

Ю. И. ГОЛУБ¹⁾, М. М. ЛУКАШЕВИЧ^{1, 2)}, В. В. СТАРОВОЙТОВ¹⁾

ПРОТОТИП СИСТЕМЫ УДАЛЕННОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СКРИНИНГА ДИАБЕТИЧЕСКОЙ РЕТИНОПАТИИ

¹⁾ Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси
г. Минск, Республика Беларусь

²⁾ Белорусский государственный университет
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье представлены результаты разработки и тестирования прототипа автоматизированной системы удаленного скрининга диабетической ретинопатии (ДР) с функциями предобработки и классификации цифровых изображений, полученных фундус-камерами разных производителей. Экспериментальное тестирование прототипа выполнено на нескольких тысячах реальных изображений из белорусских медицинских учреждений и открытых источников. Объективная оценка качества изображения сетчатки вычисляется посредством анализа центрального фрагмента на базе параметра масштаба распределения Вейбулла для локальных оценок качества зеленого канала изображения. Прототип разработан на платформе Streamlit, использует нейросетевые архитектуры YOLOv8 и YOLOv11 для классификации пяти стадий ДР, точность классификации составила 84,0 % и 82,7 % соответственно. Комбинация фильтрации некачественных снимков и нейросетевой классификации повышает достоверность скрининговой диагностики и может быть использована в телемедицинских системах, имеющих ограниченные вычислительные ресурсы.

Ключевые слова: диабетическая ретинопатия, безэталонная оценка качества, распределение Вейбулла, Streamlit, YOLO, удаленный скрининг, классификация изображений сетчатки

Введение

Сахарный диабет относится к числу наиболее распространенных неинфекционных заболеваний и является значимой проблемой. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), в период с 1980 по 2014 год число людей с диагнозом «сахарный диабет» увеличилось с 108 миллионов до 422 миллионов человек [1, 2]. На начало 2025 года в Беларуси под медицинским наблюдением состояло более 407 600 пациентов с сахарным диабетом. В Минске распространенность заболевания за десятилетие (с 2014 по 2024 год) выросла вдвое: с почти 2,3 тыс. до почти 4,6 тыс. случаев на 100 тыс. населения [3]. К осложнениям диабета относят диабетическую ретинопатию. Это заболевание может начинаться абсолютно бессимптомно. У многих людей симптомы могут не проявиться до тех пор, пока заболевание не начнет прогрессировать в более тяжелые стадии, в таком случае это приводит к лишению зрения и слепоте. Во всем мире среди причин слепоты ДР занимает пятое место. Офтальмологическое обследование, которое должен проходить каждый заболевший сахарным диабетом, позволяет выявить появление и развитие ДР на ранней стадии, что позволяет, при дальнейшем лечении, остановить или замедлить потерю зрения. По данным итогового отчета работы эндокринологической службы Республики Беларусь в 2021 году одна из причин роста числа заболевших ДР – это недостаточное выявление заболевания на ранних стадиях [4].

В настоящее время во многих странах наблюдается рост числа людей с диабетом, что создает

дополнительную нагрузку на службы здравоохранения. В связи с чем внедряются автоматизированные системы, которые выявляют пациентов с риском ДР, которые нуждаются в дальнейшем обследовании [1, 5–7]. Например, в Шотландии с 2003 года действует централизованная программа скрининга ДР. В 2007 году в Финляндии стартовал проект, направленный на повышение доступности обследований на ДР. В рамках проекта был использован мобильный офтальмологический пункт. В Норвегии была создана программа скрининга диабетической ретинопатии, в рамках которой снимки сетчатки, полученные в местных медучреждениях и оптиках, передаются в центр, где специалисты могут оценить их в 4–5 раз больше, чем при обычном осмотре. В Испании в рамках программ скрининга ДР специально обученный персонал делает снимки глазного дна с помощью цифровых камер и отправляет данные врачам для оценки.

Использование автоматизированных систем для анализа изображений глазного дна повышает доступность и эффективность массового скрининга диабетической ретинопатии [8]. Ранняя диагностика и регулярный мониторинг состояния сетчатки являются ключевыми этапами для предотвращения необратимой слепоты. Система удаленного скрининга диабетической ретинопатии позволяет автоматизировать процесс анализа офтальмологических изображений, повысить доступность диагностики и снизить нагрузку на специалистов. В настоящее время наблюдается недостаток офтальмологов в отдаленных регионах развивающихся стран (например, в Индии), существует

высокая нагрузка на специалистов, а также неравномерное распределение оборудования в медицинских учреждениях. Основными пользователями автоматизированной системы могут быть врачи-офтальмологи, терапевты и эндокринологи, медицинский персонал поликлиник и диспансеров.

Данная работа обобщает результаты исследований, нацеленных на создание прототипа экспериментальной автоматизированной системы удаленного скрининга ДР по изображениям сетчатки глаза, зарегистрированным произвольной фундус-камерой в видимом диапазоне электромагнитного спектра. Более подробно результаты выполненных исследований изложены в работах [9–12].

1. Объективная оценка качества цифровых изображений сетчатки

Качество фундус-изображений может снижаться из-за движений или моргания пациента во время съемки, а также из-за неправильной настройки камеры. Это приводит к размытию, бликам, низкой контрастности или неравномерной яркости снимков. Для определения стадии диабетической ретинопатии нужны резкие и яркие изображения сетчатки без посторонних объектов. Оценка качества изображений глазного дна является первым и критически важным этапом в любой автоматизированной системе диагностики ДР. Без отбраковки некачественных снимков даже самые совершенные нейросетевые классификаторы будут давать нестабильные результаты. Оценку качества можно выполнять на этапе регистрации снимков.

