

<https://doi.org/10.21516/2072-0076-2026-19-1-185-190>



Современные возможности искусственного интеллекта в диагностике и лечении глазных осложнений сахарного диабета

В.В. Нероев^{1,2}, Д.В. Липатов¹✉, О.В. Зайцева^{1,2}, А.А. Брагин¹

¹ ФГБУ «НМИЦ глазных болезней им. Гельмгольца» Минздрава России, ул. Садовая-Черногрязская, д. 14/19, Москва, 105062, Россия

² ФДПО ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России, ул. Делегатская, д. 20, стр. 1, Москва, 127473, Россия

В настоящее время искусственный интеллект (ИИ) считается одним из самых быстроформирующихся и совершенствующихся направлений в науке и практике, включая медицину. Алгоритмы глубокого машинного обучения позволяют системам распознавать образы, обрабатывать естественный язык и прогнозировать тренды на основе больших баз данных. В обзоре рассмотрена роль ИИ на примере глазных осложнений у пациентов с сахарным диабетом (СД). Проведен анализ данных литературы по использованию технологий ИИ в скрининге пациентов с СД, диагностике диабетической ретинопатии и диабетического макулярного отека, мониторинге заболевания, выборе лечения, лазеркоагуляции сетчатки, «адресной» доставке ингибиторов ангиогенеза у пациентов с поражением сетчатки на фоне СД. Показаны преимущества технологий ИИ, обусловленные высокой скоростью и точностью анализа больших объемов медицинских данных, возможностью дистанционного взаимодействия, что может помочь офтальмологам в принятии врачебных решений.

Ключевые слова: цифровые технологии; искусственный интеллект; сахарный диабет; диабетическая ретинопатия; скрининг; диагностика; лазеркоагуляция сетчатки; навигационное лазерное лечение

Конфликт интересов: отсутствует.

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

Для цитирования: Нероев В.В., Липатов Д.В., Зайцева О.В., Брагин А.А. Современные возможности искусственного интеллекта в диагностике и лечении глазных осложнений сахарного диабета. Российский офтальмологический журнал. 2026; 19 (1): 185-90. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2026-19-1-185-190>

Modern artificial intelligence capabilities in the diagnosis and treatment of ocular complications of diabetes mellitus

Vladimir V. Neroev^{1,2}, Dmitry V. Lipatov¹✉, Olga V. Zaitseva^{1,2}, Alexey A. Bragin¹

¹ Helmholtz National Medical Research Center of Eye Diseases, 14/19, Sadovaya-Chernogryazskaya St., Moscow, 105062, Russia

² FDPO of the Russian University of Medicine, 20, build. 1, Delegatskaya St., Moscow, 127473, Russia
glas1966@rambler.ru

Artificial intelligence (AI) is currently considered one of the most rapidly developing and improving fields in science and practice, including medicine. Deep machine learning algorithms enable systems to recognize images, process natural language, and predict trends based on large databases. This review analyses the role of AI using the example of ocular complications in patients with diabetes mellitus (DM). Literature data on the use of AI technologies in screening patients with DM, diagnosing diabetic retinopathy and diabetic macular edema, disease monitoring, treatment selection, retinal laser photocoagulation, and targeted delivery of angiogenesis inhibitors in patients with retinal

damage due to DM are analyzed. The advantages of AI technologies, including the high speed and accuracy of analyzing large volumes of medical data and the possibility of remote interaction, are demonstrated, which can assist ophthalmologists in making medical decisions.

Keywords: digital technologies; artificial intelligence; diabetes mellitus; diabetic retinopathy; screening; diagnostics; retinal laser coagulation; navigated laser treatment

Conflict of interests: there is no conflict of interests.

Financial disclosure: no author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

For citation: Neroev V.V., Lipatov D.V., Zaitseva O.V., Bragin A.A. Modern artificial intelligence capabilities in the diagnosis and treatment of ocular complications of diabetes mellitus. Russian ophthalmological journal. 2026; 19 (1): 185-90 (In Russ.). <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2026-19-1-185-190>

В настоящее время в сфере российского цифрового здравоохранения существует несколько ключевых макро-трендов — это использование возможностей искусственного интеллекта (ИИ), превентивная медицина, персонализация, объединение продуктов, носимые и портативные устройства. Цифровая аналитика данных все чаще применяется для оптимизации работы медицинских учреждений, а методы биоинформатики позволяют разрабатывать новые методы лечения и диагностики. Кроме того, одним из самых быстрорастущих сегментов медицинских технологий еще со времен пандемии COVID-19 остается телемедицина.

Указом президента России утверждена национальная стратегия развития ИИ в Российской Федерации на период до 2030 г. [1], согласно которой внедрение ИИ в российском здравоохранении является одним из ключевых направлений развития отрасли. Согласно информации Минздрава России, в 2023 г. в 85 субъектах федерации внедрены 106 медицинских изделий, работающих на основе ИИ. С их помощью проанализировано 22 млн медицинских записей, в шести регионах применяются сервисы голосового заполнения документов, а в 29 — виртуальные ассистенты с ИИ для записи на прием к врачу.

