Комбинированный программный метод анализа васкуляризации фильтрационных подушек по томографическим изображениям с использованием методов машинного зрения

Петров С. Ю.
д.м.н., начальник отдела глаукомы[1]

Солодовников В. И.
к.т.н., директор[2]

Милаш С. В.
к.м.н., старший научный сотрудник отдела патологии рефракции, бинокулярного зрения и офтальмоэргономики[1]

Маркелова О. И.
младший научный сотрудник отдела глаукомы[1]

Епхиева А. Д.
аспирант[1]

Павлов К. В.
аспирант[1]

Каракотова Н. В.
студент 4 курса факультета «Информатика и системы управления»[3]

1 – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр глазных болезней имени Гельмгольца» Министерства здравоохранения Российской Федерации, 105062, Россия, Москва, ул. Садовая-Черногрязская, д. 14/19.
2 – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Центр информационных технологий в проектировании Российской академии наук, Московская область, Одинцово, ул. Маршала Бирюзова, д. 7А.
3 – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», Москва, 2-я Бауманская улица, 5, стр. 4

***Автор для корреспонденции:** Маркелова Оксана Игоревна; **e-mail:** levinaoi@mail.ru*
***Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.*
***Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

Состояние фильтрационной подушки является значимым прогностическим фактором исхода антиглаукомных операций, однако, существующие методы его оценки субъективны. Целью исследования стала разработка автоматизированного метода для объективного анализа изображений фильтрационной подушки. В исследовании использован массив данных 100 пациентов с первичной открытоугольной глаукомой, перенесших трабекулоэктомию, включающий биомикроскопические фотографии и ОКТ-ангиографические томограммы, выполненные в сроки до операции, спустя 1, 2 и 6 недель после. Расчет плотности и извитости сосудистой (по томографическим изображениям), а также показателя гиперемии (по цветным фотографиям) проводили программно по соответствующим формулам. На основе рассчитанных показателей в полученных парах «снимок ОКТ-А – фото ФП» для автоматизации дальнейшего расчета гиперемии по томографической картине с помощью инструмента искусственного интеллекта проводили обучение сверточной нейронной сети с архитектурой U-Net. В результате создано специализированное программное обеспечение, позволяющее количественно оценивать ключевые параметры состояния фильтрационной подушки. Разработанный метод показал высокую точность модели U-Net при обучении (88,24%) и последующем дообучении (85,31%). Таким образом, предложенное решение предоставляет инструмент для объективного мониторинга послеоперационного периода, что может способствовать оптимизации тактики ведения пациентов и улучшению прогноза хирургического лечения глаукомы.

Ключевые слова: фильтрационная подушка, глаукома, машинное зрение, сегментация изображения, ОКТ-ангиография, сверточная нейросеть, трабекулоэктомия

doi: 10.29234/2308-9113-2025-13-4-1-16

Для цитирования: Петров С. Ю., Солодовников В. И., Милаш С. В., Маркелова О. И., Епхиева А. Д., Павлов К. В., Каракотова Н. В. Комбинированный программный метод анализа васкуляризации фильтрационных подушек по томографическим изображениям с использованием методов машинного зрения. *Медицина* 2025; 13(4): 1-16

Введение

Глаукома является наиболее распространенной причиной необратимой слепоты во всем мире [1-3]. Ее распространенность в возрастной группе старше 40 лет составляет в среднем около 3,5% [3]. Прогнозируемое увеличение пациентов с первичной открытоугольной глаукомой (ПОУГ) в мире оценивается с 76,0 млн по данным на 2020 год до 111,8 млн к 2040 год [4]. Внутриглазное давление (ВГД) по-прежнему остается единственным доказанным фактором риска прогрессирования глаукомной оптической нейропатии (ГОН). Согласно Клиническим рекомендациям «Глаукома первичная открытоугольная», рекомендуется снижение уровня ВГД всем пациентам с ПОУГ с целью предотвращения прогрессирования ГОН [5]. Местная гипотензивная терапия остается предпочтительным стартовым лечением из-за ее эффективности благоприятного профиля риска, однако, при наличии повышенного уровня ВГД, которое не может быть нормализовано каким-либо другим методом лечения следует переходить к хирургии [5]. Современное хирургическое лечение включает операции фистулизирующего, непроникающего и дренажного типа. В то же время проведение гипотензивного вмешательства не гарантирует достижения стойкого гипотензивного эффекта, что обусловлено образованием соединительной ткани в зоне антиглаукомной операции и, как следствие, избыточным рубцеванием путей оттока внутриглазной жидкости.

Гипотензивный эффект фистулизирующего антиглаукомного вмешательства во многом определяется состоянием фильтрационной подушки (ФП) [6]. Характерные изменения в биомикроскопической картине ФП зачастую влияют на тактику дальнейшего ведения пациента: усиление местной противовоспалительной терапии, проведение нидлинга с цитостатическими препаратами, хирургическая ревизия зоны оттока внутриглазной жидкости (ВГЖ) [7, 8]. Определение различных групп признаков со временем привело к формированию специализированных классификационных систем ФП, градация по которым коррелирует с прогнозом успешности операций [9-12]. Для оценки биомикроскопических признаков чаще всего применяют Вюрцбургскую классификацию (WBCS, Wüerzburg Bleb Classification Score), оценочную шкалу Института Индианы (IBAGS, Indiana Bleb Appearance Grading Scale), а также Мурфилдскую шкалу (MBGS, Moorfield Bleb Grading System). Данные классификации включают оценку площади, высоты, степени васкуляризации ФП, а также более детальные характеристики конъюнктивальных сосудов (штопорообразная извитость, расширение, наличие микрокист и кровоизлияний). Однако использование только субъективных параметров ограничивает их практическое применение [13].

