

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ДИАГНОСТИКА ДИАБЕТИЧЕСКОЙ РЕТИНОПАТИИ (обзор)

Бахритдинова Ф. А.<sup>1</sup>, Кангилбаева Г. Э.<sup>2</sup>, Урманова Ф. М.<sup>3</sup>, Набиева И. Ф.<sup>4</sup>, Журабекова А. З.<sup>5</sup>

1. Доктор медицинских наук, профессор кафедры офтальмологии, Ташкентская медицинская академия, bakhritdinova@mail.ru, +998(93)390-06-96, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6252-3622>
2. PhD, ассистент кафедры офтальмологии, Ташкентская медицинская академия, doctorguzal70@gmail.com, +998(97)709-47-39, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6376-6992>
3. Кандидат медицинских наук, ассистент кафедры офтальмологии, Ташкентский государственный стоматологический институт, firuza2008@list.ru, +998(91)164-77-20, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0876-2053>
4. PhD, зав приемным отделением, Республиканский специализированный научно-практический медицинский центр эндокринологии, Iroda.fayzullaevna@mail.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8795-017X>
5. Магистр медицинских наук, врач, Глазная клиника Назар, aziza0111@gmail.com, +998(99)848-18-91, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9620-2771>

**Аннотация. Актуальность.** Диабетическая ретинопатия (ДР) является одним из грозных осложнений сахарного диабета (СД). При несвоевременной диагностике и неадекватном лечении ДР может привести к потере зрения вследствие таких осложнений, как гемофтальм и отслойка сетчатки. **Цель исследования.** Целью данной работы явилось изучение эволюции автоматизированной диагностики диабетической ретинопатии, начиная от визуализации и автоматической сегментации изображений глазного дна до диагностики стадий ДР, с помощью алгоритмов глубокого обучения в программах искусственного интеллекта. **Материалы и методы.** Поиск опубликованных работ в PubMed, ScienceDirect и подобных поисковых системах исследований, с 2006 по 2023 год, с использованием комбинации ключевых слов в медицинской сфере (офтальмология, диабетическая ретинопатия, скрининг) и в области машинного обучения (искусственный интеллект, глубокое обучение, нейронная связь), позволил нам выявить 160 публикаций, анализ которых нами проведен. Статья сформирована путем последовательного анализа различных компьютерных программ по мере их усложнения. **Результаты и заключение.** Стремительно разрабатываемые в последние годы программы искусственного интеллекта, успешно используются для диагностики нарушений зрения при ДР. Программы искусственного интеллекта продемонстрировали чувствительность в диапазоне 82–99,1% и специфичность в диапазоне 63–90% при выявлении ДР, резко снижающей зрение. Программы искусственного интеллекта, несомненно, помогут врачам своевременно диагностировать ДР, даже в начальных стадиях ее развития. Программы скрининга с ИИ помогут охватить население в труднодоступных, густонаселенных районах, не затрачивая при этом особых финансовых средств. Авторы надеются, что подобные программы, использующие искусственный интеллект для диагностики ДР, станут доступным способом диагностики осложнений у пациентов с сахарным диабетом в стране.

**Ключевые слова:** диабетическая ретинопатия, искусственный интеллект, скрининговые программы, угрожающее зрению стадии, алгоритм глубокого обучения.

### Для цитирования:

Бахритдинова Ф. А., Кангилбаева Г. Э., Урманова Ф. М., Набиева И. Ф., Журабекова А. З. Автоматизированная диагностика диабетической ретинопатии. Передовая офтальмология. 2024; 8(2):11-18.

## AUTOMATED DIAGNOSIS OF DIABETIC RETINOPATHY (review)

Bakhritdinova F. A.<sup>1</sup>, Kangilbaeva G. E.<sup>2</sup>, Urmanova F. M.<sup>3</sup>, Nabieva I. F.<sup>4</sup>, Jurabekova A. Z.<sup>5</sup>

1. DSc, Professor of the Department of Ophthalmology, Tashkent Medical Academy, bakhritdinova@mail.ru, +998(93)390-06-96, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6252-3622>
2. PhD, Assistant of the Department of Ophthalmology, Tashkent Medical Academy, doctorguzal70@gmail.com, +998(97)709-47-39, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6376-6992>
3. PhD, Assistant of the Department of Ophthalmology, Tashkent State Dental Institute, firuza2008@list.ru, +998(91)164-77-20, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0876-2053>
4. PhD, head of the department, Republican specialized scientific and practical medical center of endocrinology, Iroda.fayzullaevna@mail.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8795-017X>
5. MD, Nazar Medical Eye Clinic, aziza0111@gmail.com, +998(99)848-18-91, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9620-2771>

**Abstract. Relevance.** Diabetic retinopathy (DR) is one of the serious complications of diabetes mellitus (DM). If diagnosed untimely and treated inadequately, DR can lead to vision loss due to complications such as hemophthalmos and retinal detachment. **Purpose of the study.** The aim of this study was to explore the evolution of automated diagnosis of diabetic retinopathy from visualization and automatic segmentation of the ocular fundus imaging to the diagnosis of stages

of diabetic retinopathy by deep learning algorithms in artificial intelligence programs. **Materials and methods.** In this study we conducted a search on PubMed, ScienceDirect, and similar search engines for studies published from 2006 to 2023 using a combination of keywords in the medical field (ophthalmology, diabetic retinopathy, screening) and in the field of machine learning (artificial intelligence, deep learning, neural connectivity). We identified 160 articles and incorporated them into the analysis. The paper is organized as follows: we sequentially analyzed different computer programs as they became more complex. **Results and conclusion.** Artificial intelligence programs, rapidly developing in recent years, are successfully used to diagnose vision-threatening diabetic retinopathy. Artificial intelligence programs have demonstrated sensitivity ranging from 82–99.1% and specificity ranging from 63–90% in detecting vision-threatening diabetic retinopathy. Artificial intelligence programs will undoubtedly help doctors timely diagnose vision-threatening diabetic retinopathy. AI-enabled screening programs will help reach hard-to-reach, densely populated, low-income areas. The authors hope that similar programs that use artificial intelligence to diagnose diabetic retinopathy will become widely available throughout the world.