Очевидно, что одним из самых развитых направлений ИИ-систем для медицины является анализ медицинских изображений. В России разработано большое количество решений для автоматической обработки данных магнитно-резонансной томографии, компьютерной томографии, рентгеновских снимков, маммографии, цифровых мазков крови и костного мозга, снимков глазного дна и челюстной системы, а также анализа видеопотока из медицинских учреждений.

Диабетическая ретинопатия (ДР) является удачной моделью для применения технологий ИИ в аспекте диагностики и мониторинга заболевания, а также отдельных направлений лечения, так как имеет четко определенные критерии стадийности патологического процесса на глазном дне, доступные визуализации и фотофиксации [2].

Использование возможностей ИИ у пациентов с сахарным диабетом (СД) началось с анализа снимков глазного дна, полученных с помощью фундус-камеры с целью выявления патологических изменений сетчатки на ранних этапах развития ДР. Так, V. Gulshan и соавт. [3] и D. Ting и соавт. [4] обучали нейронные сети идентифицировать микроаневризмы, твердые и мягкие экссудаты, геморрагии и зоны просачивания флюоресцеина с использованием больших баз данных.

В некоторых исследованиях для обучения нейронных сетей выявлять патологические изменения сетчатки использовались не только фотографические изображения глазного дна, но и данные оптической когерентной томографии (ОКТ). Так, H. Wu и соавт. [5] разработали высокоспецифичную нейронную сеть (программу), которая учитывала алгоритм обратного распространения ошибки, что существенно повышало эффективность установки правильного

диагноза по данным ОКТ. J. Krause и соавт. [6], применив многоступенчатую шкалу оценки тяжести ДР, создали алгоритм глубокого обучения для прогнозирования течения ДР и диабетического макулярного отека (ДМО). Они показали, что градация ДР обязательно требует распознавания и количественной оценки наличия ряда признаков, таких как микроаневризмы, геморрагии и новообразованные сосуды.

В нашей стране одними из первых разработчиков программ ИИ по проблеме ДР были сотрудники отдела патологии сетчатки НМИЦ ГБ им. Гельмгольца. В 2021 г. на основе остаточной нейронной сети ResNet50 создан web-сервис диагностики диабетических изменений сетчатки по фотографиям фундус-камеры с помощью инструментов машинного обучения [7]. Обучение модели нейронной сети проведено с помощью библиотеки Keras, написанной на языке программирования Python, а сам web-сервис с подключенной моделью нейронной сети разработан с использованием фреймворка Django. Программа продемонстрировала высокий потенциал в отношении выявления симптомов ретинопатии, чувствительность модели в ходе диагностики составила 85 %. Данное исследование стало отправной точкой для развития исследований возможностей ИИ в НМИЦ ГБ им. Гельмгольца и началом построения диагностических систем автоматического обнаружения глазных заболеваний, способных стать фундаментом создания системы принятия врачебных решений (СПВР) и системы самодиагностики пациентов (ССП).

Так, уже в 2022 г. сотрудники отдела патологии сетчатки НМИЦ ГБ им. Гельмгольца провели масштабное исследование, посвященное классификации уже нескольких патологий сетчатки, научив модель нейронной сети оценивать вероятность присутствия их признаков не только на фотографиях глазного дна, но и на сканах ОКТ. В исследовании использовался датасет (20 тыс. глаз) из открытых источников в сети Интернет и собственного архива, включающий сканы ОКТ здоровой сетчатки (5 тыс. глаз) и сетчатки с тремя разными патологиями (неоваскуляризация хориоидеи, диабетический макулярный отек (ДМО), множественные друзы — 15 тыс. глаз). Система распознавания патологий сетчатки построена на основе дообученной нейросети VGG16. Разработан алгоритм диагностики заболеваний сетчатки по сканам ОКТ на основе такого инструмента ИИ, как глубокие сверточные нейронные сети. Чувствительность и специфичность модели нейронной сети в ходе выявления заболеваний сетчатки составили 97 и 98 % соответственно, что в очередной раз продемонстрировало высокий потенциал инструментов ИИ в диагностике патологических процессов на глазном дне [8].

Аналогичные исследования в других клиниках России также показали высокую эффективность и потенциал методов ИИ при построении системы автоматического обнаружения патологии глазного дна, что дало толчок к дальнейшему развитию этого направления [9]. В различных регионах

нашей страны были созданы специальные программы с использованием возможностей ИИ, которые позволили облегчить повседневную работу врача-офтальмолога. Среди них Ocuscreen, Retina.AI и «Ключ к диагнозу».

Одним из первых субъектов Российской Федерации, успешно применяющих на практике методы цифрового скрининга ДР, стала Томская область. Российская программа Ocuscreen представляет собой цифровой продукт для распознавания заболеваний сетчатки, в первую очередь ДР, по фотографиям с фундус-камер с использованием алгоритмов машинного обучения. Успешное развитие этого проекта привело к тому, что в 2023 г. стартовало пилотное цифровое скрининговое исследование глазного дна пациентов с СД, проживающих на территории Томской области. Была организована цифровая инфраструктура скрининга пациентов с СД, центральным звеном которой стала телемедицинская система передачи и хранения снимков глазного дна со встроенной системой поддержки принятия врачебных решений [10].