Для экспериментальных исследований была сформирована база реальных изображений сетчатки, включающая снимки из белорусских медицинских учреждений и общедоступных источников.

Фундус-камеры формируют цветные изображения, которые можно разложить на RGB-каналы (красный, зеленый, синий). Результаты экспериментального анализа показали, что зеленый канал обеспечивает максимальную контрастность сосудистого рисунка и наиболее эффективное выявление микроаневризм. Красный канал – чрезмерно светлый, а синий – слишком темный, что снижает их диагностическую ценность. Поэтому для оценки качества используется полутонное изображение, полученное из зеленого канала.

Для снимков с неоднородным фоном затруднительно получать бинарную маску поля зрения (FOV – field of view), поэтому предложено выделять центральную область сетчатки (ЦОС). Экспериментально установлено, что оптимальный размер ЦОС составляет 50–67 % от ширины исходного изображения в зависимости от угла обзора камеры. Для белорусских данных (3608×3608 и 2448×2448 пикселей) ЦОС со стороной 0,67 исходного размера позволяет надежно разделять снимки на удовлетворительные и неудовлетворительные, тогда как меньшая ЦОС (0,5) оказалась недостаточно точной.

Было исследовано 36 функций, используемых для оценки качества без эталонного изображения (ACMO, BEGH, BREN, BRISQUE, CONT, CURV, EBCM, FFT, FISH, FUS, GLLV, GLVM, GOLE, GORD, GRAE, GRAT, HELM, JNBM, KADN, KURT, LAPD, LAPL, LAPM, LOCC, LOEN, MLV, NIQE, PIQE, PSIS, SHAR, STDK, SVDB, TENG, VOLA, WAVS). Они вычислялись локально для каждого изображения сетчатки. Использование в качестве глобальных оценок среднего, медианы и стандартного отклонения показали сильное перекрытие между классами качества. Поскольку распределение локальных оценок качества на реальных изображениях часто не соответствует нормальному, для обобщения использованы параметры распределения Вейбулла – масштаб (scale) и форма (form), а также среднее нормального распределения (mean) для сравнения. Параметр scale для функций FUS и TENG показал монотонный рост с улучшением качества изображения и позволил установить порог разделения на два класса. Параметры form и mean – менее информативны.

Для унификации и ускорения обработки ЦОС масштабируется до фиксированного размера 512×512 пикселей. Коэффициент корреляции Пирсона между оценками для исходной и масштабированной ЦОС составил 0,9946 (scale FUS), 0,9707 (form) и 0,9520 (mean). Функции FUS и TENG сохранили высокую корреляцию (>0,98), тогда как другие оценки (например, BISH, NIQE, HELM) показали снижение ниже 0,7. Визуальный контроль подтвердил, что при размере 512×512 пикселей сохраняются диагностически значимые детали (микроаневризмы, сосуды). Дальнейшее уменьшение размера приводит к потере точности.

На заключительном этапе глобальная оценка качества Q сравнивается с порогом tr , который подбирается экспериментально для конкретной базы данных или типа камеры. Если $Q > tr$, изображение признается удовлетворительного качества и допускается к дальнейшему диагностическому анализу; в противном случае снимок отбраковывается с рекомендацией повторной съемки.

Подробно результаты исследования оценки качества изображений сетчатки и предлагаемый метод представлены в статье [12]. Предложенный метод протестирован на 3170 изображениях (белорусские клинические данные, Aptos2019 [13], DDR [8]). Ограничение метода является необходимостью индивидуальной настройки порога tr для каждой конкретной базы данных и типа камеры. Для 327 изображений из общедоступной базы Kaggle точность (accuracy) оценки качества исходного изображения сетчатки (при использовании зеленого канала и ЦОС 512×512 пикселей) достигла 0,966, что на 40 % выше, чем при анализе полного изображения (0,691). Обработка центральной области размером 512×512 пикселей требует в 20 раз меньше времени для вычисления локальных оценок по сравнению с анализом полного кадра (размером 3608×3608 пикселей). На рисунке 1 представлен результат разделения изображений сетчатки на два класса с применением разработанного метода безэталонной количественной оценки качества.