Ангиогенез традиционно сопровождает образование рубцов, и считается, что сосуды в зоне операции играют решающую роль в заживлении хирургических разрезов [14, 15]. Исследования показали, что местная реакция сосудов на травму является ключевым фактором в фибробластогенезе [16]. Большинство классификаций ФП, включая IBAGS и MBGS представляют системы градации конъюнктивальных сосудов, основанные на весьма субъективном сравнении стандартных фотографий.

Наш коллектив ведет научно-исследовательскую работу по оценке параметров фильтрационных подушек с 2008 года. Совместно с сотрудниками Центра естественно-научных исследований Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН был предложен способ определения локального тканевого насыщения гемоглобина кислородом бульбарной конъюнктивы, основанный на спектроскопии обратного диффузного отражения света от конъюнктивальных сосудов [17, 18]. В 2010 году была разработана программа для ЭВМ «Гиперемия-3» (свидетельство о гос. регистрации 010610642 от 18.01.2010.) которая, после загрузки цифровой фотографии фильтрационной подушки, определяет среднюю степень гиперемии, вычисляя его по проценту яркости красного канала трехканального цифрового изображения от суммарной яркости каналов.

В последнее время появились исследования сосудов фильтрационных подушек с помощью оптической когерентной томографии с функцией ангиографии (ОКТ-А), которая позволяет визуализировать сосудистую сеть не только в поверхностных тканях, но и в более глубоких слоях [19-26]. ОКТ-А позволяет быстро, воспроизводимо и неинвазивно визуализировать сосуды различного диаметра. Кроме того, ОКТ-А может обнаружить кровоток, невидимый с помощью щелевой лампы, обладая глубиной исследования в 2,0 мм. ОКТ-А также является бесконтактным методом, в отличие от ультразвуковой биомикроскопии, не вступает в прямой контакт с ФП. Таким образом, метод ОКТ-А может обеспечить количественную оценку кровотока ФП на основе получаемых томографических изображений.

Томографическое изображение – это результат визуализации оптической когерентной томографии-ангиографии (ОКТ-А), которая использует контрастирование движения эритроцитов для получения информации о кровотоке во внутренних слоях глаза [27]. Таким образом, на чёрно-белом изображении, полученном с использованием ОКТ-А, сосуды отображаются как белые области, поскольку они содержат движущиеся эритроциты, которые изменяют отражение света.

Значимыми параметрами васкуляризации ФП являются:

1. Собственно сама конъюнктивальная васкуляризация – степень конъюнктивальной гиперемии, развивающейся в послеоперационном периоде в области формирующейся фильтрационной подушки. Васкуляризация является следствием расширения преимущественно венозных конъюнктивальных сосудов, как одного из проявлений местной аутоиммунной воспалительной реакции. Считается прогностически неблагоприятным признаком в оценке отдаленной гипотензивной эффективности вмешательства.

2. Штопорообразные сосуды – конъюнктивальные сосуды, преимущественно венозные, с характерной извитостью в виде штопора. Образуются вследствие застойных тканевых процессов в послеоперационном периоде, и также считаются прогностически неблагоприятным признаком.

Как было описано выше, метод ОКТ-А позволил не только перевести исследование на новый цифровой уровень, но и проводить исследование не визуализируемых при биомикроскопии более глубоких сосудов. При этом степень васкуляризации оценивается суммарно как для поверхностных, так и для глубоких сплетений, значимо объективизируя результат, а показатель гиперемии оценивается отдельно, поскольку он продолжает характеризовать состояние визуализируемых сосудов.

И, если оценить васкуляризацию и степень извитости в настоящее время можно по томографическим изображениям, то для оценки гиперемии все еще необходимо проведение цветной цифровой фотографии.

В данной работе мы автоматизировали процесс анализа перечисленных выше параметров с помощью программных алгоритмов и инструментов искусственного интеллекта (машинного зрения).

Методы машинного зрения – это совокупность вычислительных техник и алгоритмов, направленных на автоматический анализ, интерпретацию и обработку визуальной информации, получаемой с помощью различных сенсоров, таких как камеры, сканеры и другие устройства [28]. Методы машинного зрения позволяют обнаруживать и классифицировать объекты, анализировать их внутренние характеристики через извлечение значимых признаков.

Цель исследования

Целью исследования стала разработка комбинированного программного метода определения степени васкуляризации и извитости сосудистой сети фильтрационных подушек, а также гиперемии по томографическим изображениям с использованием методов машинного зрения.