Программа Ocuscreen анализирует снимки сетчатки на наличие признаков ДР, и в случае их обнаружения пациент направляется к офтальмологу. Результат сканирования программа выдает за считанные секунды, что существенно сокращает время ожидания по сравнению с длительностью анализа изображений врачом. Отечественная разработка не только выдает предполагаемый диагноз, но и выделяет патологически измененные области на глазном дне. Для обработки данных с фундус-камер в Сибирском государственном медицинском университете создан специальный центр, в котором размещенный в облачном сервере цифровой продукт доступен для врачей из любой клиники Томской области, что позволяет не только повысить охват пациентов, но и оказывать помощь дистанционно в формате «врач — врач». Программа Ocuscreen помогает врачам-офтальмологам проводить скрининг пациентов не только на наличие ДР, но также глаукомы и дегенеративных заболеваний макулы [10].

Программа Retina.AI представляет собой программный комплекс, основанный на алгоритме автоматической сегментации для оценки степени тяжести ДР и других заболеваний сетчатки. Авторы программы в качестве обучающей и валидационной баз данных использовали фотографии глазного дна и сканы ОКТ пациентов с ДР, ДМО, возрастной макулярной дегенерацией (ВМД) и аномалиями витреомакулярного интерфейса [11]. На их основе были разработаны алгоритмы сегментации патологических признаков с высокими показателями точности и создана офтальмологическая платформа, позволяющая с помощью двух ключевых модулей проводить автоматизированный анализ сканов ОКТ и фотографий глазного дна, выявлять признаки вышеуказанных заболеваний.

Процесс работы с Retina.AI максимально упрощен: после загрузки необходимых изображений результаты анализа появляются в течение нескольких секунд, отчет может быть экспортирован в различных форматах и добавлен в электронную медицинскую карту пациента. Программа позволяет врачу быстро получить дополнительное экспертное мнение относительно диагноза пациента. Используемые технологии тщательно протестированы и прошли все необходимые технические и клинические испытания, а полученные результаты опубликованы в ведущих научных медицинских журналах. Разработчики Retina.AI получили свидетельство о регистрации медицинского изделия на основе ИИ в офтальмологии (РУ № РЗН 2024/23001), что подтверждает инновационность и уникальность предлагаемого продукта.

В Воронежской области в 2022–2023 гг. был разработан экспериментальный образец платформы скрининга ретинопатии недоношенных (РН) на основе анализа широкопольного

изображения с выделением локализации макулы и сосудистой сети под названием «Ключ к диагнозу — 1» [12]. Программа позволяла проводить сегментарную оценку сосудов сетчатки, оценивать артериовенозное соотношение, количество бифуркаций, общую длину сосудов и количество сосудистых узлов, фрактальную размерность, тракционный индекс макулярной зоны, а также исходную площадь сосудистого русла и первоначально предназначалась для оценки состояния глазного дна у недоношенных детей с РН. Проанализированы около 1300 снимков педиатрической ретинальной камеры.

В дальнейшем обучение программы на основе фундус-изображений сетчатки более чем 400 пациентов с ДР позволило расширить функционал в аспекте диагностики глазных осложнений СД. Программа более высокого качества и расширенных возможностей получила название «Ключ к диагнозу — 2» [13].

Программа моделирует широкопольные изображения, что расширяет представления о состоянии сетчатки, позволяет быстро оценить эффективность проведенного лечения, измерить площадь аваскулярных зон при ДР. Кроме того, обновленный программный продукт позволяет на смоделированных широкопольных изображениях рассчитать фрактальную размерность и оценить особенности сосудистой сети сетчатки новорожденного ребенка, которые не только определяют стадию, но и прогнозируют прогрессирование РН.

Описанные выше цифровые продукты выводят Россию в число лидеров по разработке ИИ-решений в офтальмологии, позволяя конкурировать с ведущими странами в функциональности и доступности цифровых решений.

Программы, созданные с помощью ИИ, могут использоваться изображения глазного дна, полученные не только с помощью высокотехнологичного оборудования для визуализации, но и с помощью обычных смартфонов. Например, программа EyeNuk, которая использует программное обеспечение EyeArt, показала чувствительность более 95 % при использовании изображений глазного дна, полученных с помощью обычных телефонов [14].

В настоящее время растет количество баз данных фотографий глазного дна, находящихся в открытом доступе: EyeArt (Великобритания), EyePACS (США), ODIR (Китай), APTOS и IDx-DR (Индия), DR2 (Бразилия), Jichi и Tsukazaki (Япония). В них находятся в общей сложности сотни тысяч фотографий почти из всех стран мира. Примечательно, что эти данные могут быть использованы для тестирования вновь созданных нейронных сетей.

Не только изображения глазного дна и сканы ОКТ при СД и ДР могут быть эффективным объектом изучения с применением методов ИИ. Уместно упомянуть российскую программу EyeMove, созданную для диагностики и мониторинга заболеваний центральной нервной системы (ЦНС) по движению глаз. С помощью мобильного приложения и веб-камеры программа позволяет провести первичную диагностику отклонений в работе головного мозга при таких патологиях, как болезнь Альцгеймера и Паркинсона, синдром дефицита внимания, гиперактивность, аутизм, а также оценить определенные изменения ЦНС на фоне СД [15].