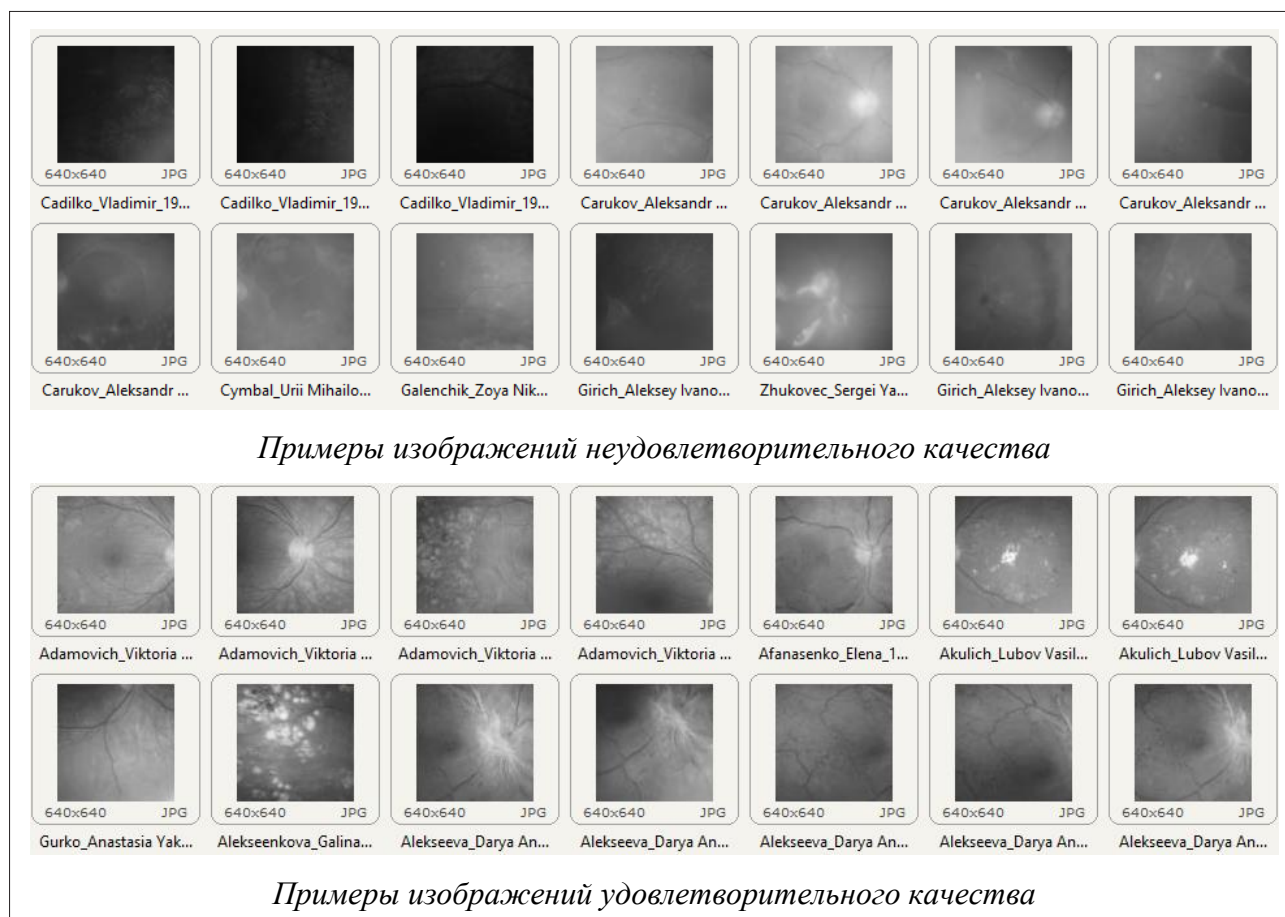


Рисунок 1. Примеры изображений двух классов качества

2. Обзор существующих систем автоматизированного скрининга диабетической ретинопатии

На сегодняшний день известно несколько систем автоматизированного скрининга ДР.

1) IDx-DR (IDx Technologies) – первая система, одобренная FDA (Food and Drug Administration, управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов США) для автономной диагностики ДР [5]. Она использует глубокие нейронные сети, отличается высокой стоимостью и требовательностью к качеству изображений. Авторские права на исходные коды принадлежат спонсору и недоступны другим пользователям.

2) Google DeepMind – подразделение компании Google, специализирующееся на разработке систем искусственного интеллекта (ИИ) [5, 14]. В рамках направления Google Health DeepMind создала продвинутые нейросетевые алгоритмы для диагностики глазных заболеваний, включая диабетическую ретинопатию. Google сотрудничает с медицинскими учреждениями и государственными службами здравоохранения (например, Национальная служба здравоохранения в Великобритании) для клинических испытаний и внедрения технологии.

3) Optos Automated AI – инструменты ИИ для анализа изображений сетчатки, помогающие в диагно-

стике различных глазных заболеваний [14].

4) EyeArt AI – коммерческая система для массового скрининга [14], но она дает ошибки классификации при анализе снимков низкого качества и зависима от типа оборудования регистрирующего изображения сетчатки.

Открытые модели (например, на базе Kaggle EyePACS) – можно гибко изменять, но они требуют значительных вычислительных ресурсов и экспертизы для адаптации.

Аналогов с доступными кодами и пригодных для внедрения не имеется.

Ограничения и проблемы существующих решений

Существующие системы автоматизированного скрининга диабетической ретинопатии имеют ряд ограничений:

- зависимость от качества исходных изображений и условий съемки;
- ограниченная интеграция с локальными медицинскими системами;
- высокие требования к вычислительным мощностям;
- для сторонних разработчиков и организаций доступ к исходному коду или моделям ограничен;
- коммерческое использование сопровождается

значительными финансовыми затратами и предполагает обязательное прохождение процедур согласования, лицензирования, а также строгого соблюдения действующих юридических и этических требований.

Таким образом, несмотря на значительный прогресс в области автоматизированного анализа изображений сетчатки, актуальными остаются задачи повышения устойчивости алгоритмов к вариациям качества изображений и снижения стоимости систем для расширения их применения в массовом скрининге диабетической ретинопатии, особенно в регионах с ограниченными ресурсами [14, 15].

3. Прототип системы удаленного автоматизированного скрининга диабетической ретинопатии

Для разработки прототипа автоматизированной системы скрининга ДР были выполнены следующие работы: проанализированы медицинские требования; выбран набор технологий и составлено техническое задание; сформирована база изображений глазного дна с разметками из общедоступных источников; выполнен сбор данных в белорусских медицинских учреждениях при взаимодействии с медицинскими специалистами; выполнены обучение нейросетевых алгоритмов, проверка и тестирование точности классификации стадий ДР; создано веб-приложение для скрининга стадий ДР.