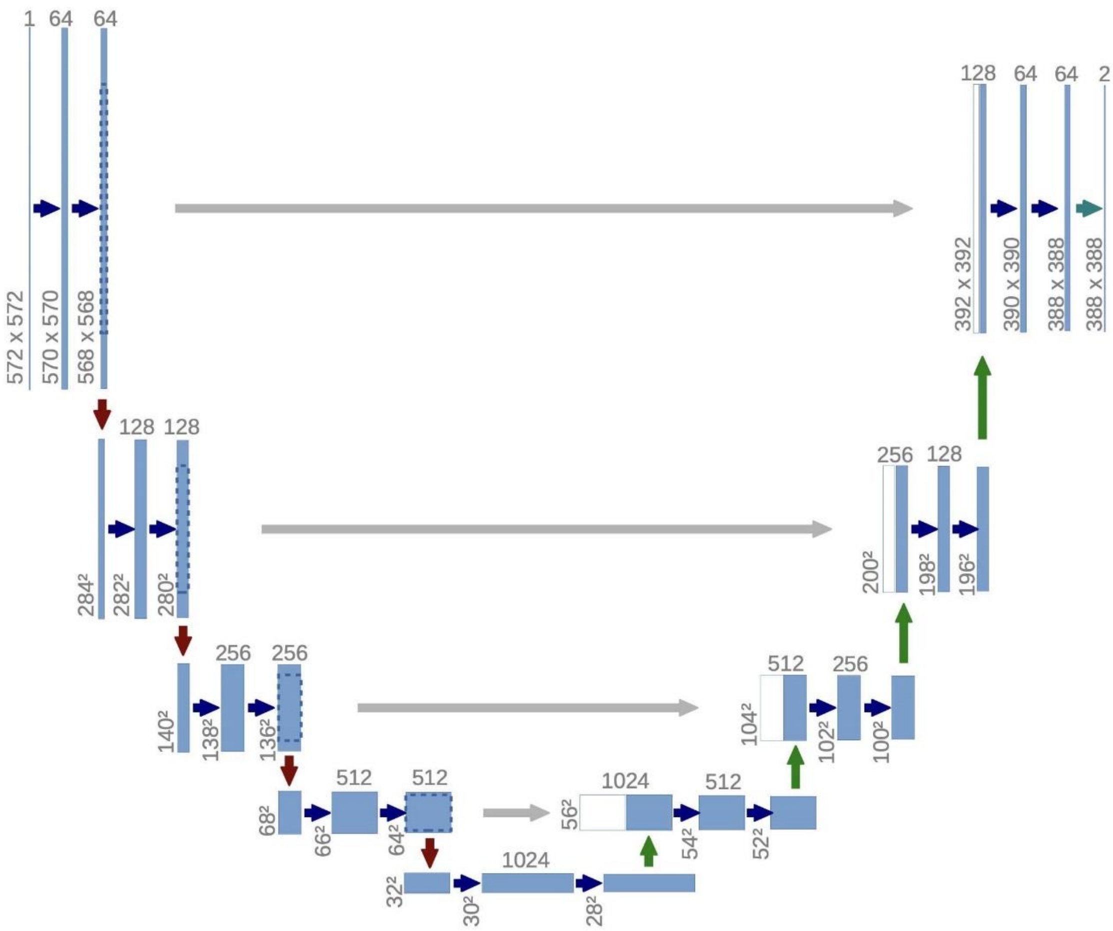
Материалы и методы

Для оценки плотности и извитости сосудов предварительно необходимо программно выделить саму сосудистую сеть на томографическом изображении, для чего применяется метод сегментации графического изображения – процесс разделения изображения на отдельные области, соответствующие различным объектам или структурам [29]. В рамках данной работы применяли бинарную сегментацию, при которой все пиксели изображения относятся либо к классу «сосудистая сеть», либо к классу «фон».

В качестве алгоритма глубокого обучения применяли свёрточную нейронную сеть (Convolutional Neural Networks, CNN) – класс нейронных сетей, используемый для работы с данными, имеющими пространственную структуру, например, изображениями, аудио или видеозаписями [30]. Их ключевая особенность – способность автоматически выделять локальные признаки (например, контуры, текстуры, формы) и комбинировать их в абстрактные представления, что позволяет эффективно обрабатывать многомерные данные, сохраняя пространственные связи между элементами. Свёрточные нейронные сети обучаются с помощью алгоритма обратного распространения ошибки, основанного на вычислении градиентов. На каждом шаге нейронная сеть пропускает данные через слои (прямой проход), генерируя предсказания, вычисляет ошибку между предсказанием и целевым значением с помощью функции потерь, рассчитывает градиенты ошибки по всем параметрам сети (обратный проход) и корректирует веса, выполняя шаг градиентного спуска (параметры обновляются в направлении, противоположном градиенту функции потерь, что минимизирует ошибку.

Среди существующих моделей архитектур нейронных сетей была выбрана архитектура U-Net, которая специально разработана для задач медицинской сегментации и демонстрирует высокую эффективность при обучении на ограниченных размеченных выборках [31]. U-Net имеет симметричную U-образную структуру, включающую три основных компонента: нисходящий (сжимающий) путь, бутылочное горлышко и восходящий (восстанавливающий) путь (рис. 1).

Рис. 1. Архитектура сверточной нейронной сети U-Net.

