 10<sup>-4</sup> и плавным уменьшением шага обучения до 0 по полиномиальному закону убывания с коэффициентом 0,5. Обучение длилось 3500 эпох. Процесс обучения продемонстрирован на графике изменения ошибки (рис. 5).

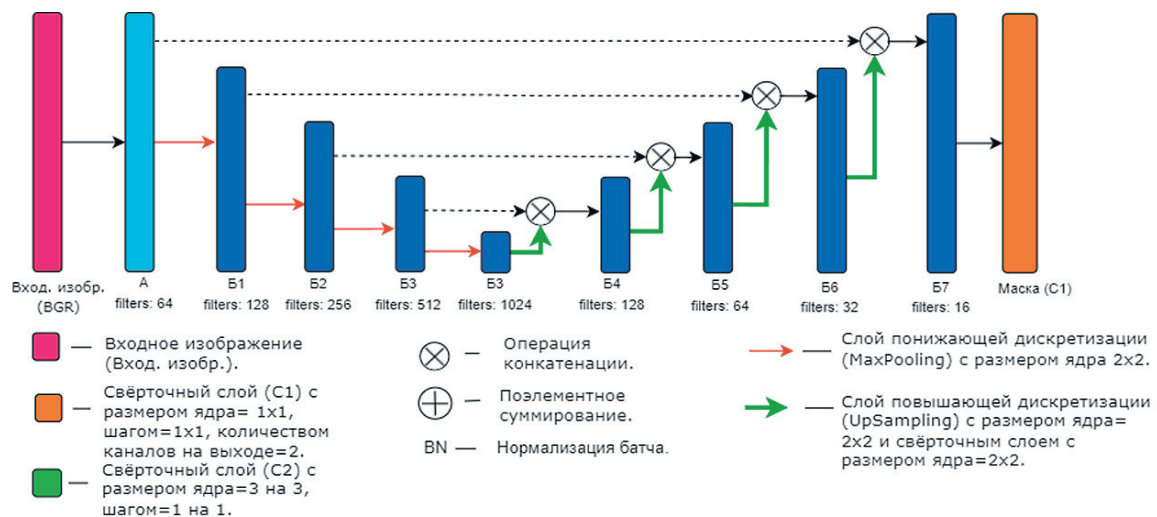
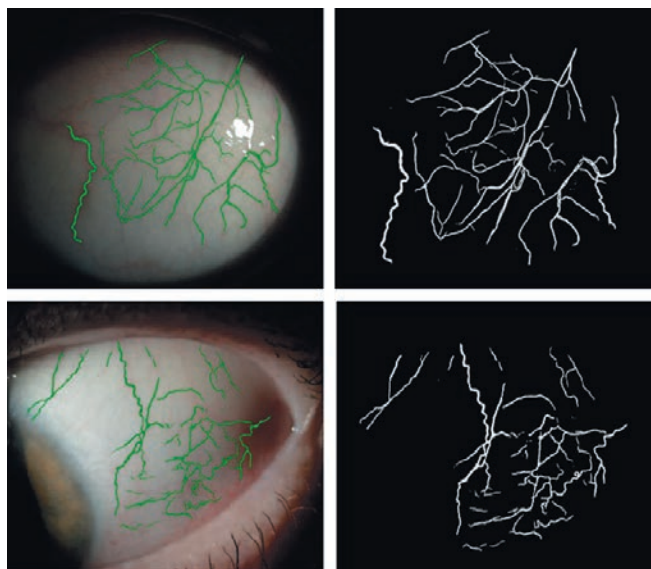