Разработанная система удаленного автоматизированного скрининга ДР решает следующие задачи: автоматический анализ изображений глазного дна и классификация стадий диабетической ретинопатии. Архитектура системы включает в себя следующие модули: модуль сбора данных, который предполагает загрузку изображений через веб-интерфейс; модуль количественной оценки качества изображений (реализованная по описанной выше схеме); модуль предварительной обработки изображений (три варианта: Standard, CLAHE, Green channel); модуль детекции ДР и классификации стадий ДР с использованием нейронных сетей; модуль формирования отчета; модуль хранения и управления данными. Система реализована на языке Python с использованием фреймворка Streamlit, использование которого обеспечивает создание интерактивного и визуально удобного веб-интерфейса для работы с меди-

цинскими изображениями, а также ускоряет процесс прототипирования. Функционирование моделей глубокого обучения обеспечивается высокопроизводительной архитектурой, которая поддерживает использование как центрального процессора (ЦП), так и специализированного графического процессора (ГП). Такая архитектура позволяет оптимизировать вычислительные процессы и существенно ускоряет обработку данных, что особенно важно при работе с ресурсоемкими задачами. Для работы на ГП требуется среда CUDA (Compute Unified Device Architecture) и библиотека cuDNN.

Поддерживаются форматы изображений JPG и PNG. Пользователь может загрузить снимок (рисунки 2–3), оценить его качество, выбрать метод предобработки (рисунок 4) и запустить скрининг. Результат включает информацию о стадии ретинопатии и визуализацию областей интереса (рисунки 4–5).

Пользователю доступны следующие методы предварительной обработки изображения:

1) Standard – базовый, т.е. без применения дополнительных алгоритмов улучшения;

2) CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization) – алгоритм адаптивного выравнивания гистограммы с ограничением контраста, позволяющий улучшить детализацию слабо освещенных областей изображения;

3) Green – алгоритм, основанный на извлечении зеленого цветового канала из цветного изображения. Поскольку зеленый канал содержит наибольший контраст и меньше шумов по сравнению с красным и синим, его использование повышает качество визуализации сосудистой сети и других анатомических структур сетчатки.

После выбора необходимого алгоритма обработки пользователь запускает процесс скрининга. Система осуществляет анализ изображения с применением выбранного алгоритма и проводит комплексную оценку состояния сетчатки. По завершении процесса скрининга пользователь получает доступ к результатам анализа, включающим стадию ретинопатии и области интереса, требующие дополнительного внимания. Визуализация результатов представлена в удобном для интерпретации виде, что позволяет врачу оперативно оценить состояние пациента и принять необходимые меры.

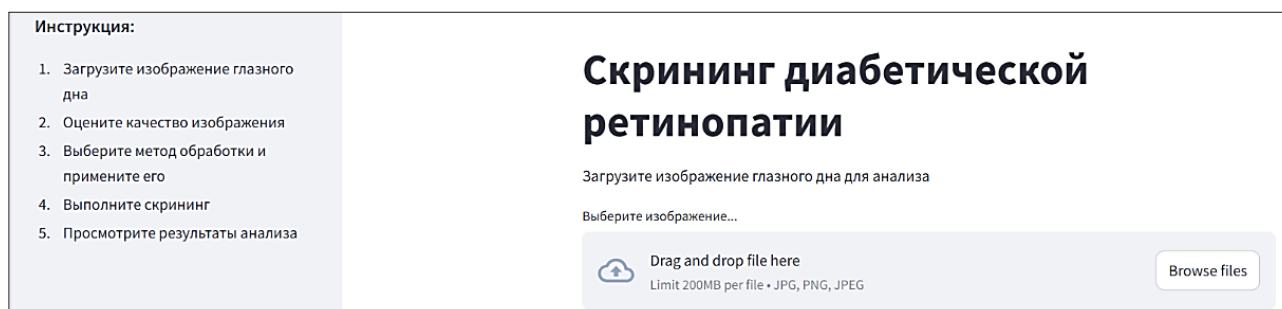


Рисунок 2. Интерфейс приложения при запуске, обеспечивающий пользователю доступ к основным функциональным модулям системы