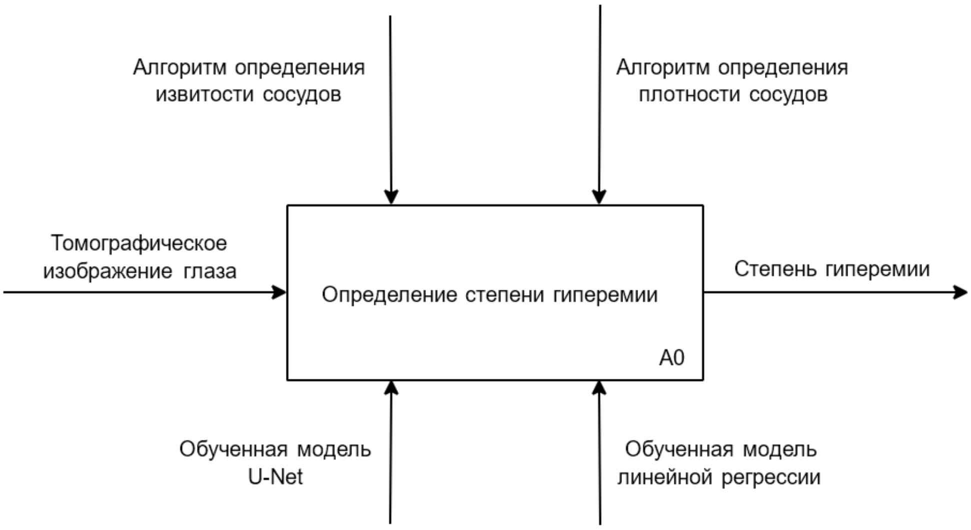


Задача предсказания числового значения из вещественного ряда (в нашем случае степени гиперемии) является задачей регрессией [32]. Для задач регрессии помимо входных данных нужны выходные данные, чтобы обучить модель регрессии, поэтому необходимо подготовить реальные значения степени гиперемии, определённые по цветным изображениям и выделенным областям гиперемии. Для решения поставленной задачи была выбрана линейная регрессия, как базовая модель, предполагающая линейную зависимость между входными признаками.

Был подготовлен клинический датасет биомикроскопических фотографий и томографических изображений ФП 100 пациентов с первичной открытоугольной глаукомой. Всем пациентам была выполнена синустрабекулоэктомия по классической методике. Исследование проводили в сроки до операции, а также спустя 1, 2 и 6 недель после вмешательства. Цветные изображения были получены при помощи интегрированного в щелевую лампу SL-980 (Италия) цифрового фотоаппарата. Томографические изображения были получены при помощи сканирующего лазерного офтальмоскопа «Mirante» (Япония).

На рисунке 2 представлена формализация постановки задачи определения степени гиперемии по томографическим изображениям глаза с учётом выбранных моделей сегментации и регрессии.

Рис. 2. Схема формализации постановки задачи.



К разрабатываемому программному обеспечению были представлены следующие требования:

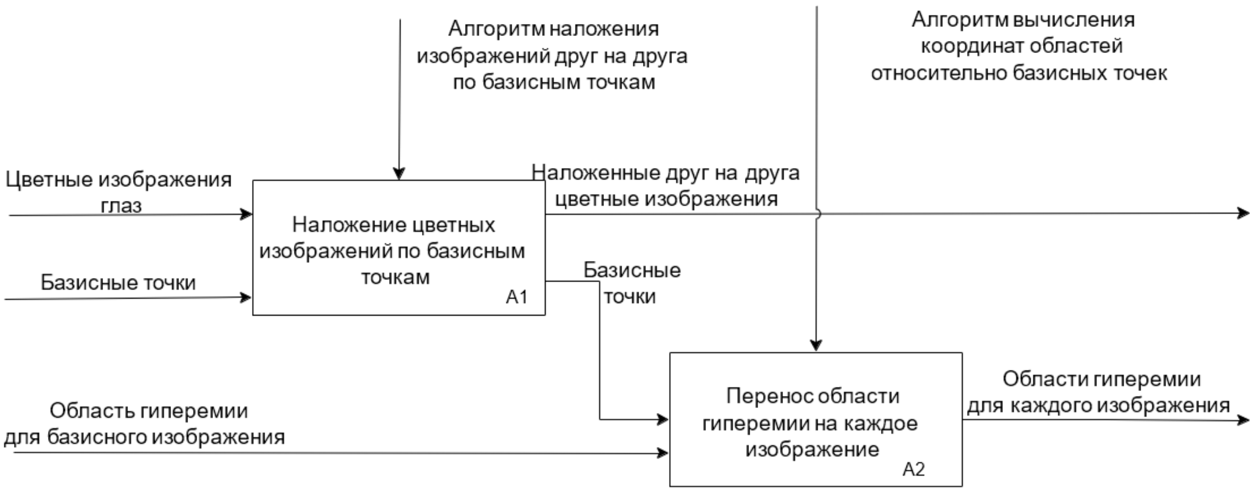
– возможность выбора пациента и даты наблюдения для загрузки данных;

– возможность выделения одинаковой области гиперемии для всех наблюдений пациента;

– возможность просмотра статистики по одному пациенту и по всем пациентам за раз (плотность сосудов, средняя извитость сосудов и степень гиперемии для каждой даты наблюдений).

На рисунке 3 представлена схема работы модуля для работы с областями гиперемии.

Рис. 3. Схема работы модуля для работы с областями гиперемии.



Для выделения одной области гиперемии на всех изображениях (фото биомикроскопической картины ФП) проводили следующее: в ручном режиме задавали по 3 базисные точки для каждого изображения (ФП в динамике), соответствующие одинаковым элементам (изгибам сосудов), программно изображения накладывались друг на друга по базисным точкам, в ручном режиме выделяли исследуемую область гиперемии, программно данная область переносилась на все изображения (рис. 4).

Рис. 4. Экран работы с областями гиперемии: показываются совмещённые изображения всех наблюдений в динамике, в которых были выделены базисные точки.