EyeMove представляет собой мобильное приложение, на экране которого появляются зеленые точки, за которыми должен следить испытуемый. Движения глаз, положение головы, глаз и зрачков регистрируются программой. Затем приложение рассчитывает траекторию движения глаз, анализирует время реакции, время движения и другие параметры. Результат сравнивается с нормой, а также с предыдущими тестами. При этом врач может мониторить развитие болезни и эффективность лекарственной терапии.

Точкой приложения технологий ИИ может быть не только диагностика, но и лечение пациентов с СД и ДР.

В эндокринологии использование возможностей ИИ в лечении СД началось в конце XX в., когда появились приборы (помпы) для дозированного введения инсулина [16]. Первые бескатетерные помпы крепились непосредственно на кожу, инсулин вводился в организм через маленький прокол. При этом помпа автоматически рассчитывала дозы инсулина и позволяла запрограммировать разные профили его введения [17].

В 2000 г. появилась система для мониторинга гликемии (Continuous Glucose Monitoring System — CGMS), в 2004 г. — система мониторинга гликемии в режиме реального времени [18]. В 2006 г. разработчики объединили метод непрерывного мониторинга гликемии в режиме реального времени с инсулиновой помпой, так появилась первая интегрированная система «помпа + монитор гликемии» [19]. В 2017 г. была одобрена инсулиновая помпа, которая измеряет уровень глюкозы каждые 5 мин и при необходимости самостоятельно вводит инсулин. Очевидно, что в будущем будет создан прибор, полностью заменяющий функцию поджелудочной железы и способный без участия пациента поддерживать идеальный уровень углеводного обмена в организме [20].

В настоящее время панретинальная лазеркоагуляция (ПЛК) является основным методом лечения ДР. Раннее выявление признаков пре- и пролиферативной ДР играет важную роль для своевременного проведения ПЛК. Использование возможностей ИИ может существенно облегчить работу врачей в этом вопросе. Так, Н. Takahashi и соавт. [21] на основе анализа градаций ретинопатии и оценки ее динамики разработали алгоритм прогнозирования потребности в лазеркоагуляции с точностью до 96 %.

Особый интерес представляет разработка оптимальных параметров лазерного излучения для минимизации повреждения сопредельных структур глазного дна в ходе лазеркоагуляции. Некоторые исследователи идут по пути измерения температуры сетчатки и ее сравнения с нормой. Финские исследователи М. Pitkanen и соавт. [22] опубликовали результаты экспериментальной работы по измерению температуры ретинального пигментного эпителия на изолированных сетчатках лабораторных мышей на основе регистрации параметров электроретинограммы, которые зависят от температуры клеток. После этого при помощи алгоритма ИИ была разработана модель расчета минимальной энергии лазерного излучения, необходимой для получения клинического эффекта при условии минимизации термического повреждения сетчатки в процессе лазерного воздействия.

Появление в 2008 г. на основе технологии ИИ цифровой навигации лазерного лечения совершило прорыв в этом направлении. Цифровая лазерная навигация использует те же высокоскоростные зеркала, что и технология паттерн-сканирования, однако дополнительно включает фотографирование сетчатки, предварительное планирование лазерных аппликаций, проведение лазерного лечения согласно плану в автоматическом режиме при непрерывном автоматическом слежении за положением сетчатки во время операции для обеспечения безопасности и точности подачи лазерных импульсов [23].

В 2019 г. технология цифровой лазерной навигации была дополнена возможностью полностью бесконтактного выполнения процедуры коагуляции сетчатки. Бесконтактность лазерного лечения позволила дополнительно уменьшить негативные ощущения пациента. Среди достоинств навигационных лазерных систем выделяют: уменьшение

времени лазерного лечения за счет практически одномоментной подачи нескольких лазерных импульсов, комфорт для пациента, снижение болевых ощущений, более равномерное лазерное воздействие по сравнению с коагуляцией единичным пятном, высокий уровень безопасности процедуры. Однако есть и недостатки технологии навигационной лазеркоагуляции, к которым относят чувствительность к оптическим искажениям и степень комплаенса пациента [24].

Постоянное совершенствование лазерных систем и внедрение в клиническую практику новых методов транспупиллярной ПЛК обуславливают достижение высокого процента стойкого регресса ДР при минимальной энергетической нагрузке на сетчатку и продолжительности сеанса процедуры. Современные лазерные алгоритмы являются высокоэффективными, безопасными и дозированными. Очевидно, в дальнейшем использование ИИ в технологиях лазеркоагуляции сетчатки продолжит свое активное развитие и совершенствование [25].

Широкое внедрение в клиническую практику ингибиторов ангиогенеза (ИА) ознаменовало прорыв в лечении пациентов с ДМО, а также тяжелых форм пролиферативной ДР [26, 27]. С учетом необходимости неоднократных интравитреальных инъекций ИА разрабатываются специальные устройства, которые, как инсулиновая помпа, вводят в полость стекловидного тела необходимую дозу препарата. Исследование возможностей ИИ в этой технологии уже ведутся как в нашей стране, так и за рубежом [28, 29].