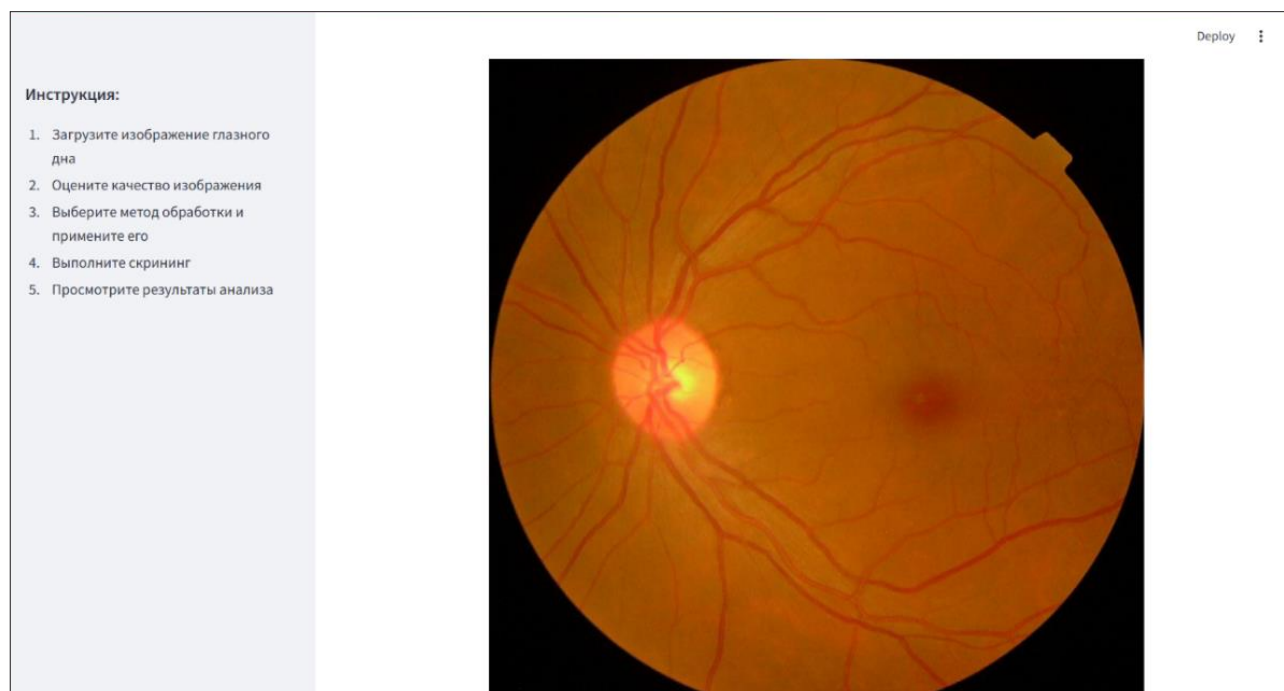


Рисунок 3. Пример загрузки изображения для последующего анализа

Интерфейс вывода результатов после выполнения скрининга представлен на рисунке 4, где отображаются области интереса, требующие дополнительного внимания (рисунок 5). Система автоматически выделяет потенциально патологические участки сетчатки, что позволяет врачу оперативно оценить состояние пациента и принять необходимые меры для дальнейшего лечения.

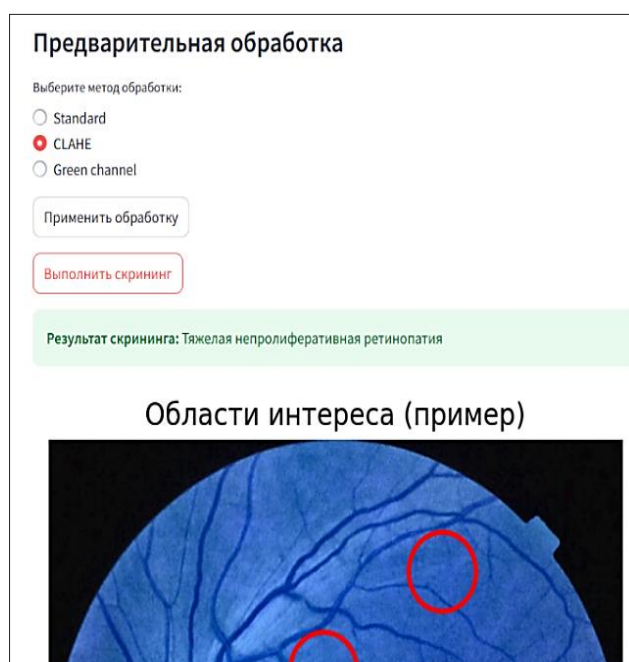


Рисунок 4. Выполнение скрининга. Заключение системы по стадиям диабетической ретинопатии



Рисунок 5. Визуализация областей интереса на изображении глазного дна, важных для клинической интерпретации и подтверждения диагноза

4. Нейросетевые модели классификации диабетической ретинопатии и их тестирование

Для классификации стадий ДР (5 классов: от отсутствия заболевания до пролиферативной ретинопатии) использованы две архитектуры семейства YOLO – YOLOv8 и YOLOv11. Обучение проводилось на комбинации общедоступных наборов данных и изображениях, собранных в белорусских медицинских учреждениях.

Суммарно YOLOv8n-cls включает 73 слоя, 1 441 285 параметров. Точность (accuracy) на тестовом наборе данных равна 84 %. Скорость предварительной обработки – 0,6 мс на ГП, скорость инференса (получения результатов классификации) – 1,3 мс на ГП.

Суммарно YOLOv11n-cls включает 112 слоев, 1 532 429 параметров. Точность (accuracy) на тестовом наборе данных равна 82,7 %. Скорость предварительной обработки 0,7 мс на ГП, скорость инференса – 1,3 мс на ГП.

Ошибки классификации преимущественно возникают между смежными или схожими классами (например, объекты класса 1 ошибочно отнесены к классу 2).

Тестирование производительности системы выполнялось в следующей среде: ГП – NVIDIA GeForce RTX 4090 (24GB GDDR6X), ЦП: Intel Core i9-13900K, оперативная память: 64GB DDR5. Размер изображений был от 819x640 до 2588x1958 пикселей. Всего было использовано для тестирования порядка 2000 изображений.

Усредненные оценки производительности (полный анализ, обработка и классификация одного изображения) с использованием ЦП следующие:

- загрузка изображения от 130 до 160 мс;
 - оценка качества изображения от 50 до 60 мс;
 - предварительная обработка (CLAHE) от 200 до 240 мс;
 - классификация с использованием модели нейронной сети: от 100 до 120 мс;
 - отображение результатов: от 100 до 110 мс.
- Итого: от 580 до 690 мс.

Использование ГП в части классификации позволяет ускорить работу приложения. Основным временным вкладом на ЦП вносит предобработка CLAHE (200–240 мс). Многопользовательский режим функционирования приложения не тестировался.