**Key words:** diabetic retinopathy, artificial intelligence, screening programs, vision-threatening stages, deep learning algorithms.

#### For citation:

Bakhritdinova F. A., Kangilbaeva G. E., Urmanova F. M., Nabieva I. F., Jurabekova A. Z. Automated diagnosis of diabetic retinopathy. *Advanced Ophthalmology*. 2024;8(2):11-18.

## DIABETIK RETINOPATIYANI AVTOMATLASHTIRILGAN USULDA TASHHISLASH

Bakhritdinova F. A.<sup>1</sup>, Kangilbayeva G. E.<sup>2</sup>, Urmanova F. M.<sup>3</sup>, Nabiyeva I. F.<sup>4</sup>, Jurabekova A. Z.<sup>5</sup>

1. Tibbiyot fanlari doktori, Oftalmologiya kafedrasini professori, Toshkent tibbiyot akademiyasi, bakhritdinova@mail.ru, +998(93)390-06-96, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6252-3622>
2. PhD, Oftalmologiya kafedrasini assistenti, Toshkent tibbiyot akademiyasi, doctorguzal70@gmail.com, +998(97)709-47-39, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6376-6992>
3. Tibbiyot fanlari nomzodi, Oftalmologiya kafedrasini assistenti, Toshkent davlat stomatologiya instituti, firuza2008@list.ru, +998(91)164-77-20, ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0876-2053>
4. PhD, qabul bo'limi mudiri, Respublika ixtisoslashtirilgan ilmiy-amaliy endokrinologiya tibbiyot markazi, Iroda.fayzullaevna@mail.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8795-017X>
5. Tibbiyot fanlari magistri, Nazar Medical Eye Clinic, aziza0111@gmail.com, +998(99)848-18-91, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9620-2771>

**Annotatsiya. Dolzarbligi.** Diabetik retinopatiya (DR) qandli diabetning jiddiy asoratlaridan biridir. Agar o'z vaqtida tashxis qo'yilmasa va etarli darajada davolanmasa, DR gemoftalm va to'r pardani ko'chishi kabi asoratlarni tufayli ko'rishning yo'qolishiga olib kelishi mumkin. **Tadqiqot maqsadi.** Diabetik retinopatiyaning avtomatlashtirilgan diagnostikasi evolyutsiyasini ko'z tubi tasvirlarini vizualizatsiya va avtomatik segmentatsiyadan sun'iy intellekt dasturlarida chuqur o'rganish algoritmlaridan foydalangan holda diabetik retinopatiya bosqichlari diagnostikasigacha o'rganish edi. **Materiallar va uslublar.** Ushbu tadqiqotda biz PubMed, ScienceDirect va shunga o'xshash qidiruv tizimlarida 2006 yildan 2023 yilgacha nashr etilgan tadqiqotlar uchun tibbiy sohadagi kalit so'zlar (oftalmologiya, diabetik retinopatiya, skrining) va mashinali o'rganish (sun'iy intellekt, chuqur o'rganish neyron aloqasi) kombinatsiyasidan foydalangan holda qidiridik. Biz 160 ta maqolani aniqlab, tahlilga kiritdik. Maqola quyidagicha tashkil etilgan: biz turli xil kompyuter dasturlarini ularning murakkabligiga qarab ketma-ket tahlil qildik. **Natijalar va xulosa.** So'nggi yillarda jadal rivojlanayotgan sun'iy intellekt dasturlari ko'rish uchun xavfli diabetik retinopatiyani tashxislash uchun muvaffaqiyatli qo'llanilmoqda. Sun'iy intellekt dasturlari ko'rish uchun xavfli diabetik retinopatiyani aniqlashda sezgirlikni 82–99,1% va o'ziga xoslik 63–90% gacha ko'rsatdi. Sun'iy intellekt dasturlari, shubhasiz, shifokorlarga ko'rish uchun xavfli diabetik retinopatiyani o'z vaqtida tashxislashda yordam beradi. Sun'iy intellektli skrining dasturlari borish qiyin, aholi zich joylashgan va kam daromadli hududlarda keng qamrovli qo'llanilishida yordam beradi. Mualliflar diabetik retinopatiyani tashxislash uchun sun'iy intellektdan foydalanadigan shunga o'xshash dasturlar butun dunyoda keng tarqalgan bo'lishiga umid qilmoqda.

**Kalit so'zlar:** diabetik retinopatiya, sun'iy intellekt, skrining dasturlar, ko'rish uchun xavfli bosqichlar, chuqur o'rganish algoritmi.

#### Iqtibos uchun:

Bakhritdinova F. A., Kangilbayeva G. E., Urmanova F. M., Nabiyeva I. F., Jurabekova A. Z. Diabetik retinopatiyani avtomatlashtirilgan usulda tashxislash. *Ilgor oftalmologiya*. 2024;8(2):11-18.

**Актуальность.** Диабетическая ретинопатия (ДР) является одним из осложнений сахарного диабета (СД). При запоздалой диагностике и неадекватном лечении ДР может привести к потере зрения вследствие таких осложнений, как гемофтальм и отслойка сетчатки. Поэтому

актуальным является наблюдение за больными СД, скрининг пациентов путем своевременной диагностики ДР [1,2,3]. Как известно, качественный осмотр глазного дна требует высокой специализации и опыта, а также времени. На каждого пациента для осмотра глазного дна с помощью

офтальмоскопа или биомикроскопа с использованием линз тратится в среднем 30 мин. При среднем приеме в день – количество пациентов составляет 40–50 человек. Понятно, что при таком режиме качественно осмотреть пациентов очень сложно, так как диагностика мелких изменений на глазном дне очень сложна и требует немалых сил и опыта врача. В результате, увеличивается вероятность врачебных ошибок.