По мнению некоторых исследователей, «адресная» дозированная доставка лекарственных препаратов является более предпочтительной при лечении заболеваний глазного дна [30]. Ее суть состоит в подведении самого лекарственного вещества или средства его доставки к рецепторам на клетках-мишенях. Направленная доставка позволяет снизить дозу препарата и минимизировать его воздействие на другие ткани.

Для обеспечения устойчивого поступления лекарственных препаратов к сетчатке разрабатываются различные офтальмологические системы доставки. Однако на сегодняшний день лишь немногие из них широко используются в клинической медицине из-за высокой инвазивности и сложности имплантации устройств [31–33]. Однако интравитреальная терапия ИА, «адресная» доставка активных субстанций к клеткам-мишеням представляют обширные возможности для использования технологий ИИ в аспекте расчета оптимальной дозы и кратности введения препарата, снижения риска побочных эффектов.

Таким образом, анализ отечественной и зарубежной литературы по использованию возможностей ИИ в повседневной практике врача-офтальмолога отражает эффективность и целесообразность цифрового скрининга больных СД на предмет выявления ДР, а также использования цифровых технологий ИИ в мониторинге и лечении пациентов с ДР.

Современные рекомендации по скринингу ДР и ДМО в России предусматривают выполнение алгоритмов, включающих регулярные осмотры врачом-офтальмологом всех пациентов с СД даже при отсутствии диабетических изменений органа зрения [34].

К сожалению, согласно данным оценки реальной клинической практики, только 33–68 % наших соотечественников с установленным диагнозом СД проходят ежегодное обследование с проверкой состояния сетчатки [35]. К барьерам при проведении скрининга в надлежащий срок до сих пор относятся низкая медицинская грамотность населения, непонимание важности обследования глаз, экономические проблемы, отсутствие транспортной доступности, нежелание посещать врача, а также системные факторы организации

медицинской помощи. Так, по результатам первого российского опроса «СЕТЧАточкаRU», 68,2% врачей-ретинологов (из 585 опрошенных) не имеют опыта работы с ИИ для личных или профессиональных целей, что говорит о недостаточном внедрении этих технологий в нашу повседневную практику [35].

Мировой практикой показано, что систематический скрининг патологии сетчатки у пациентов с СД, диагностика и своевременное лечение выявленных поражений глазного дна являются экономически эффективными подходами. Например, системы IDx-DR (Индия), EyeArt (Великобритания), созданные для скрининга ретинопатии у пациентов с СД, показали высокую результативность.

На современном этапе развития медицинских и цифровых технологий в России существуют все предпосылки для широкого внедрения на государственном уровне. В настоящее время формируется законодательная база для использования ИИ в том числе в медицине. Применение ИИ и телемедицинских технологий может значительно повысить доступность скрининга, сократить время и материальные затраты на его проведение, повысить точность диагностики, будет способствовать увеличению числа пациентов, охваченных скринингом, а следовательно, повысит выявляемость патологии на ранних этапах [36].

Учитывая высокий процент выявляемой ДР в ходе цифрового скрининга больных СД, низкую стоимость технологий, данную модель организации медицинской помощи можно рекомендовать к использованию во всех ключевых медицинских организациях, в том числе на отдаленных территориях или в тех муниципальных образованиях, где отсутствует врач-офтальмолог.

Необходимо сказать о небольшой «ложке дегтя» в использовании возможностей ИИ в оценке изображений в медицине, в том числе в офтальмологии, — это ограниченность спектра диагностического поиска, невозможность определения тех заболеваний, для выявления которых не проводилось обучение нейронной сети. По всей видимости, не за горами появление более продвинутых программ, которые позволят проводить более широкий скрининг на предмет распознавания различных заболеваний органа зрения.

Актуальность использования иных возможностей цифровых технологий подтверждает высокая результативность Федерального регистра пациентов с СД — высокотехнологичного программного продукта, в котором на сегодняшний день зарегистрированы более 5,5 млн пациентов с СД и более 900 тыс. пациентов с ДР [19]. Уникальная цифровая база данных Федерального регистра позволяет не только проводить всесторонний анализ ситуации по оказанию помощи больным с СД и ДР, принимать организационные и управленческие решения, но и разрабатывать персонализированные подходы к каждому пациенту на основе детального анализа течения его заболевания.

Таким образом, цифровые технологии прочно входят в практику российского здравоохранения, и офтальмологии в частности, позволяя повысить качество и доступность медицинской помощи для населения, совершенствовать организационные решения.

Литература/References

1. Указ Президента РФ от 10.11.2019 № 490 О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/72838946/> (дата обращения: 10.05.2025). [Decree of the President of the Russian Federation of November 10, 2019 No. 490 On the development of artificial intelligence in the Russian Federation [Electronic resource]. URL: <https://base.garant.ru/72838946/> (available: 10.05.2025) (In Russ.)].