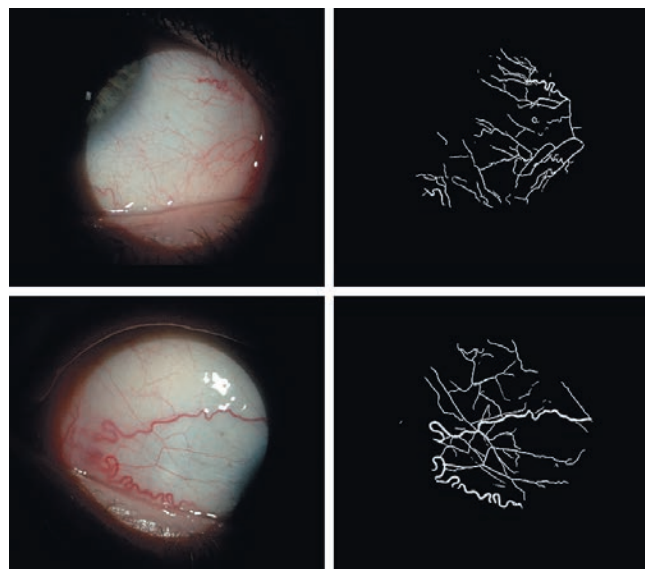
Рис. 6. Архитектура нейронной сети

Fig. 6. Neural network architecture



**Рис. 7.** Результат предсказания капилляров с помощью нейронной сети, пример 1

**Fig. 7.** The result of capillary prediction using a neural network, example 1



**Рис. 8.** Результат предсказания капилляров с помощью нейронной сети, пример 2

**Fig. 8.** The result of capillary prediction using a neural network, example 2

Работа дообученной нейронной сети продемонстрирована на рисунке 6. Рисунки 7 и 8 иллюстрируют результаты работы нейронной сети на тестовой выборке изображений. Анализ предсказываемых масок с капиллярами говорит о том, что ИИ качественно выделяет кровеносные сосуды, в том числе очень мелкие капилляры (благодаря обучению глубокой архитектуры на снимках с высоким разрешением). Предсказываемые границы сосудов довольно точны, и это видно на черно-белом изображении маски.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе проведенного исследования был собран набор данных для экспериментов, обучена нейронная сеть Unet для автоматической сегментации капилляров глазной поверхности на снимках с офтальмологической щелевой лампы. Полученное значение метрики качества модели — 85 % на тестовой выборке, и это не предел для ИИ. Вероятность ложных срабатываний сервиса, соответственно, равна 15 % на тестовой выборке. Разработанный механизм сегментации капилляров глазной поверхности на снимках позволит в дальнейшем автоматизировать процесс диагностики различных заболеваний, сопровождающихся изменениями архитектоники микрососудистого русла. В дальнейшем планируется проводить обучение нейронной сети на снимках реальных пациентов НМИЦ ГБ им. Гельмгольца. Проведенные исследования еще раз продемонстрировали высокий потенциал методов машинного обучения в офтальмологии и заложили фундамент для разрабатываемой в НМИЦ ГБ им. Гельмгольца автоматизированной системы принятия врачебных решений.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Попытки применять ИИ в медицине предпринимаются с каждым годом все чаще. Самыми распространенными задачами ИИ являются задачи классификации с целью диагностики различных заболеваний. Так, диагностике патологий глазного дна в офтальмологии уделяется особое внимание в различных работах [13, 20, 21]. Вторая, не менее распространенная задача ИИ — это задача сегментации. Исследованиям в области использования машинного обучения для сегментации капилляров глаза посвящено большое количество работ. Значительная часть из них ориентирована на сегментацию капилляров сетчатки. Градиентные методы [20, 24], морфологические приемы [20], классификатор К-ближайших соседей [23], методы среднего [22, 23], алгоритмы сверхточных нейронных сетей [20, 21] направленные на сегментацию сосудов на изображениях сетчатки, не отличаются высокой производительностью и не применялись к сегментации передней поверхности глаза, что подтверждает актуальность и своевременность проведенного исследования.

Настоящее исследование, в отличие от существующих, направлено на разработку инструмента для автоматической сегментации капилляров глазной поверхности на снимках с офтальмологической щелевой лампы с помощью методов ИИ. Данное направление диагностики имеет широкие перспективы применения в клинической практике с целью выявления и локализации расширения капилляров, изменения их хода и диаметра, паттерна сосудистого рисунка, выявления аномальных сосудов, в том числе ассоциированных с наличием новообразований.