В последнее время по всему миру широко внедряются различные компьютеризированные диагностические системы для облегчения работы врача. Система компьютерной диагностики включает в себя такие этапы, как обнаружение, сегментация и классификация поражений на изображениях глазного дна. Многие традиционные методы машинного обучения (ML), основаны на функциях, созданных вручную. Недавнее появление глубокого обучения (DL) и его решительная победа над традиционными методами ML для различных приложений, побудили исследователей использовать последний для диагностики метод DR [4,5,6].

**Цель исследования.** Целью данной статьи данной работы явилось изучение эволюции автоматизированной диагностики диабетической ретинопатии, начиная от визуализации и автоматической сегментации изображений глазного дна до диагностики стадий ДР с помощью алгоритмов глубокого обучения в программах искусственного интеллекта. Также будут показаны существующие ограничения и перспективные направления дальнейшего совершенствования в этой области.

**Материалы и методы.** Мы провели поиск статей в базе данных PubMed, ScienceDirect и других аналогичных поисковых сайтах, используя комбинацию ключевых слов в разделе медицине (офтальмология, диабетическая ретинопатия, скрининг) и в разделе машинное обучение (искусственный интеллект, глубокое обучение, нейронные связи). Основным направлением нашей статьи было фокусирование исследования на использовании искусственного интеллекта в диагностике ДР. Несколько публикаций по смежным темам (диагностика артериовенозных нарушений, отека зрительного нерва) были также включены, в итоге были проанализированы 47 публикаций. Эта статья основана на основе ранее проведенных исследований и их систематизации и не содержит новых исследований с участниками-людьми или животными.

**Результаты и обсуждение.** Для большего охвата населения во время скрининга необходимы фундус-камеры, способные получить качественное изображение глазного дна без расширения зрачка (немидриатические камеры) [7]. Maximilian W. M. Wintergerst и др. [8] предложили визуализацию глазного дна с помощью адаптера на смартфоне (SBFI), что позволяет проводить недорогое мобильное обследование глазного дна

во время скрининга в странах с низким и средним уровнем дохода, а также в труднодоступных районах. Полученные таким образом изображения могут быть проанализированы как самими офтальмологами, так и с помощью автоматических алгоритмов.

Jaemin Son и др. из Сеульского Национального университета разработали алгоритм изучения глазного дна, с помощью которого выявляют кровоизлияния, твердые экссудаты, мембраны, макулярное отверстие, миелинизированные нервные волокна и глаукоматозные изменения диска. Интерпретируемые, а также надежные результаты этой программы открывают возможность клинического использования в качестве автоматизированной системы скрининга изображений глазного дна [9].

Shahzad Akbar, Taimur Hassan и др. предложили набор данных изображений глазного дна, который превосходил другие наборы показателей, позволяя исследователям автоматически диагностировать нарушения в сетчатке: изменения соотношения калибров артерий и вен, отек диска зрительного нерва, появление твердых и мягких ватообразных экссудатов [10,11].

P. Kahai et al. предложили Систему Обеспечения Решений (DSS), для автоматического скрининга ранних признаков ДР. Классификационная схема этой системы делает заключение о наличии или отсутствии ДР по манифестации микроаневризм. Чувствительность этой системы – 100%, специфичность – 67% [12].

Manal Bouhaimed et al из Kuwait University в своих исследованиях оценили оперативные характеристики программного обеспечения Retalyze System, Horsholm, Denmark в ходе автоматического прескрининга изображений глазного дна ДР. Автоматическое выявление красных поражений сетчатки (микроаневризмы, кровоизлияния) имело 82% чувствительности, 75% специфичности, 41% прогностичности положительного результата и 95% прогностичности отрицательного результата. В заключении авторы утверждают, что данное программное обеспечение даёт минимальный ложно-отрицательный результат и может помочь уменьшить нагрузку при скрининге ДР [13].

Последние 10 лет появилось множество свидетельств о применении глубокого обучения – Deep learning (DL) в диагностике ДР [14]. Это новый метод машинного обучения искусственного интеллекта. Алгоритм DL считается четвертой промышленной революцией. Он основан на изучении признаков ДР, обрабатывает большое количество данных и извлекает из них значимые закономерности. При глубоком нейронном обучении сверточные нейронные сети (CNN) учатся выполнять свои задачи посредством повторения и самокоррекции. Алгоритм CNN обучается, анализируя помеченный

обучающий набор изображений, оцененных экспертами, и предоставляет диагностический результат. Если диагностика сети неверна, алгоритм соответствующим образом корректирует свои параметры, чтобы уменьшить ошибку. Сеть повторяет процесс для каждого изображения до тех пор, пока вывод системы не совпадет с выводом людей-экспертов. Как только алгоритм оптимизируется, он готов работать с неизвестными изображениями. Глубокие нейронные сети могут обнаруживать тонкие изменения, закономерности или аномалии, которые иногда могут быть упущены экспертами-людьми.

Одно из первых исследований по автоматическому обнаружению ДР по цветным фотографиям глазного дна было проведено Abramoff с соавторами в 2008 году [15]. Это был ретроспективный анализ немидриатических изображений из проекта скрининга EyeCheck DR. Авторы смогли обнаружить ДР с чувствительностью 84% и специфичностью 64%. В 2013 году Абрамофф и соавт. [16] опубликовали результаты чувствительности и специфичности программы Iowa Detection Program (IDP) для определения ДР и обнаружили высокую чувствительность 96,8% и специфичность 59,4%.