5. Практическое использование результатов исследования и изучение перспектив дальнейшего развития

Разработанный прототип системы удаленного скрининга диабетической ретинопатии может применяться в первичном звене здравоохранения для массового скрининга и раннего выявления заболевания, а также в телемедицинских центрах – для дистанционной диагностики и мониторинга состояния сетчатки. Кроме того, ее можно использовать в офтальмологических клиниках для углубленной диагностики и наблюдения за пациентами с разными стадиями ДР, а в научных исследованиях – для анализа эффективности методов диагностики и лечения.

В результате исследования перспектив дальнейшего развития определены возможные направления для углубления и расширения результатов данной работы:

1) исследование влияния различных параметров обработки и анализа изображения на точность диагно-

стики: проведение детального анализа и систематизации факторов, влияющих на качество и достоверность диагностических результатов;

2) расширение функциональности системы за счет внедрения дополнительных алгоритмов предварительной обработки, оценки качества и разметки данных:

- разработка и интеграция новых методов предварительной обработки изображений, направленных на улучшение качества данных перед их анализом;

- доработка приложения для разметки изображений сетчатки офтальмологом;

3) улучшение точности диагностики путем совершенствования методов МО:

- исключение возможных ошибок в процессе разметки данных;

- балансировка классов в обучающей выборке;

- дополнительный анализ признаков для повышения информативности моделей;

- доработка архитектуры моделей МО с целью улучшения межклассовой разделимости;

4) интеграция с существующими медицинскими информационными системами: адаптация разработанного ПО к специфике локальных данных, требованиям телемедицинских платформ, к работе с большими объемами данных;

5) оптимизация производительности и повышение скорости анализа изображения для обеспечения функционирования приложения в режиме реального времени;

6) разработка мультимодальных алгоритмов за счет сочетания анализа изображений фундус-камеры с данными оптической когерентной томографии для повышения точности и полноты диагностики;

7) разработка мобильной версии приложения для обеспечения доступности системы диагностики в различных условиях.

Заключение

Регулярный скрининг позволяет выявить заболевание на ранних стадиях, однако дефицит офтальмологов, неравномерное распределение оборудования и высокая нагрузка на специалистов ограничивают доступность диагностики, особенно в удаленных регионах. Автоматизированные системы анализа изображений глазного дна на основе методов машинного обучения могут решить эту проблему, но их эффективность критически зависит от качества входных снимков.

Объединение разработанного метода оценки качества и системы нейросетевой классификации позволяет создать автоматизированный процесс скрининга ДР.

Разработан, реализован и протестирован прототип системы удаленного автоматизированного скрининга диабетической ретинопатии по цифровым изображениям сетчатки.

Основные результаты проекта:

1) предложен метод безэталонной количественной оценки качества изображений сетчатки с использованием зеленого канала, центрального фрагмента снимка площадью порядка 50–67 %, локальных функций FUS/TENG, параметра масштаба распределения Вейбулла и масштабирования до 512×512 пикселей;

2) разработан и протестирован экспериментальный прототип системы удаленного скрининга ДР на платформе Streamlit, состоящий из шести модулей, который поддерживает три метода предобработки данных;

3) использованы нейросетевые модели YOLOv8 и YOLOv11, они показали точность классификации стадий ДР 84,0 % и 82,7 % соответственно.

Комбинация отбраковки некачественных снимков и последующей глубокой нейросетевой классификации повышает достоверность скрининга и может быть внедрена в телемедицинские системы, особенно в регионах с ограниченными вычислительными ресурсами и дефицитом офтальмологов.

Исследование выполнено в рамках проекта № Ф23ИНДГ-004.

Вклад авторов

Ю. И. Голуб: подготовка текста статьи и интерпретация результатов экспериментов; подготовка, предварительная обработка и оценка качества изображений сетчатки; проведение сравнительных экспериментов; выполнение обзора существующих решений по автоматизированной диагностике диабетической ретинопатии.

М. М. Лукашевич: подготовка текста статьи и интерпретация результатов экспериментов; разработка и оптимизация архитектуры нейронных сетей для сегментации патологических признаков на изображениях сетчатки; тестирование различных конфигураций гиперпараметров; сравнительные эксперименты по оценке эффективности моделей.