Локализация сегментов расширения капилляров информативна в начальных стадиях изменения конъюнктивы при патологиях, носящих характер хронического воспалительного процесса, как, например, при синдроме сухого глаза или экспозиционной кератопатии. Крайне информативна также оценка изменений хода и диаметра сосудов, связанных с их поражением при системных васкулитах. Сегментация капилляров глазной поверхности по снимкам с офтальмологической щелевой лампы с использованием инструментов ИИ позволит повысить скорость, мобильность диагностики и сократить нагрузку на бюджет в будущем в рамках разрабатываемой в НИИЦ ГБ им. Гельмгольца автоматизированной Системы принятия врачебных решений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование ИИ в офтальмологической практике имеет широкие перспективы для дальнейшего применения, так как обладает рядом преимуществ. Использование ИИ для диагностики патологий, характеризующихся медленно прогрессирующим началом и длительным периодом бессимптомного течения, а также сложностью выявления ранних изменений капиллярного русла в ходе рутинного осмотра пациента, с применением сегментации капилляров глаза человека по снимкам, сделанным офтальмологической фотощелевой лампой, позволит своевременно заподозрить серьезную проблему, иногда требующую помощи врачей других специальностей. Использование методов ИИ высоко информативно для проведения дистанционных консультаций и консилиумов, необходимых для жителей отдаленных территорий страны.

Проведенное исследование продемонстрировало высокий потенциал методов машинного обучения, спо-

собных с высокой чувствительностью отслеживать миллионы признаков изображений за считанные секунды. Фоторегистрация переднего отдела глаза пациента в рамках скрининга либо с установленным диагнозом при регулярном мониторинге может быть проведена техническим или средним медицинским персоналом. Дальнейшая обработка изображений с помощью ИИ позволит выявлять наличие признаков, свидетельствующих о появлении/прогрессировании патологических изменений, что даст возможность вовремя направлять пациента в специализированную медицинскую организацию офтальмологического профиля. Данная технология в перспективе может снизить нагрузку на бюджет за счет частичной замены высококвалифицированных кадров искусственным интеллектом.

В ходе дальнейших этапов исследования планируется повысить чувствительность модели нейронной сети за счет выбора оптимальных метрик обучения нейронной сети, более тонкой настройки ее параметров и повышения достоверности исследуемого набора медицинских данных.

Описанная в статье технология предназначена для обработки фотографических изображений переднего отдела глаза, полученных с помощью обычной фотощелевой лампы, и может являться информативным инструментом мониторинга эффективности терапевтического ведения больного.

## УЧАСТИЕ АВТОРОВ:

Нероев В.В. — формулировка идеи, цели и задач исследования, окончательное редактирование и утверждение публикуемой версии рукописи; Брагин А.А. — статистическая обработка, разработка прототипа сервиса, написание текста; Зайцева О.В. — сбор и систематизация данных для научной работы, лабораторная проверка датасета на достоверность и его разметка, написание и редактирование текста; Яни Е.В. — написание и редактирование текста.