В Юго-Западном государственном университете Курска на кафедре биомедицинской инженерии Брежнева А. Н. с соавторами разработали методы и алгоритмы морфологического анализа изображений глазного дна для автоматизированной диагностики ДР. В работе использовались методология искусственного интеллекта, методы морфологического анализа изображений, теории нейронных сетей. Проведенные клинические испытания автоматизированной системы показали, что ее показатели качества при выявлении больных ДР, в среднем, превосходят на 14% аналогичные системы такого же назначения, что позволяет рекомендовать ее использование в клинической практике для скрининга населения [17].

В Шанхайском Центре профилактики и лечения глазных болезней Yi Xu с соавторами разработали систему обработки и анализа изображений для скрининга DR – SmartEye. По результатам изучения 19 904 изображений глазного дна в ходе скрининговой программы 2016–2017 были оценены производительность скрининга и точность системы SmartEye для диагностики ДР и ее стадий. Чувствительность для диагностики отсутствия ДР, легкой непролиферативной диабетической ретинопатии (НПДР), умеренной НПДР, тяжелой НПДР, пролиферативной диабетической ретинопатии (ПДР) составляют 86%, 83%, 89%, 89% и 85% соответственно. Специфичность составляет 63%, 71%, 64%, 70% и 75% соответственно. Система Smart Eye обладает высокой диагностической точностью в программе скрининга ДР с использованием немидриатической фундус камеры.

Количественный анализ SmartEye может быть инновационным и многообещающим методом диагностики и оценки ДР [18].

В центре Визуальных информационных технологий (CVIT) совместно с Международным институтом информационных технологий Хайдарабада (IIIT-H) в 2011 году было разработано новое веб-решение для телескрининга (DrishtiCare), объединяющее различные дополнительные компоненты для анализа изображения глазного дна. Веб-платформа предоставлена на основе модели программного обеспечения сервиса (SaaS), что сделало сервис экономически эффективным, простым в использовании и масштабируемым. Предлагаемый подход обеспечивает инновационный способ интеграции автоматизированного анализа изображений глазного дна в телескрининг для решения хорошо известных проблем в крупномасштабном скрининге заболеваний. Он предлагает недорогое, эффективное и легко адаптируемое решение для скрининга населения [19]. Сервис выделяет ту или иную патологию сетчатки, но диагностику тяжести ДР проводит специалист-эксперт.

Sajib Kumar Saha с соавторами применяли ИИ для оценки изображений глазного дна, полученных с разных фундус-камер. Предлагаемый авторами автоматизированный метод оценки качества изображений глазного дна принимает решения: «принять» или «отклонить» и при клиническом испытании показывает 97% совпадение с оценщиком-человеком. Изображение, отнесенное к категории «отклонить», потребует повторного фотографирования глазного дна [20].

Varun Gulshan с соавторами применили глубокое обучение для создания алгоритма автоматического обнаружения диабетической ретинопатии и диабетического макулярного отека на фотографиях глазного дна сетчатки. В работе были использованы набор данных EyePACS-1, включающий 9963 изображений от 4997 пациентов и набор данных Messidor-2, содержащий 1748 изображений от 874 пациентов. Для обнаружения ДР алгоритм имел площадь под полученной оперативной кривой 0,991 (95% CI, 0,988–0,993) для EyePACS-1 и 0,990 (95% CI, 0,986–0,995) для Messidor-2 [21].

Ramachandran Rajalakshmi с соавторами оценили роль ИИ в диагностике ДР и выявлении угрожающих зрению ДР, по фотографиям глазного дна, полученных с помощью фундус камер на смартфоне. Снимки сетчатки оценивали с помощью проверенного программного обеспечения Eye Art для скрининга ДР на основе ИИ. Чувствительность и специфичность автоматизированной классификации оценивались и подтверждались в сравнении с оценками офтальмологов. Программное обеспечение на основе ИИ показало 95,8% чувствительности и 80,2% специфичности

для обнаружения любой ДР, и 99,1% чувствительности и 80,4% специфичности при выявлении угрожающих зрению ДР [22].

В. В. Нероев с соавторами разработали прототип сервиса для диагностики диабетической ретинопатии по снимкам глазного дна с использованием методов ИИ. Прототип создан при помощи методов машинного обучения с использованием языка Python и фреймворка Django. Для обучения использован датасет Messidor (1200 глаз). Чувствительность прототипа в ходе первого этапа экспериментов, составляет 85% – на обучающей выборке и 65% – на тестовой выборке [23].

Ali Serener с соавтором провели исследование, направленное на сравнение результатов диагностики ДР с помощью систем глубокого обучения ИИ ResNet на изображениях глазного дна пациентов различной географической принадлежности и различных этнических групп. В работе было показано, что если для обучения использован набор данных Kaggle (USA) и Messidor (French), то программа дает низкий результат на тестировании изображениях глазного IDRID (Индия): 58,54% точности, 56,54% чувствительности и 72% специфичности. Если для обучения использован только Kaggle (USA), то при тестировании на изображениях E-Optha (Франция) получено 56,25% точности, 55,59% чувствительности и 57,43% специфичности [24].

Yusaku Katada с коллегами сравнили эффективность системы машинного обучения с использованием ИИ, обученную на 35,126 изображений глазного дна из американской базы данных EyePACS в диагностике ДР на изображениях глазного дна американцев и японцев. Эта модель ИИ показала 81,5% чувствительности и 71,9% специфичности на изображениях глазного дна американцев и 90,8% – 80,0% соответственно при диагностике 200 изображений глазного дна японцев из университетского госпиталя Кейо. Авторы, в отличие от Ali Serener [33] делают вывод, что модель ИИ, обученная на американской базе данных, может быть с успехом применима для диагностики ДР на изображениях глазного дна японцев, а также может использоваться как межрасовая скрининг-модель в системе телемедицины [25].