В. В. Старовойтов: организация сбора и разметки данных в медицинских учреждениях, планирование исследований, подготовка текста статьи, интерпретации результатов экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скрининг на диабетическую ретинопатию: краткое руководство : повышение эффективности, максимальное увеличение пользы и минимизация вреда / Всемирная организация здравоохранения. Европейское региональное бюро. Копенгаген, 2021. 95 с. URL: <https://iris.who.int/handle/10665/340770> (дата обращения: 10.04.2026).
2. Causes of blindness and vision impairment in 2020 and trends over 30 years, and prevalence of avoidable blindness in relation to VISION 2020: the Right to Sight: an analysis for the Global Burden of Disease Study Steinmetz / GBD 2019 Blindness and Vision Impairment Collaborators; Vision Loss Expert Group of the Global Burden of Disease Study // *The Lancet Global Health*. Vol. 9, № 2. P. e144–e160.
3. Сколько пациентов с сахарным диабетом находятся под меднаблюдением в Беларуси, рассказала эндокринолог // БЕЛТА. URL: <https://belta.by/society/view/skolko-patsientov-s-saharnym-diabetom-nahodjatsja-pod-mednabljudeniem-v-belarusi-rasskazala-746976-2025/>. Дата публ.: 04.11.2025.
4. Лукашевич, М. М. Классификация стадий диабетической ретинопатии на основе нейронных сетей / М. М. Лукашевич, Ю. И. Голуб // *Системный анализ и прикладная информатика*. 2022. № 3. С. 12–21. DOI: 10.21122/2309-4923-2022-3-12-21.
5. Pivotal trial of an autonomous AI-based diagnostic system for detection of diabetic retinopathy in primary care offices / M. D. Abramoff, P. T. Lavin, M. Birch [et al.] // *NPJ digital medicine*. 2018. Vol. 1. P. 39. DOI: 10.1038/s41746-018-0040-6.
6. Scanlon, P. H. The English National Screening Programme for diabetic retinopathy 2003–2016 / P. H. Scanlon // *Acta diabetologica*. 2017. Vol. 54. P. 515–525. DOI: 10.1007/s00592-017-0974-1.
7. Diabetic retinopathy screening: global and local perspective / R. A. Gangwani, J. X. Lian, Sarah M. McGhee [et al.] // *Hong Kong Medical Journal*. 2016. Vol. 22, № 5. P. 486–495. DOI: 10.12809/hkmj164844.
8. Diagnostic assessment of deep learning algorithms for diabetic retinopathy screening / T. Li, Y. Gao, K. Wang [et al.] // *Information Sciences*. 2019. Vol. 501. P. 511–522. DOI: 10.1016/j.ins.2019.06.011.
9. Golub, Y. Retinal Image Analysis Approach for Diabetic Retinopathy Grading / Y. Golub, M. Lukashevich, V. Starovoitov // *Pattern Recognition and Information Processing*. Springer, Cham, 2022. Vol. 1562. P. 152–165. DOI: 10.1007/978-3-030-98883-8_11.
10. Starovoitov, V. A universal retinal image template for automated screening of diabetic retinopathy / V. V. Starovoitov, Yu. I. Golub, M. M. Lukashevich // *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2022. Vol. 32, № 2. P. 322–331. DOI: 10.1134/S1054661822020195.
11. Классификации стадий диабетической ретинопатии на основе алгоритмов машинного обучения и набора признаков / М. М. Лукашевич, Ю. И. Голуб, В. В. Старовойтов // *Информационные системы и технологии = Information Systems and Technologies : материалы междунар. науч. конгресса по информатике*, 27–28 окт.

2022 г., Респ. Беларусь, Минск : в 3 ч. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: С. В. Абламейко (гл. ред.) [и др.]. Минск, 2022. Ч. 2. С. 169–176.

12. Голуб, Ю. И. Объективная оценка качества цифровых изображений сетчатки при скрининговом исследовании / Ю. И. Голуб, В. В. Старовойтов // Системный анализ и прикладная информатика. 2025. № 3. С. 47–58. DOI: 10.21122/2309-4923-2025-3-47-58.

13. APTOS 2019 Blindness Detection / Kaggle. 2019. URL: <https://www.kaggle.com/c/aptos2019-blindness-detection> (date of access: 10.04.2026).

14. Diabetic retinopathy screening through artificial intelligence algorithms: A systematic review / Z. Farahat, N. Zrira, N. Souissi [et al.] // Survey of Ophthalmology. 2024. Vol. 69, № 5. P. 707–721. DOI: 10.1016/j.survophthal.2024.05.008.

15. Павлов, В. Г. Современные тенденции скрининга диабетической ретинопатии / В. Г. Павлов, А. Л. Сидамонидзе, Д. В. Петрачков // Вестник офтальмологии. 2020. Т. 136, № 4. С. 300–309. DOI: 10.17116/oftalma2020136042300.

REFERENCES

1. World Health Organization. Regional Office for Europe. *Diabetic retinopathy screening: a short guide: Increase effectiveness, maximize benefits and minimize harm*. 2020. Available at: <https://iris.who.int/handle/10665/336660> (accessed 10 April 2026).

2. GBD 2019 Blindness and Vision Impairment Collaborators; Vision Loss Expert Group of the Global Burden of Disease Study. Causes of blindness and vision impairment in 2020 and trends over 30 years, and prevalence of avoidable blindness in relation to VISION 2020: the Right to Sight: an analysis for the Global Burden of Disease Study. *Lancet Global Health*. 2021;9(2):e144–e160. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(20\)30489-7](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(20)30489-7).

3. Skol'ko patsientov s sakharnym diabetom nakhodyatsya pod mednablyudeniem v Belarusi, rasskazala ehndokrinolog [How many patients with diabetes mellitus are under medical supervision in Belarus, the endocrinologist said]. *BELTA*. Available at: <https://belta.by/society/view/skolko-patsientov-s-saharnym-diabetom-nahodjatsja-pod-mednabljudeniem-v-belarusi-rasskazala-746976-2025/> (accessed 10 April 2026) (in Russian).

4. Lukashevich M.M., Golub Y.I. Classification of diabetic retinopathy stages based on neural networks. *System Analysis and Applied Information Science*. 2022;(3):12–21 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2022-3-12-21>.

5. Abràmoff M.D., Lavin P.T., Birch M., Shah N., Folk J.C. Pivotal trial of an autonomous AI-based diagnostic system for detection of diabetic retinopathy in primary care offices. *npj Digital Medicine*. 2018;1:39. <https://doi.org/10.1038/s41746-018-0040-6>.

6. Scanlon P.H. The English National Screening Programme for diabetic retinopathy 2003–2016. *Acta Diabetologica*. 2017;54:515–525. <https://doi.org/10.1007/s00592-017-0974-1>.

7. Gangwani R.A., Lian J.X., McGhee S.M., Wong D., Li K.K.W. Diabetic retinopathy screening: global and local perspective. *Hong Kong Medical Journal*. 2016;22(5):486–495. <http://dx.doi.org/10.12809/hkmj164844>.