2. Нероев В.В., Зайцева О.В., Петров С.Ю., Брагин А.А. Применение искусственного интеллекта в офтальмологии: настоящее и будущее. *Российский офтальмологический журнал*. 2024; 17 (2): 135–41. [Neroev V.V., Zaytseva O.V., Petrov S.Yu., Bragin A.A. Artificial intelligence in ophthalmology: the present and the future. *Russian ophthalmological journal*. 2024; 17 (2): 135–41 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2024-17-2-135-141>
3. Gulshan V, Peng L, Coram M, et al. Development and validation of a deep learning algorithm for detection of DR in retinal fundus photographs. *JAMA*. 2016; 316 (22): 2402–10. doi: 10.1001/jama.2016.17216
4. Ting DSW, Cheung CY, Lim G, et al. Development and validation of a deep learning system for DR and related eye diseases using retinal images from multiethnic populations with DM. *JAMA*. 2017; 318 (22): 2211–23. doi: 10.1001/jama.2017.18152
5. Wu H, Zhao S, Zhang X, et al. Back-propagation artificial neural network for early DR detection based on a priori knowledge. *J Phys Conf Ser*. 2020; 1: 1437. doi: 10.1088/1742-6596/1437/1/012019
6. Krause J, Gulshan V, Rahimy E, et al. Grader variability and the importance of reference standards for evaluating machine learning models for DR. *Ophthalmology*. 2018; 125 (8): 1264–72. doi: 10.1016/j.ophtha.2018.01.034
7. Нероев В.В., Брагин А.А., Зайцева О.В. Разработка прототипа сервиса для диагностики ДР по снимкам глазного дна с использованием методов ИИ. *Национальное здравоохранение*. 2021; 2 (2): 64–72. [Neroev V.V., Bragin A.A., Zaytseva O.V. Development of a prototype service for the diagnosis of diabetic retinopathy based on fundus photos using artificial intelligence methods. *National Health Care (Russia)*. 2021; 2 (2): 64–72 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.47093/2713-069X.2021.2.2.64-72>
8. Нероев В.В., Брагин А.А., Зайцева О.В. Диагностика патологий сетчатки по снимкам оптической когерентной томографии с использованием инструментов искусственного интеллекта. *Российский офтальмологический журнал*. 2023; 16 (3): 47–53. [Neroev V.V., Bragin A.A., Zaytseva O.V. Diagnostics of retinal pathologies by optical coherence tomography images using artificial intelligence tools. *Russian ophthalmological journal*. 2023; 16 (3): 47–53 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2023-16-3-47-53>
9. Lois N, Cook JA, Wang A, et al. Evaluation of a new model of care for people with complications of DR: The EMERALD study. *Ophthalmology*. 2021; 128 (4): 561–73. doi: 10.1016/j.ophtha.2020.10.030
10. Мартусевич Я.А., Кобякова О.С., Люцко В.В. Ранний цифровой скрининг диабетической ретинопатии (обзор литературы). *Современные проблемы здравоохранения и медицинской статистики*. 2023; 4: 887–914. [Martusevich Ya.A., Kobjakova O.S., Liutsko V.V. Early digital screening for diabetic retinopathy (literature review). *Current problems of health care and medical statistics*. 2023; 4: 887–914 (In Russ.)].
11. Каталевская Е.А., Сизов А.Ю., Тюриков М.И., Владимиров Ю.В. и др. Алгоритмы ИИ для диагностики признаков ДР, ДМО, ВМД и аномалий витреомакулярного интерфейса. *Офтальмохирургия*. 2022; 4S: 58–69. [Katalevskaya E.A., Sizov A.Yu., Tyurikov M.I., Vladimirova Yu.V. Artificial intelligence algorithms for the diagnosis of signs of diabetic retinopathy, diabetic macular edema, age-related macular degeneration, vitreomacular interface abnormalities. *Fedorov journal of ophthalmic surgery*. 2022; 4S: 58–69 (In Russ.)]. doi: 10.25276/0235-4160-2022-4S-58-69
12. Перерва О.А., Ковалевская М.А. Оптимизация диагностики стадий ретинопатии недоношенных на основе интеграции клинических данных с использованием «Ключ к диагнозу — 1». *Российский офтальмологический журнал*. 2022; 15 (2): 68–78. [Pererva O.A., Kovalevskaya M.A. Optimization of diagnostics of retinopathy of prematurity stages based on the integration of clinical data using the Key to Diagnosis I software. *Russian ophthalmological journal*. 2022; 15 (2): 68–78 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2022-15-2-68-78>
13. Ковалевская М.А., Перерва О.А. Роль макулярного интерфейса в диагностике ретинопатии недоношенных и диабетической ангиоретинопатии. *Современные технологии в офтальмологии*. 2021; 3: 363–6. [Kovalevskaja M.A., Pererva O.A. The role of the macular interface in the diagnosis of retinopathy of prematurity and diabetic angioretinopathy. *Sovremennye tekhnologii v oftal'mologii*. 2021; 3: 363–6 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.25276/2312-4911-2021-3-363-366>
14. Wallace DK, Freedman SF, Zhao Z, Jung SH. Accuracy of ROPtool vs individual examiners in assessing retinal vascular tortuosity. *Arch Ophthalmol*. 2007 Nov; 125 (11): 1523–30. doi: 10.1001/archophth.125.11.1523
15. Оганов С.Р., Корнев Н.А. Окуломоторные характеристики как показатель сформированности навыка анализа письменного текста. *Специальное образование*. 2017; 3: 112–21. [Oganov C.R., Kornev N.A. Oculomotor characteristics as indicators of written text analysis skills formation in children aged 9–11 and 12–14. *Specialnoe obrazovanie*. 2017; 3: 112–21 (In Russ.)].
16. American Diabetes Association. Standards of Medical Care in Diabetes Abridged for Primary Care Providers. *Clinical Diabet*. 2019; 37 (1): 11–34.
17. International Council of Ophthalmology. ICO Guidelines for Diabetic Eye Care. San Francisco. 2023.