Harshvardhan Chawla с соавторами обследовали с помощью ручной офтальмоскопии 823 глаза у 413 пациентов после диагностики с помощью ИИ рекомендуемой и нерекомендуемой ДР. Распространенность выявленных изменений диска зрительного нерва, подозрительных на глаукоматозные, составила 4,8% и 20,6% соответственно. Поэтому авторы утверждают, что для того, чтобы скрининговые программы заменили ручное обследование, необходимы скрининговые платформы на основе ИИ, способные выявлять множественные широко распространенные офтальмологические заболевания, включая глаукому [26].

Jennifer Irene Lim at al. сравнили диагностику более чем легкой ДР (mtmDR) с помощью программы EyeArt с искусственным интеллектом, ретинальных специалистов и общих офтальмологов. Система EyeArt обладала более высокой чувствительностью для выявления mtmDR, чем специалисты по сетчатке или офтальмологи общего профиля (97,3% против 59,5% и 20,6% соответственно), по сравнению с эталонным клиническим стандартом. К недостаткам системы можно отнести несколько более низкую специфичность (86,3% против 98,9% и 99,8% соответственно), что может привести к чрезмерному обращению, хотя значительная часть ложноположительных результатов (т.е. чрезмерных обращений) имели легкую форму непролиферативной ДР или другие глазные патологии, которые нуждаются в оценке офтальмолога [27].

Wanjiku Mathenge at al. провели исследование по использованию программы Rwanda Artificial Intelligence for Diabetic Retinopathy Screening (RAIDERS) в местностях с ограниченными ресурсами. Авторы сделали вывод о том, что это исследование продемонстрировало потенциал скрининга ДР с использованием ИИ для увеличения охвата населения в странах с низким и средним уровнем дохода. Результаты испытания RAIDERS предоставили доказательства интеграции ИИ для скрининга DR как часть устойчивой национальной офтальмологической программы для предотвращения слепоты, связанной с ДР в странах Африки к югу от Сахары [28].

A. Mehra с соавторами изучили реальные результаты телемедицинского скрининга диабетической ретинопатии (ДР) с помощью анализа изображений на основе искусственного интеллекта (ИИ), рефлекторной дилатации и повторного считывания вторичного изображения в условиях первичной медико-санитарной помощи. Сто тридцать восемь из 965 пациентов (14,3%) были классифицированы как «положительные» (выше легкого NPDR), а 827 из 965 были «отрицательными» (85,7%) со 100% чувствительностью, 89,2% специфичностью. Авторы пришли к выводу, что использование ИИ в скрининге диабетической ретинопатии в условиях первичной медико-санитарной помощи в реальных условиях обеспечило превосходный результат без ложноотрицательных ответов [29].

Xiaoting Pei с соавторами изучили эффективность скрининга 549 пациентов с сахарным диабетом 2 типа с помощью двух систем (Eye Wisdom DSS и Eye Wisdom MCS) на основе ИИ с оценкой двух ретинальных специалистов в качестве эталонного стандарта. Чувствительность и специфичность системы Eye Wisdom DSS составила 91,0% и 81,3%, тогда как система Eye Wisdom MCS правильно идентифицировала 76,2% пациентов с ДР и 92,4% пациентов без ДР. Таким

образом, система Eye Wisdom DSS эффективна при скрининге ДР, а точность Eye Wisdom MCS была выше при выявлении пациентов без ДР. Авторы делают вывод, что целесообразно и эффективно проводить скрининг ДР на основе ИИ в бедных и густонаселенных регионах Китая [30].

Gwenolé Quellec с соавторами предлагают алгоритм на основе ИИ, названный «ExpIAIn», с помощью которого можно диагностировать отсутствие ДР, легкую НПДР, умеренную и тяжелую НПДР. Этот алгоритм учится сегментировать и классифицировать поражения на изображениях; окончательная классификация на уровне изображения напрямую вытекает из этих многомерных сегментаций поражений [31].

Paisan Ruamviboonsuk и его коллеги сообщают о клинической системе глубокого обучения, интегрированной для пункта первичного звена медицинской помощи, как части Национальной программы скрининга диабетической ретинопатии в Таиланде. Авторы описывают преимущества этой системы в сравнении с диагностикой местными ретиальными специалистами. Эталонный стандарт был установлен группой из трех сертифицированных специалистов по сетчатке глаза США. Система глубокого обучения показала более высокую чувствительность (91,4% против 84,8%) и подобную специфичность (95,4% против 95,5%). Исследование авторов очень важно для страны в социально-экономическом плане и будет продолжаться [32].

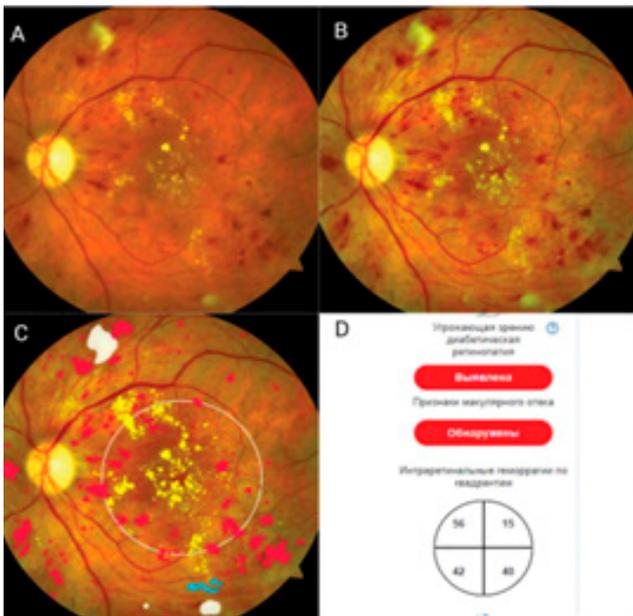


Рис. 1. Пример анализа фотографии глазного дна пациента с пролиферативной ДР алгоритмом автоматической сегментации [Габараев Г. М. и др.]