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Всемирный доклад о проблемах зрения. ВОЗ; 2017. World report on vision. WHO; 2017 (In Russ.). <https://www.who.int/ru/news/item/08-10-2019-who-launches-first-world-report-on-vision>
2. Бекетова ТВ. Современная классификация системных васкулитов. Терапевтический архив. 2014;86(5):94–98. Beketova TV. Modern classification of systemic vasculitis. Therapeutic archive. 2014;86(5):94–98 (In Russ.).
3. Garrity JA. Ocular manifestations of small-vessel vasculitis. Clev. Clin. J. Med. 2012;79(3):31–33. doi: 10.3949/ccjm.79.s3.07.
4. Ausayakhun S, Louthrenoo W, Auparong S. Ocular diseases in patients with rheumatic diseases. J. Med. Assoc. Thailand. 2002;85(8):855–862.
5. De Smit E, O'Sullivan E, Mackey DA, Hewitt AW. Giant cell arteritis: ophthalmic manifestations of a systemic disease. Graefes Archiv J. Ophthalmologie. 2016;254(12):2291–2306. doi: 10.1007/s00417-016-3434-7.
6. Шостак НА, Клименко АА. Системные васкулиты: новое в классификации, диагностике и лечении. Клиницист. 2015;9(2):8–12. Shostak NA, Klimentko AA. Systemic vasculitis: new in classification, diagnosis and treatment. A clinician. 2015;9(2):8–12 (In Russ.). doi: 10.17650/1818-8338-2015-9-2-8-12.
7. Butel N, Noel N, Touitou V, Champion E, Fardeau C, Phuc LeHoang P, Bodaghi B. Takayasu arteritis and ocular manifestations: about seven cases. Invest. Ophthalmol. Vis. Science. 2014;55:675.
8. Grasland A, Pouchot J, Hachulla E, Bléry O, Papo T, Vinceneux P. Typical and atypical Cogan's syndrome: 32 cases and review of the literature. Rheumatology (Oxford). 2004;43(8):1007–1015. doi: 10.1093/rheumatology/keh228.
9. Matsuo T, Itami M, Nakagawa H, Nagayama M. The incidence and pathology of conjunctival ulceration in Behcet syndrome. Br. J. Ophthalmol. 2002;86(2):140–143. doi: 10.1136/bjo.86.2.140.
10. Шейх ЖВ, Нуднов НВ, Кармазановский ГГ, Асланиди ИП, Дунаев АП. Системные васкулиты: возможности современной медицинской визуализации: учебное пособие. М.: Крафт+, 2019.
11. Sheikh JV, Nudnov NV, Karmazanovsky GG, Aslanidi IP, Dunaev AP. Systemic vasculitis: the possibilities of modern medical imaging: A textbook. Moscow: Крафт+; 2019 (In Russ.).
12. Nataraja A, Mukhtyar C, Hellmich B, Langford C, Luqmani R. Outpatient assessment of systemic vasculitis. Best Pract Res Clin Rheumatol. 2007;21(4):713–732. doi: 10.1016/j.berh.2007.01.004.
13. Нероев ВВ, Брагин АА, Зайцева ОВ. Разработка прототипа сервиса для диагностики диабетической ретинопатии по снимкам глазного дна с использованием методов искусственного интеллекта. Национальное здравоохранение. 2021;2(2):64–72.
14. Nataraja A, Braagin AA, Zaitseva OV. Development of a prototype service for the diagnosis of diabetic retinopathy from fundus images using artificial intelligence methods. National health care. 2021;2(2):64–72 (In Russ.). doi: 10.47093/2713-069X.2021.2.2.64-72.
15. Koyama A, Miyazaki D, Nakagawa Y, Ayatsuka Y, Miyake H, Ehara F, Shin-ichi Sasaki S-I, Shimizu Y, Inoue Y. Determination of probability of causative pathogen in infectious keratitis using deep learning algorithm of slit-lamp images. Scientific Reports. 2021;11:22642. doi: 10.1038/s41598-021-02138-w.
16. Zhang Z, Wang H, Shigeng W, Liang Q, Zhang Y, Wang Z, Chen K, Ou Z, Liang Q. Deep learning-based classification of infectious keratitis on slit-lamp images. Ther Adv Chronic Dis. 2022;13:0406223221136071. doi: 10.1177/ 20406223221136071.
17. Kuo MT, Hsu BW, Lin YS, Fang P-C, Yu H-J, Chen A, Yu M-S, Tseng VS. Comparisons of deep learning algorithms for diagnosing bacterial keratitis via external eye photographs. Sci Rep. 2021;11(1):24227. doi: 10.1038/s41598-021-03572-6.
18. Hung N, Shih AK, Lin C, Kuo M-T, HwangY-S, Wu W-C, Kuo C-F, Kang E-Y-C, Hsiao C-H. Using slit-lamp images for deep learning-based identification of bacterial and fungal keratitis: model development and validation with different convolutional neural networks. Diagnostics. 2021;11(7):1246.