18. Cobelli C, Renard E, Kovatchev B. Artificial pancreas: past, present, future. *Diabetes*. 2011; 60 (11): 2672–82. doi: 10.2337/db11-0654
19. Нероев В.В., Зайцева О.В., Михайлова Л.А. Распространенность диабетической ретинопатии в Российской Федерации по данным федеральной статистики. *Российский офтальмологический журнал*. 2023; 16 (3): 7–11. [Neroev V.V., Zaitseva O.V., Mikhailova L.A. Diabetic retinopathy prevalence in the Russian Federation according to all-Russia statistics. *Russian ophthalmological journal*. 2023; 16 (3): 7–11 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2023-16-3-7-11>
20. Липатов Д.В. Диабет и глаз. Москва: ГЭОТАР-Медиа. 2021. [Lipatov D.V. Diabetes and the eye. Moscow: GEOTAR-Media. 2021 (In Russ.)].
21. Takahashi H, Tampo H, Arai Y, et al. Applying AI to disease staging: Deep learning for improved staging of DR. *PLoS One*. 2017; 12 (6): 179–89. doi: 10.1371/journal.pone.0179790
22. Pitkanen M, Kaikkonen O, Koskelainen A. A novel method for mouse retinal temperature determination based on ERG photoresponses. *Ann Biomed Eng*. 2017; 45 (10): 2360–72. doi: 10.1007/s10439-017-1872-y
23. Kozak I, Oster SF, Cortes MA, et al. Clinical evaluation and treatment accuracy in DME using navigated laser photocoagulation NAVILAS. *Ophthalmology*. 2011 Jun; 118 (6): 1119–24. doi: 10.1016/j.ophtha.2010.10.007
24. Шадричев Ф.Е., Краснощекова Е.Е. PASCAL — новая паттерн-сканирующая лазерная установка. *Офтальмологические ведомости*. 2010; 2: 48–52. [Shadrachev F.E., Krasnoshehkova E.E. PASCAL — a new semi-automatic pattern-scanning laser system. *Ofal'mologicheskie ведомosti*. 2010; 2: 48–52 (In Russ.)].
25. Терешенко А.В., Трифаненкова И.Г., Сидорова Ю.А., Фирсова В.В., Шаулов В.В. Эволюция транспупиллярной лазерной коагуляции сетчатки в лечении активной ретинопатии недоношенных: от режима одиночного импульса до навигационного сопровождения. *Офтальмохирургия*. 2024; 2: 60–7. [Tereshchenko A.V., Trifanenkova I.G., Sidorova Yu.A., Firsova V.V., Shaulov V.V. Evolution of transpupillary laser coagulation of the retina in the treatment of active retinopathy of prematurity: from single pulse mode to navigational support. *Fyodorov journal of ophthalmic surgery*. 2024; 2: 60–7 (In Russ.)]. doi: 10.25276/0235-4160-2024-2-60-67
26. Сахарный диабет: ретинопатия диабетическая, макулярный отек диабетический (клинические рекомендации). Москва. 2023. [Diabetes mellitus: diabetic retinopathy, diabetic macular edema (clinical guidelines). Moscow. 2023 (In Russ.)].
27. Бобыкин Е.В., Морозова О.В., Береснева Н.С. Лечение заболеваний макулы: резюме ключевых рандомизированных клинических исследований. Российский офтальмологический журнал. 2021; 14 (4): 137–48. [Bobykin E.V., Morozova O.V., Beresneva N.S. Treatment of macular diseases: an overview of key randomized clinical trials. *Russian ophthalmological journal*. 2021; 14 (4): 137–48 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2021-14-4-137-148>
28. Файзрахманов Р.Р., Павловский О.А., Карпов Г.О. Патогенетические механизмы макулярных разрывов: обзор текущих исследований. *Российский офтальмологический журнал*. 2023; 16 (2): 183–7. [Fayzrakhmanov R.R., Pavlovsky O.A., Karpov G.O. Pathogenetic mechanisms of macular holes: a review of recent research work. *Russian ophthalmological journal*. 2023; 16 (2): 183–7 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2023-16-2-183-187>
29. Шадричев Ф.Е., Григорьева Н.Н., Рождественская Е.С. Антиангиогенная терапия при диабетическом макулярном отеке. *Офтальмологические ведомости*. 2018; 11 (4): 51–66. [Shadrachev F.E., Grigorieva N.N., Rozhdstvenskaya E.S. Anti-angiogenic therapy for diabetic macular edema. *Ofal'mologicheskie ведомosti*. 2018; 11 (4): 51–66 (In Russ.)]. doi: 10.17816/OV11451-66
30. Fischer N, Narayanan R, Loewenstein A, Kuppermann BD. Drug Delivery to the Posterior Segment of the Eye. *European Journal of Ophthalmology*. 2010; 21 (6 suppl): 20–6. doi:10.5301/EJO.2010.6051
31. Holekamp NM, Campochiaro PA, Chang MA, et al; all Archway Investigators. Archway randomized phase 3 trial of the port delivery system with ranibizumab for neovascular age-related macular degeneration. *Ophthalmology*. 2022 Mar; 129 (3): 295–307. doi: 10.1016/j.ophtha.2021.09.016
32. Adamis AP, Bantsev V, Chiang Y, et al. The Port delivery system with ranibizumab for neovascular age-related macular degeneration: results from the randomized phase 2 ladder clinical trial. *Ophthalmology*. 2019 Aug; 126 (8): 1141–54. doi: 10.1016/j.ophtha.2019.03.036
33. Klouda L. Thermoresponsive hydrogels in biomedical applications: A seven-year update. *Eur J Pharm Biopharm*. 2015 Nov; 97 (Pt B): 338–49. doi: 10.1016/j.ejpb.2015.05.017
34. Дедов И.И., Шестакова М.В., Майоров А.Ю., ред. Алгоритмы специализированной медицинской помощи больным сахарным диабетом. 2023; 11-й выпуск. Москва: УП ПРИНТ. [Dedov I.I., Shestakova M.V., Mayorov A.Yu., eds. Algorithms of specialized medical care for patients with diabetes mellitus. 2023; 11th issue. Moscow: UP PRINT (In Russ.)].
35. Бобыкин Е.В., Файзрахманов Р.Р., Голубев С.Ю. и др. Результаты первого российского опроса врачей-ретинологов «СЕТЧАТОЧКАRU». *Российский офтальмологический журнал*. 2025; 18 (2): 7–27. [Bobykin E.V., Fayzrakhmanov R.R., Golubev S.Yu., et al. Results of the first Russian survey of retinologists “SETCHATOKHARU”. *Russian ophthalmological journal*. 2025; 18 (2): 7–27 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2025-18-2-7-27>
36. Чупров А.Д., Лосицкий А.О., Фирсов А.С. Социально-экономические аспекты скрининга диабетической ретинопатии с использованием телемедицинских технологий. *Современные технологии в офтальмологии*. 2019; 2: 20–2. [Chuprov A.D., Losickij A.O., Firsov A.S. Socio-economic aspects of screening diabetic retinopathy using telemedicine technologies. *Sovremennye tehnologii v ofal'mologii*. 2019; 2: 20–2 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.25276/2312-4911-2019-2-20-22>