Fig 1. An example of analyzing a photograph of the fundus of a patient with proliferative DR using an automatic segmentation algorithm [Gabaraev G. M. et al.]

Yuchen Xie с коллегами оценили потенциальную экономию при двух видах скрининга пациентов с сахарным диабетом с использованием глубокого обучения: полуавтоматической модели в качестве сортировочного фильтра для последующей оценки человеком и полностью автоматизированной модели без участия человека в сравнении со скринингом, осуществляемым офтальмологами. С точки зрения системы здравоохранения полуавтоматическая модель скрининга была самой дешевой из существующих трех моделей по цене 62 доллара США на пациента в год. Полностью автоматизированная модель стоила 66 долларов на пациента в год, а человеческая модель оценки составляла 77 долларов на пациента в год. Экономия в системе здравоохранения Сингапура, связанная с переходом на полуавтоматическую модель оценили в 489 000 долларов США, что составляет примерно 20% от расходов текущего ежегодного скрининга [33].

Mira Hayati с коллегами (Индонезия) показали результаты использования адаптивной коррекции гистограммы с ограниченным контрастом (CLANE) для улучшения классификации ДР через ИИ. Авторы показали, что средняя точность метода выше на нескольких моделях: 91% для модели VGG16, 95% для InceptionV3 и 97% для Efficient Net, чем точность диагностики с исходных изображений (87% для модели VGG16, 90% для модели InceptionV3 и 95% для модели Efficient Net). Результаты этой комплексной оценки могут быть



Рис. 2. Пример анализа фотографии глазного дна пациента с умеренной непролиферативной ДР алгоритмом автоматической сегментации [Габараев Г. М. и др.]

Fig 2. An example of analysis of a photograph of the fundus of a patient with moderate non-proliferative DR using an automatic segmentation algorithm (Gabaraev G. M. et al.)

полезны при компьютерной диагностике диабетической ретинопатии [34].

Fernando C. Monteiro предложил смешанный подход глубокого обучения нескольких отдельных моделей DL с использованием метода 5-кратной перекрестной проверки и объединения их прогнозов в окончательный результат. Эта смешанная модель выделяет каждую отдельную модель там, где она работает лучше всего, и дискредитирует ее там, где она работает плохо, увеличивая надежность результатов. Эксперименты проводились на сбалансированном наборе данных ДР, содержащем 33310 изображений глазного дна сетчатки. Автор сделал вывод, что предложенная модель превосходит индивидуальную оценку каждой из доступных моделей глубокого обучения DL [35].

Габараев Г. М. с коллегами апробировал программное обеспечение (ПО) на основе алгоритмов автоматической сегментации признаков ДР «Retina AI» в клинической практике. Программа определяла легкую и умеренную неproлиферативную ДР, как «отсутствие угрожающей зрению ДР», а тяжелую неproлиферативную ДР и пролиферативную ДР, как «угрожающую зрению ДР». На рисунках 1 и 2 показаны А — оригинальная фотография; В — фотография после предобработки; С — фотография после сегментации признаков; D — фрагмент отчета по итогам анализа фотографии глазного дна в пользовательском интерфейсе. Чувствительность метода в диагностике угрожающей зрению ДР составила 96,59%, специ-

фичность — 91,4%, точность — 95%, площадь под кривой AUC — 0,94. Авторы считают, что программа диагностики ДР на основе алгоритмов автоматической сегментации «Retina AI» представляет собой инструмент решения проблемы скрининга ДР [36].

Многие авторы считают, что большинство приложений на основе ИИ в медицине все еще находятся на стадии внедрения и еще не продемонстрировали свою пользу в клинических испытаниях. Однако это просто вопрос времени и в дальнейшем приложения на основе ИИ будут использоваться повсеместно.

**Заключение.** Программы с использованием алгоритмов ИИ несомненно способны помочь врачам своевременно диагностировать ДР и направить к специалисту для адекватного и своевременного лечения [37,38]. Такие системы могут сэкономить время и нагрузку специалистов-офтальмологов, уменьшить число врачебных ошибок, способствуют большему охвату населения, что особенно актуально в труднодоступных (горных районах и степях) и местностях с низким уровнем дохода и. Широкое внедрение платформ программного обеспечения с ИИ могла бы решить такие проблемы, как несбалансированное распределение медицинских ресурсов в развивающихся густонаселенных странах, загруженность профессиональных офтальмологов. Мы надеемся, что такие программы станут общедоступными, как очередное достижение человеческого разума.