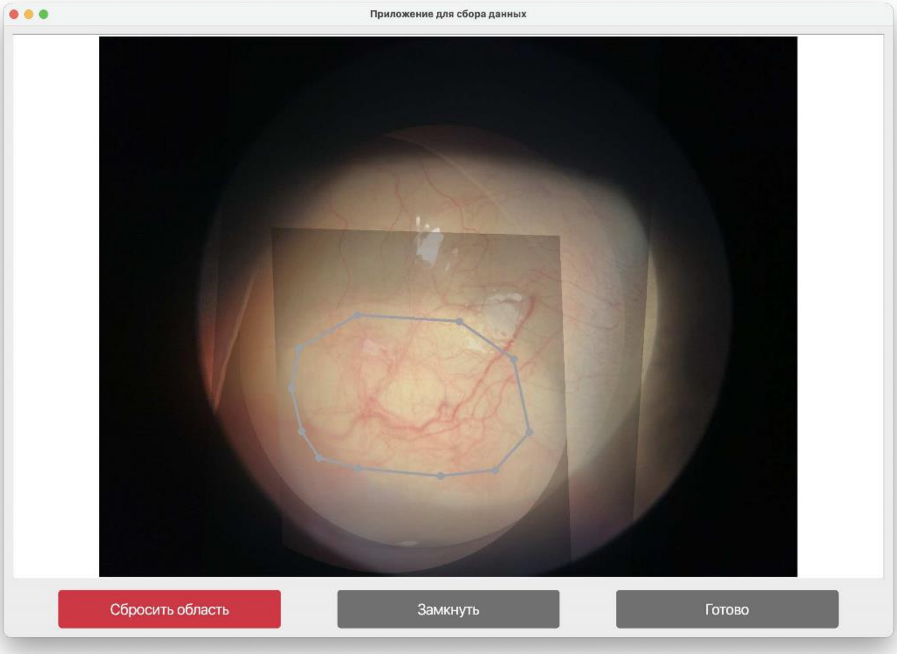
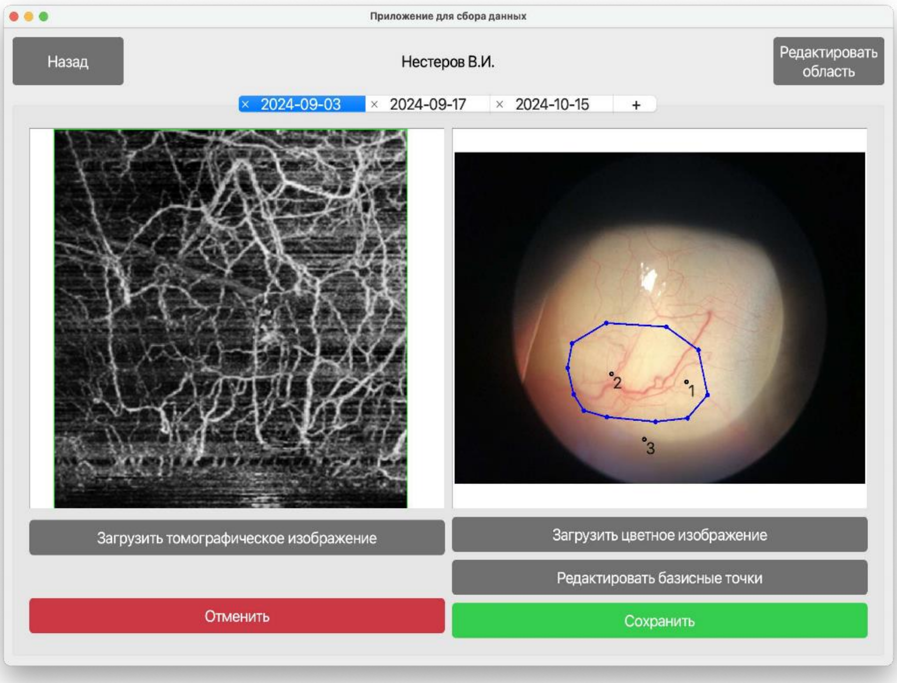


Рис. 5. Экран работы с клиническими наблюдениями.



Определение плотности сосудов. Плотность сосудов – это относительная площадь сосудов на изображении. Исходя из этого плотность можно найти, посмотрев какую долю сегментированного изображения занимают белые пиксели. Так как результат сегментации представляет собой бинарную маску, где сосуды обозначаются белыми пикселями (значение 1), а фон – чёрными (значение 0), вычисление плотности сводится к подсчёту доли белых пикселей от общего числа пикселей изображения.

Для вычисления плотности сосудов применяли формулу:

$$density = \frac{N_{white} \cdot 100\%}{N_{all}},$$

где N_{white} – количество белых пикселей, а N_{all} – количество всех пикселей.

Определение извитости сосудов проводили в несколько этапов: скелетизация (множество точек, равноудалённых от границ объекта), поиск точек ветвлений и концов, анализ извитости ветвей и ее финальное усреднение. Каждый этап описывается соответствующей формулой, которые в рамках ограниченного объема данной публикации не приводятся.

Определение степени гиперемии. Поскольку гиперемия – это видимое покраснение участка конъюнктив, то ее степень вычисляли по формуле:

$$h = 100\% \cdot \frac{3}{2} \cdot \left[\frac{R}{R+G+B} - \frac{1}{3}\right],$$