Вклад авторов в работу: В.В. Нероев — формулировка идеи, цели и задач обзора, финальное редактирование и утверждение рукописи для публикации; Д.В. Липатов, О.В. Зайцева — сбор и систематизация данных, написание и редактирование статьи; А.А. Брагин — статистическая обработка, разработка и анализ инструментов распознавания патологий сетчатки.

Authors' contribution: V.V. Neroev — formulation of the idea, goals and objectives of the review, final editing and approval of the article for publication; D.V. Lipatov, O.V. Zaitseva — data collection and systematization, writing and editing of the article; A.A. Bragin — statistical processing, development and analysis of retinal pathology recognition tools.

Поступила: 02.06.2025. Переработана: 18.06.2025. Принята к печати: 18.06.2025

Originally received: 02.06.2025. Final revision: 18.06.2025. Accepted: 18.06.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

¹ ФГБУ «НМИЦ глазных болезней им. Гельмгольца» Минздрава России, ул. Садовая-Черногрязская, д. 14/19, Москва, 105062, Россия

² ФДПО ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России, ул. Деlegatesкая, д. 20, стр. 1, Москва, 127473, Россия

Владимир Владимирович Нероев — академик РАН, д-р мед. наук, профессор, директор¹, заведующий кафедрой глазных болезней², ORCID 0000-0002-8480-0894

Дмитрий Валентинович Липатов — д-р мед. наук, заведующий отделением организационного обеспечения¹, ORCID 0000-0002-2998-3392

Ольга Владимировна Зайцева — канд. мед. наук, заместитель директора по организационно-методической работе¹, доцент кафедры глазных болезней², ORCID 0000-0003-4530-553X

Алексей Александрович Брагин — канд. техн. наук, начальник отдела информационных технологий¹, ORCID 0000-0002-5331-632X

Для контактов: Дмитрий Валентинович Липатов, glas1966@rambler.ru

¹ Helmholtz National Medical Research Center of Eye Diseases, 14/19, Sadovaya-Chernogryazskaya St., Moscow, 105062, Russia

² FDPO of the Russian University of Medicine, 20, build. 1, Delegateskaya St., Moscow, 127473, Russia

Vladimir V. Neroev — Dr. of Med. Sci., academician of the Russian Academy of Sciences, professor, director¹, head of chair of eye diseases², ORCID 0000-0002-8480-0894

Dmitry V. Lipatov — Dr. of Med. Sci., head of the organizational support department¹, ORCID 0000-0002-2998-3392

Olga V. Zaitseva — Cand. of Med. Sci., deputy director for organizational and methodological work¹, associate professor, chair of eye diseases², ORCID 0000-0003-4530-553X

Alexey A. Bragin — Cand. of Techn. Sci., head of the information technology department¹, ORCID 0000-0002-5331-632X

For contacts: Dmitry V. Lipatov, glas1966@rambler.ru