## ЛИТЕРАТУРА/ REFERENCES

1. Kangilbaeva G, Bakhritdinova F, Nabieva I, Jurabekova A. Eye hemodynamic data and biochemical parameters of the lacrimal fluid of patients with non-proliferative diabetic retinopathy. Data in Brief, 2020; Volume 32: 106237. CrossrefHYPERLINK <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106237> <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32923547/>
2. Bakhritdinova FA, Kangilbaeva GE, Nabieva IF, Jurabekova AZ. Prediction of the progression of diabetic retinopathy based on hemodynamic data. J. ophthalmol (Ukraine). 2021;4:26–31. Available: <http://doi.org/10.31288/oftalmolzh202142631>
3. Kangilbaeva G, Bakhritdinova F, Urmanova F. Assessing the Dynamics of Antioxidant Protection of Tear Fluid and Retrobulbar Blood Circulation in Diabetic Retinopathy. New Horizons in Medicine and Medical Research, 2022;(4):83–90. <https://doi.org/10.9734/bpi/nhmmr/v4/2000B>
4. C. Martinez-Perez, C. Alvarez-Peregrina, C. Villa-Collar, M. A. Sanchez -Tena. Artificial intelligence applied to ophthalmology and optometry: A citation network analysis. Journal of Optometry, 2022 (15): 582–590. <https://doi.org/10.1016/j.optom.2022.06.005>
5. Poly TN, Islam MM, Walther BA, Lin MC, Jack Li YC. Artificial intelligence in diabetic retinopathy: Bibliometric analysis. Comput Methods Programs Biomed. 2023;231:107358. doi: 10.1016/j.cmpb.2023.107358. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36731310/>
6. Oganov AC, Seddon I, Jabbehdari S, Uner OE, Fonoudi H, Yazdanpanah G, Outani O, Arevalo JF. Artificial intelligence in retinal image analysis: Development, advances, and challenges. Surv Ophthalmol. 2023;68(5):905–919. doi: 10.1016/j.survophthal.2023.04.001.
7. Pieczynski J, Kuklo P, Grzybowski A. The Role of Telemedicine, In-Home Testing and Artificial Intelligence to Alleviate an Increasingly Burdened Healthcare System: Diabetic Retinopathy. Ophthalmol Ther. 2021;10(3):445–464. doi: 10.1007/s40123-021-00353-2.
8. Wintergerst MWM, Mishra DK, Hartmann L, Shah P, Konana VK, Sagar P, Berger M, Murali K, Holz FG, Shanmugam MP, Finger RP. Diabetic Retinopathy Screening Using Smartphone-Based Fundus Imaging in India. Ophthalmology. 2020;127(11):1529–1538. doi: 10.1016/j.ophtha.2020.05.025.
9. Son J, Shin JY, Kim HD, Jung KH, Park KH, Park SJ. Development and Validation of Deep Learning Models for Screening Multiple Abnormal Findings in Retinal Fundus Images. Ophthalmology. 2020;127(1):85–94. doi: 10.1016/j.ophtha.2019.05.029.
10. Akram MU, Akbar S, Hassan T, Khawaja SG, Yasin U, Basit I. Data on fundus images for vessels segmentation, detection of hypertensive retinopathy, diabetic retinopathy and papilledema. Data Brief. 2020 Feb 24;29:105282. doi: 10.1016/j.dib.2020.105282.
11. Akbar S, Hassan T, Akram MU, Yasin UU, Basit I. AVRDB: Annotated Dataset for Vessel Segmentation and Calculation of Arteriovenous Ratio. Int'l Conf. IP, Comp. Vision, and Pattern Recognition | IPCV'17 | <https://www.researchgate.net/publication/319165214>.
12. Kahai P, Namuduri KR, Thompson H. A decision support framework for automated screening of diabetic retinopathy. Int J Biomed Imaging. 2006;2006:45806. doi: 10.1155/IJBI/2006/45806.