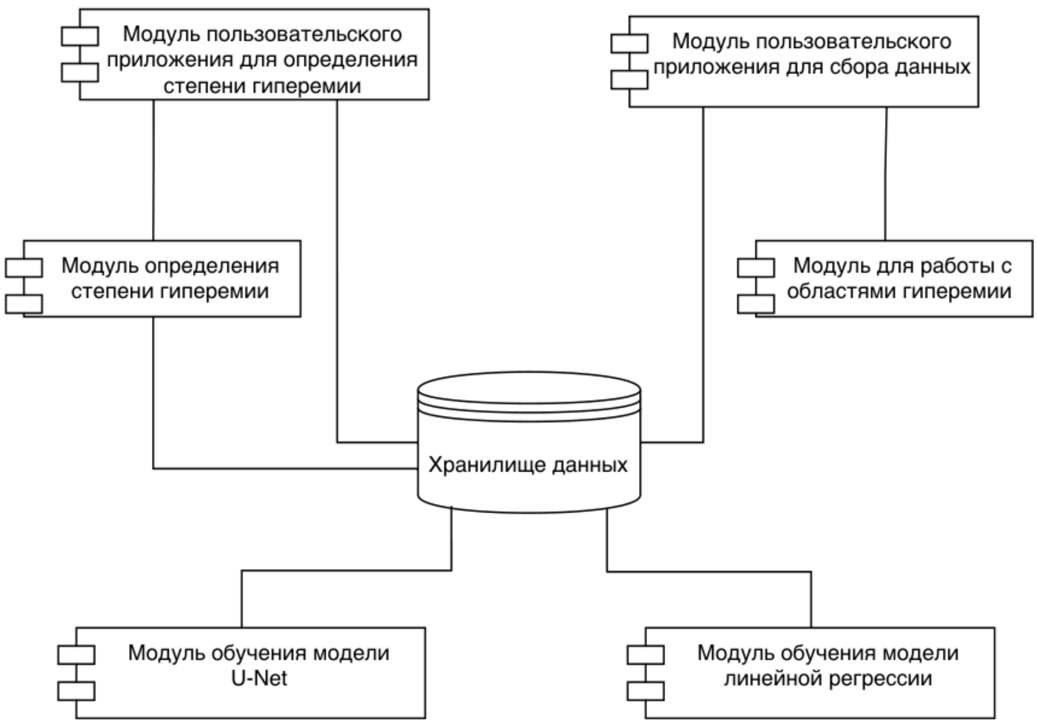
где R, G и B – цифровые значения цвета, лежащие в диапазоне от 0 до 225.

Таким образом, степень гиперемии вычисляется как процентное значение цветовой характеристики в диапазоне от 0% (нейтрально-белый и серый цвет) до 100% (красный цвет цифрового изображения без присутствия синего и зеленого).

В качестве языка программирования был выбран Python, так как в нём реализованы библиотеки для работы с моделями машинного обучения и для написания графического интерфейса.

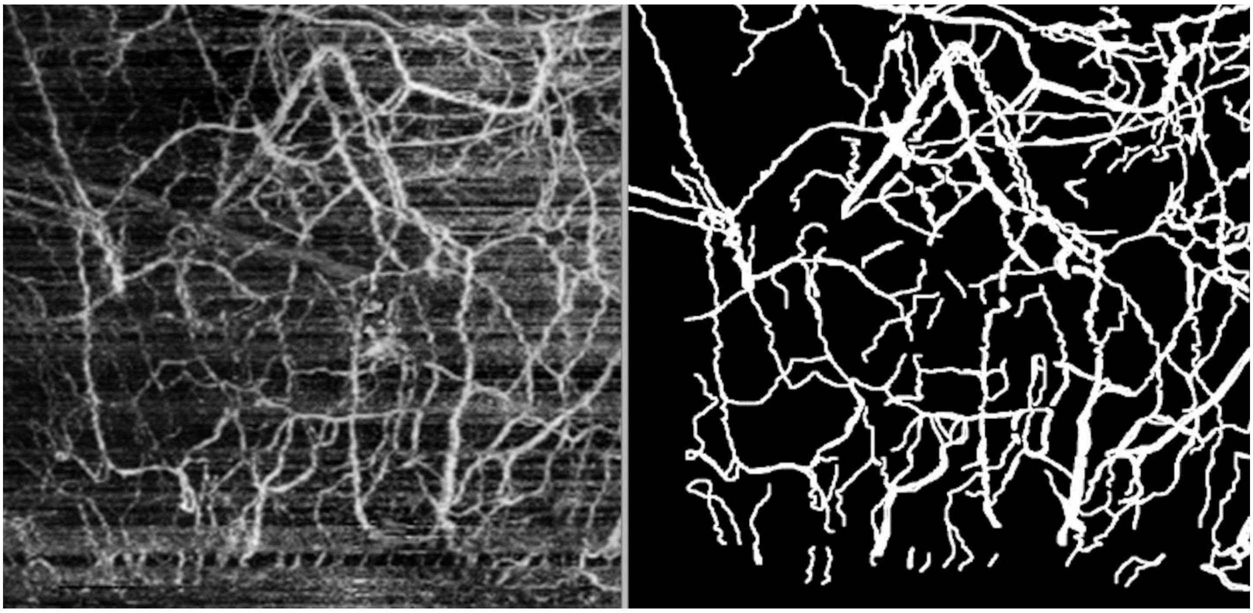
На рисунке 6 представлена схема программного обеспечения.

Рис. 6. Схема программного обеспечения.



Обучение модели U-Net проводили на сформированном датасете клинических изображений и соответствующих им масок, размеченных вручную.

Рис. 7. Пример томографического изображения и соответствующей маски.



Для реализации модели сегментации U-Net использовалась библиотека TensorFlow, так как она позволяет построить архитектуру модели и обучить её. Для реализации модели линейной регрессии применяли библиотеку Scikit-learn, так как она позволяет создать и обучить модель. Для реализации графического интерфейса использовали библиотеку PyQt5. В качестве системы управления базами данных (СУБД) выбрана SQLite, как встраиваемая СУБД без необходимости формирования отдельного сервера, что особенно актуально для медицинских приложений.