8. Li T., Gaoet Y., Wang K., Guo S., Liu H., Kang H. Diagnostic assessment of deep learning algorithms for diabetic retinopathy screening. *Information Sciences*. 2019;501:511–522. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.06.011>.

9. Golub Y., Lukashevich M., Starovoitov V. Retinal image analysis approach for diabetic retinopathy grading. *Pattern Recognition and Information Processing. PRIP 2021. Communications in Computer and Information Science*, vol. 1562. Springer, Cham; 2022. p. 152–165. https://doi.org/10.1007/978-3-030-98883-8_11.

10. Starovoitov V.V., Golub Yu.I., Lukashevich M.M. A universal retinal image template for automated screening of diabetic retinopathy. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2022;32:322–331. <https://doi.org/10.1134/S1054661822020195>.

11. Lukashevich M.M., Golub Yu.I., Starovoitov V.V. Klassifikacii stadij diabeticheskoy retinopatii na osnove algoritmov mashinnogo obucheniya i nabora priznakov [Classifications of diabetic retinopathy stages based on machine learning algorithms and feature set]. *Informacionnye sistemy i tehnologii = Information Systems and Technologies : materialy mezhdunar. nauch. kongressa po informatike [Proceedings of the International Scientific Congress on Informatics]*, 27–28 Oct. 2022, Republic of Belarus, Minsk. In 3 parts. Part 2. Minsk; 2022. p. 169–176 (in Russian).

12. Golub Yu.I., Starovoitov V. Objective quality assessment of digital retinal images in screening study. *System Analysis and Applied Information Science*. 2025;(3):47–58 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2025-3-47-58>.

13. APTOS 2019 Blindness Detection. *Kaggle*. 2019. Available at: <https://www.kaggle.com/c/aptos2019-blindness-detection> (accessed 10 April 2026).

14. Farahat Z., Zrira N., Souissi N., Belmekki M., Ngote M.N., Megdiche K., et al. Diabetic retinopathy screening through artificial intelligence algorithms: A systematic review. *Survey of Ophthalmology*. 2024;69(5):707–721. <https://doi.org/10.1016/j.survophthal.2024.05.008>.

15. Pavlov V.G., Sidamonidze A.L., Petrachkov D.V. Current trends in the screening for diabetic retinopathy. *Russian Annals of Ophthalmology*. 2020;136(4):300–309 (in Russian). <https://doi.org/10.17116/oftalma2020136042300>.

Y. I. GOLUB¹⁾, M. M. LUKASHEVICH^{1, 2)}, V. V. STAROVOITOV¹⁾

PROTOTYPE OF A REMOTE AUTOMATED SCREENING SYSTEM FOR DIABETIC RETINOPATHY

¹⁾ United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus

Minsk, Republic of Belarus

²⁾ Belarusian State University

Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The article presents the results of the development and testing of a prototype automated system for remote screening of diabetic retinopathy (DR), featuring preprocessing and classification functionalities for digital images acquired by fundus cameras from various manufacturers. Experimental testing of the prototype was performed on several thousand real-world images from Belarusian medical institutions and open-access sources. Objective assessment of retinal image quality is computed through analysis of the central fragment based on the Weibull distribution scale parameter applied to local quality estimates of the green channel of the image. The prototype was developed on the Streamlit platform and employs the YOLOv8 and YOLOv11 neural network architectures for classifying five stages of DR, achieving classification accuracy of 84.0 % and 82.7 %, respectively. The combination of low-quality image filtering and neural network-based classification enhances the reliability of screening diagnostics and can be deployed in telemedicine systems with limited computational resources.

Keywords: diabetic retinopathy, no-reference image quality assessment, Weibull distribution, Streamlit, YOLO, remote screening, retinal image classification



Голуб Юлия Игоревна

Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ОИПИ НАН Беларуси), г. Минск, 220012, Республика Беларусь.

Кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ОИПИ НАН Беларуси.

Сфера научных интересов: цифровая обработка изображений и анализ их качества.

Yuliya I. Golub

United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (UIIP NAN Belarus), Minsk, 220012, Republic of Belarus.

PhD of Engineering Sciences, Associate Professor, Leading Researcher at the United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus. Research interests: digital image processing and image quality assessment.



Лукашевич Марина Михайловна

Белорусский государственный университет.

Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ОИПИ НАН Беларуси), г. Минск, 220012, Республика Беларусь.

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных систем управления Белорусского государственного университета. Старший научный сотрудник ОИПИ НАН Беларуси. Сфера научных интересов: цифровая обработка изображений и машинное обучение.

Marina M. Lukashevich

Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus.

United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (UIIP NAN Belarus), Minsk, 220012, Republic of Belarus.

PhD of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Information Systems and Technologies, Belarusian State University; Senior Researcher at the United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus. Research interests: digital image processing and machine learning.

**Старовойтов Валерий Васильевич**

Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ОИПИ НАН Беларуси), г. Минск, 220012, Республика Беларусь.

Доктор технических наук, профессор. Главный научный сотрудник ОИПИ НАН Беларуси. Лауреат Государственной премии Республики Беларусь (2003 г.). Сфера научных интересов: обработка и анализ данных, представленных в виде цифровых изображений, полученных в разных участках электромагнитного спектра. Опубликовал более 170 научных работ.

Valery Starovoitov

United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (UIIP NAS Belarus), Minsk, 220012, Republic of Belarus.

Doctor of Sciences and Professor of Computer Science. He is a Principal Research Fellow at the United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus. Award: State Prize of the Republic of Belarus in science. Research interests: processing and analysis of digital image data obtained in various regions of the electromagnetic spectrum. He has published over 170 papers.

<https://orcid.org/0000-0001-7190-761X>