18. Джулли А, Пал С. Библиотека Keras — инструмент глубокого обучения. М.: ДМК Пресс; 2017:294.  
Julli A, Pal S. Deep learning with Keras. Moscow: DMK Press, 2017: 294 (In Russ.).
19. He K, Zhang X, Ren S, Sun J. Deep residual learning for image recognition. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2016:770–778.
20. Faust O, Acharya RU, Ng EYK, Ng KH, Suri JS. Algorithms for the automated detection of diabetic retinopathy using digital fundus images: a review. Journal of Medical Systems. 2012;36(1):145–157. doi: 10.1007/s10916-010-9454-7.
21. Kirbas C, Quek F. A review of vessel extraction techniques and algorithms. ACM Computing Surveys (CSUR). 2004;36(2):81–121. doi: 10.1145/1031120.1031121.
22. Ricci E, Perfetti R. Retinal Blood Vessel Segmentation Using Line Operators and Support Vector Classification. IEEE Transactions on Medical Imaging. 2007;26(10):1357–1365. doi: 10.1109/TMI.2007.898551.
23. Fraz MM, Remagnino P, Hoppe A, Uyyanonvara B, Rudnicka AR, Owenc CG. Blood vessel segmentation methodologies in retinal images—A survey. Computer Methods and Programs in Biomedicine. 2012;108(1):407–433. doi: 10.1016/j.cmpb.2012.03.009.
24. Chutatape O, Member S, Zheng L, Krishnan SM. Retinal blood vessel detection and tracking by matched Gaussian and Kalman filters. Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 1998;20(6):3144–3149.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр глазных болезней им. Гельмгольца» Министерства здравоохранения Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Московский государственный медико-стоматологический университет им. А.И. Евдокимова» Министерства здравоохранения Российской Федерации  
Нероев Владимир Владимирович  
доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, директор ФГБУ, заведующий кафедрой глазных болезней ФДПО ФГБОУ  
ул. Садовая-Черногызская, 14/19, Москва, 105062, Российская Федерация  
ул. Делегатская, 20, стр. 1, Москва, 127473, Российская Федерация  
<https://orcid.org/0000-0002-8480-0894>

ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр глазных болезней им. Гельмгольца» Министерства здравоохранения Российской Федерации  
Брагин Алексей Александрович  
кандидат технических наук, начальник отдела информационных технологий  
ул. Садовая-Черногызская, 14/19, Москва, 105062, Российская Федерация  
<https://orcid.org/0000-0002-5331-632X>

ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр глазных болезней им. Гельмгольца» Министерства здравоохранения Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Московский государственный медико-стоматологический университет им. А.И. Евдокимова» Министерства здравоохранения Российской Федерации  
Зайцева Ольга Владимировна  
кандидат медицинских наук, заместитель директора по организационно-методической работе ФГБУ, доцент кафедры глазных болезней ФДПО ФГБОУ  
ул. Садовая-Черногызская, 14/19, Москва, 105062, Российская Федерация  
ул. Делегатская, 20, стр. 1, Москва, 127473, Российская Федерация  
<https://orcid.org/0000-0003-4530-553X>

ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр глазных болезней им. Гельмгольца» Министерства здравоохранения Российской Федерации  
Яни Елена Владимировна  
кандидат медицинских наук, исполняющая обязанности начальника отдела инфекционных и аллергических заболеваний глаз, доцент кафедры непрерывного медицинского образования  
ул. Садовая-Черногызская, 14/19, Москва, 105062, Российская Федерация  
<https://orcid.org/0000-0003-1527-9414>

## ABOUT THE AUTHORS

Helmholtz National Medical Research Center of Eye Diseases  
A.I. Yevdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry  
Neroev Vladimir V.  
MD, Professor, Academician of the Russian Academy of Science, director of Helmholtz National Medical Research Center of Eye Diseases, Head of Chair of the Department of eye diseases of A.I. Yevdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry  
Sadovaya-Chernogryazskaya str., 14/19, Moscow, 105062, Russian Federation  
Delegatskaya str., 20/1, Moscow, 127473, Russian Federation  
<https://orcid.org/0000-0002-8480-0894>

Helmholtz National Medical Research Center of Eye Diseases  
Bragin Aleksei A.  
PhD in Engineering, head of the Information technology department  
Sadovaya-Chernogryazskaya str., 14/19, Moscow, 105062, Russian Federation  
<https://orcid.org/0000-0002-5331-632X>

Helmholtz National Medical Research Center of Eye Diseases  
A.I. Yevdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry  
Zaytseva Olga V.  
PhD, deputy director of Helmholtz National Medical Research Center of Eye Diseases, Associate Professor of the Department of eye diseases, Moscow State Medical Stomatological University  
Sadovaya-Chernogryazskaya str., 14/19, Moscow, 105062, Russian Federation  
Delegatskaya str., 20/1, Moscow, 127473, Russian Federation  
<https://orcid.org/0000-0003-4530-553X>

Helmholtz National Medical Research Center of Eye Diseases  
Yani Elena V.  
PhD, acting head of the Department of infectious and allergic eye diseases, Associate Professor of the Department of continuing medical education  
Sadovaya-Chernogryazskaya str., 14/19, Moscow, 105062, Russian Federation  
<https://orcid.org/0000-0003-1527-9414>