Входные и выходные данные удовлетворяли следующим требованиям:

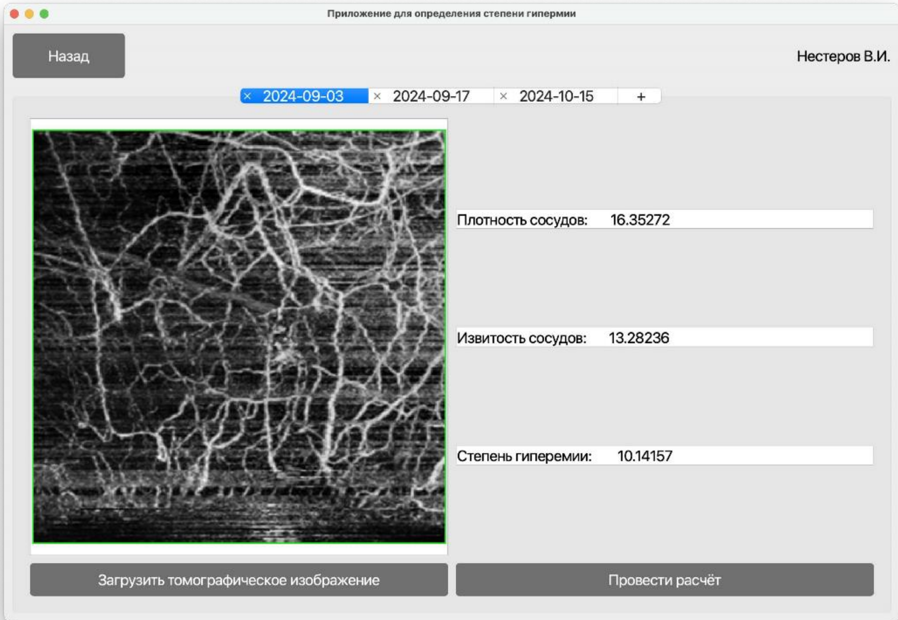
– изображения, загружаемые в программное обеспечение, должны быть представлены в одном из следующих форматов: PNG, BMP, JPEG или JPG;

– даты наблюдений должны иметь формат «YYYY-MM-DD»;

– статистические отчёты, формируемые по одному пациенту и по всем пациентам, должны сохраняться в формате Microsoft Excel.

На рисунке 8 представлен интерфейс финальной программы для работы с наблюдениями. На данном экране можно переключаться между наблюдениями, добавлять наблюдения при нажатии на «+» и удалять наблюдения, нажимая на крестик. Кроме того, на данном экране можно загружать томографические изображения и проводить расчёт для выбранного наблюдения.

Рис. 8. Экран работы с наблюдениями.



Выводы по программно-исследовательской части

По результатам проведённого исследования было установлено, что:

1. Максимальная точность модели U-Net при обучении равняется 88,24%;

2. Максимальная точность модели U-Net при дообучении равняется 85,31%;

3. Максимальная точность сегментации модели U-Net достигается при использовании изображений с разрешением 512×512;

4. Модель линейной регрессии показывает наилучший результат на нашей выборке (R^2 = 0,69).

Заключение

В результате выполнения работы разработан комбинированный программный метод определения степени васкуляризации и извитости сосудистой сети фильтрационных подушек, а также гиперемии по томографическим изображениям с использованием методов машинного зрения. Результаты клинического применения метод будут представлены в следующих публикациях.

Вклад авторов

Петров С. Ю., Солодовников В. И. – концепция и дизайн исследования, анализ полученных данных, написание текста, обзор литературы.

Милаш С. В., Маркелова О. И., Епхиева А. Д., Павлов К. В. – сбор и обработка материалов, написание текста, обзор литературы.

Каракотова Н. В. – разработка и реализация программного обеспечения.

Список литературы

1. Quigley H.A., Broman A.T. The number of people with glaucoma worldwide in 2010 and 2020. *Br J Ophthalmol* 2006; 90(3): 262-267. doi:10.1136/bjo.2005.081224

2. Sotimehin A.E., Ramulu P.Y. Measuring Disability in Glaucoma. *J Glaucoma* 2018; 27(11): 939-949. doi:10.1097/IJG.0000000000001068

3. Tielsch J.M., Katz J., Singh K., Quigley H.A., Gottsch J.D., Javitt J., Sommer A. A population-based evaluation of glaucoma screening: the Baltimore Eye Survey. *Am J Epidemiol* 1991; 134(10): 1102-1110. doi:10.1093/oxfordjournals.aje.a116013

4. Tham Y.C., Li X., Wong T.Y., Quigley H.A., Aung T., Cheng C.Y. Global prevalence of glaucoma and projections of glaucoma burden through 2040: a systematic review and meta-analysis. *Ophthalmology* 2014; 121(11): 2081-2090. doi:10.1016/j.ophtha.2014.05.013

5. Клинические рекомендации «Глаукома первичная открытоугольная» (утверждены МЗ РФ, 17.08.2024).