13. Bouhaimed M, Gibbins R, Owens D. Automated detection of diabetic retinopathy: results of a screening study. *Diabetes Technol Ther.* 2008;10(2):142–8. doi: 10.1089/dia.2007.0239.
14. Raman R, Srinivasan S, Virmani S, Sivaprasad S, Rao C, Rajalakshmi R. Fundus photograph-based deep learning algorithms in detecting diabetic retinopathy. *Eye (Lond).* 2019;33(1):97–109. doi: 10.1038/s41433-018-0269-y.
15. Abràmoff MD, Niemeijer M, Suttorp-Schulten MSA, Viergever MA, Russell SR, Ginneken Bvan. Evaluation of a system for automatic detection of diabetic retinopathy from color fundus photographs in a large population of patients with diabetes. *Diabetes Care.* 2008;31:193–8.
16. Abràmoff MD, Folk JC, Han DP, Walker JD, Williams DF, Russell SR, et al. Automated analysis of retinal images for detection of referable diabetic retinopathy. *JAMA Ophthalmol.* 2013;131:351–7.
17. Брежнева А. Н. Методы и алгоритмы морфологического анализа изображений в автоматизированной системе диагностики диабетической ретинопатии. Dissertation, 2012. [Brezhneva A. N. Methods and algorithms for morphological image analysis in an automated diagnostic system for diabetic retinopathy. Dissertation, 2012. (In Russ.)] disserCat
18. Xu Y, Wang Y, Liu B, Tang L, Lv L, Ke X, Ling S, Lu L, Zou H. The diagnostic accuracy of an intelligent and automated fundus disease image assessment system with lesion quantitative function (SmartEye) in diabetic patients. *BMC Ophthalmol.* 2019 Aug 14;19(1):184. doi: 10.1186/s12886-019-1196-9.
19. Joshi GD, Sivaswamy J. DrishtiCare: a telescreening platform for diabetic retinopathy powered with fundus image analysis. *J Diabetes Sci Technol.* 2011 Jan 1;5(1):23–31. doi: 10.1177/193229681100500104.
20. Saha SK, Fernando B, Cuadros J, Xiao D, Kanagasingam Y. Automated Quality Assessment of Colour Fundus Images for Diabetic Retinopathy Screening in Telemedicine. *J Digit Imaging.* 2018 Dec;31(6):869–878. doi: 10.1007/s10278-018-0084-9.
21. Gulshan V, Peng L, Coram M, Stumpe MC, Wu D, Narayanaswamy A, et al. Development and validation of a deep learning algorithm for detection of diabetic retinopathy in retinal fundus photographs. *JAMA – Journal of the American Medical Association.* 2016;316(22):2402–2410. <https://doi.org/10.1001/jama.2016.17216>
22. Rajalakshmi R, Subashini R, Anjana RM, Mohan V. Automated diabetic retinopathy detection in smartphone-based fundus photography using artificial intelligence. *Eye (Lond).* 2018;32(6):1138–1144. doi: 10.1038/s41433-018-0064-9.
23. Neroev VV, Bragin AA, Zaitseva OV. Development of a prototype service for the diagnosis of diabetic retinopathy based on fundus images using artificial intelligence methods. *National Health.* 2021;2(2):64–72. <https://doi.org/10.47093/2713-069X.2021.2.2.64-72>
24. Serener A, Serte S. Geographic variation and ethnicity in diabetic retinopathy detection via deep learning. *Turk J Elec Eng & Comp Sci.* 2020;28:664–678. doi:10.3906/elk-1902-131.
25. Katada Y, Ozawa N, Masayoshi K, Ofuji Y, Tsubota K, Kurihara T. Automatic screening for diabetic retinopathy in interracial fundus images using artificial intelligence. *Intelligence-Based Medicine.* 2020;3–4: 100024. <https://doi.org/10.1016/j.ibmed.2020.100024>
26. Chawla H, Hicks CP, Assi L, Epling JP, Al-Dujaili LJ, Weiss JS. Prevalence of glaucomatous-appearing discs in patients undergoing artificial intelligence screening for diabetic retinopathy. *JFO Open Ophthalmology.* 2023;3:100037. <http://doi.org/10.1016/j.jfop.2023.100037>
27. Lim JI, Regillo CD, Sadda SR, Ipp E, Bhaskaranand M, Ramachandra C, Solanki K. Artificial Intelligence Detection of Diabetic Retinopathy: Subgroup Comparison of the EyeArt System with Ophthalmologists' Dilated Examinations. *Ophthalmol Sci.* 2022;3(1):100228. doi: 10.1016/j.xops.2022.100228.
28. Mathenge W, Whitestone N, Nkurikiye J, Patnaik JL, Piyasena P, Uwaliraye P, Lanouette G, Kahook MY, Cherwek DH, Congdon N, Jaccard N. Impact of Artificial Intelligence Assessment of Diabetic Retinopathy on Referral Service Uptake in a Low-Resource Setting: The RAIDERS Randomized Trial. *Ophthalmol Sci.* 2022 Apr 30;2(4):100168. doi: 10.1016/j.xops.2022.100168.
29. Mehra AA, Softing A, Guner MK, Hodge DO, Barkmeier AJ. Diabetic Retinopathy Telemedicine Outcomes With Artificial Intelligence-Based Image Analysis, Reflex Dilation, and Image Overread. *Am J Ophthalmol.* 2022;244:125–132. doi: 10.1016/j.ajo.2022.08.008.
30. Pei X, Yao X, Yang Y, Zhang H, Xia M, Huang R, Wang Y, Li Z. Efficacy of artificial intelligence-based screening for diabetic retinopathy in type 2 diabetes mellitus patients. *Diabetes Res Clin Pract.* 2022;184:109190. doi: 10.1016/j.diabres.2022.109190.
31. Quellec G, Al Hajj H, Lamard M, Conze PH, Massin P, Cochener B. ExplAIin: Explanatory artificial intelligence for diabetic retinopathy diagnosis. *Med Image Anal.* 2021;72:102118. doi: 10.1016/j.media.2021.102118.
32. Ruamviboonsuk P, Tiwari R, Sayres R, et al. Real-time diabetic retinopathy screening by deep learning in a multisite national screening programme: a prospective interventional cohort study. *Lancet Digit Health* 2022; 2022;4(4): e235-e244 [https://doi.org/10.1016/S2589-7500\(22\)00017-6](https://doi.org/10.1016/S2589-7500(22)00017-6).
33. Xie Y, Nguyen QD, Hamzah H, Lim G, Bellemo V, et al. Artificial intelligence for teleophthalmology-based diabetic retinopathy screening in a national programme: an economic analysis modelling study. *Lancet Digit Health.* 2020;2(5): e240-e249. doi: 10.1016/S2589-7500(20)30060-1.
34. Hayati M, et al. Impact of CLAHE-based image enhancement for diabetic retinopathy classification through deep learning. *Procedia Comput Sci* 2023; 216: 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.111>
35. Monteiro FC. Diabetic Retinopathy Grading using Blended Deep Learning. *Procedia Computer Science,* 2023;219:1097–1104. ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.389>.
36. Габараев Г. М., Пономарева Е. Н., Лоскутов И. А., Каталевская Е. А., Хабазова М. Р. Клиническая валидация программы диагностики угрожающей зрению диабетической ретинопатии на основе алгоритмов автоматической сегментации. *Офтальмология.* 2023;20(2):291–297. [Gabaraev GM, Ponomareva EN, Loskutov IA, Katalievskaya EA, Khabazova MR. Clinical Validation of a Program for Diagnosing Vision-Threatening Diabetic Retinopathy Based on Automatic Segmentation Algorithms. *Ophthalmology in Russia* 2023;20(2):291–297. (In Russ.)] <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2023-2-291-297>
37. Kangilbaeva G, Jurabekova A. Effect of EGb 761 (Tanakan) Therapy in Eyes with Nonproliferative Diabetic Retinopathy. *International Journal of Pharmaceutical Research.* 2020. Vol 12. Supplementary Issue 2:3019–3023. <https://doi.org/10.31838/ijpr/2020.SP2.317> Crossref
38. Kangilbaeva, G., Bakhritdinova, F., Oralov, B., Jurabekova, A. Functional and Hemodynamic Efficacy of Non-Proliferative Diabetic Retinopathy Treatment by Endonasal Electrophoresis of Tanakan. *Ophthalmol. Res. Int. J.* 2023; 18(1): 1–9. <https://doi.org/10.9734/or/2023/v18i1374>