6. Picht G., Grehn F. Classification of filtering blebs in trabeculectomy: biomicroscopy and functionality. *Curr Opin Ophthalmol* 1998; 9(2): 2-8. doi:10.1097/00055735-199804000-00002

7. Broadway D.C., Bloom P.A., Bunce C., Thiagarajan M., Khaw P.T. Needle revision of failing and failed trabeculectomy blebs with adjunctive 5-fluorouracil: survival analysis. *Ophthalmology* 2004; 111(4): 665-673. doi:10.1016/j.ophtha.2003.07.009

8. Feyi-Waboso A., Ejere H.O. Needling for encapsulated trabeculectomy filtering blebs. *Cochrane Database Syst Rev* 2012; 2012(8): CD003658. doi:10.1002/14651858.CD003658.pub3

9. Cantor L.B., Mantravadi A., WuDunn D., Swamynathan K., Cortes A. Morphologic classification of filtering blebs after glaucoma filtration surgery: the Indiana Bleb Appearance Grading Scale. *J Glaucoma* 2003; 12(3): 266-271. doi:10.1097/00061198-200306000-00015

10. Klink T., Kann G., Ellinger P., Klink J., Grehn F., Guthoff R. The prognostic value of the wuerzburg bleb classification score for the outcome of trabeculectomy. *Ophthalmologica* 2011; 225(1): 55-60. doi:10.1159/000314717

11. Smith M., Chipman M.L., Trope G.E., Buys Y.M. Correlation between the indiana bleb appearance grading scale and intraocular pressure after phacotrabeculectomy. *J Glaucoma* 2009; 18(3): 217-219. doi:10.1097/IJG.0b013e31817d23e0

12. Wells A.P., Ashraff N.N., Hall R.C., Purdie G. Comparison of two clinical Bleb grading systems. *Ophthalmology* 2006; 113(1): 77-83. doi:10.1016/j.ophtha.2005.06.037

13. Еричев В.П., Новиков И.А., Хачатрян Г.К., и др. Объем фильтрационной подушки в прогнозировании эффективности антиглаукомной операции: предварительные результаты. Национальный журнал глаукома. 2024; 23(4):3-10. doi: 10.53432/2078-4104-2024-23-4-3-10.

14. Beer T.W., Baldwin H.C., Goddard J.R., Gallagher P.J., Wright D.H. Angiogenesis in pathological and surgical scars. *Hum Pathol* 1998; 29(11): 1273-1278. doi:10.1016/s0046-8177(98)90256-8

15. Shaunak S., Thomas S., Gianasi E., Godwin A., Jones E., Teo I., Mireskandari K., Luthert P., Duncan R., Patterson S., Khaw P., Brocchini S. Polyvalent dendrimer glucosamine conjugates prevent scar tissue formation. *Nat Biotechnol* 2004; 22(8): 977-984. doi:10.1038/nbt995

16. Brown N.J., Smyth E.A., Cross S.S., Reed M.W. Angiogenesis induction and regression in human surgical wounds. *Wound Repair Regen* 2002; 10(4): 245-251. doi:10.1046/j.1524-475x.2002.10408.x

17. Шмырева В.Ф., Петров С.Ю., Антонов А.А., Сипливый В.И., Стратонников А.А., Савельева Т.А., Шевчик С.А., Рябова А.В. Метод оценки оксигенации субконъюнктивального сосудистого русла с помощью спектроскопии отраженного света (экспериментальное исследование). *Глаукома* 2008; 2: 9-14.

18. Шмырева В.Ф., Петров С.Ю., Антонов А.А., Стратонников А.А., Савельева Т.А., Шевчик С.А., Рябова А.В., Урываев Ю.В. Исследование метаболизма тканей переднего отрезка глаза по уровню оксигенации гемоглобина в венозном русле при первичной открытоугольной глаукоме. *Глаукома* 2008; 3: 3-10.

19. Hayek S., Labbe A., Brasnu E., Hamard P., Baudouin C. Optical Coherence Tomography Angiography Evaluation of Conjunctival Vessels During Filtering Surgery. *Transl Vis Sci Technol* 2019; 8(4): 4. doi:10.1167/tvst.8.4.4

20. Kido A., Akagi T., Ikeda H.O., Kameda T., Suda K., Miyake M., Hasegawa T., Numa S., Tsujikawa A. Longitudinal changes in complete avascular area assessed using anterior segmental optical coherence tomography angiography in filtering trabeculectomy bleb. *Sci Rep* 2021; 11(1): 23418. doi:10.1038/s41598-021-02871-2

21. Liu Z., Wang H., Jiang H., Gameiro G.R., Wang J. Quantitative analysis of conjunctival microvasculature imaged using optical coherence tomography angiography. *Eye Vis (Lond)* 2019; 6(5. doi:10.1186/s40662-019-0130-9

22. Mastropasqua R., Brescia L., Di Antonio L., Guarini D., Giattini D., Zuppardi E., Agnifili L. Angiographic biomarkers of filtering bleb function after XEN gel implantation for glaucoma: an optical coherence tomography-angiography study. *Acta Ophthalmol* 2020; 98(6): e761-e767. doi:10.1111/aos.14371

23. Mastropasqua R., Fasanella V., Agnifili L., Curcio C., Ciancaglini M., Mastropasqua L. Anterior segment optical coherence tomography imaging of conjunctival filtering blebs after glaucoma surgery. *Biomed Res Int* 2014; 2014(610623. doi:10.1155/2014/610623

24. Seo J.H., Kim Y.A., Park K.H., Lee Y. Evaluation of Functional Filtering Bleb Using Optical Coherence Tomography Angiography. *Transl Vis Sci Technol* 2019; 8(3): 14. doi:10.1167/tvst.8.3.14

25. Seo J.H., Lee Y., Shin J.H., Kim Y.A., Park K.H. Comparison of conjunctival vascularity changes using optical coherence tomography angiography after trabeculectomy and phacotrabeculectomy. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 2019; 257(10): 2239-2255. doi:10.1007/s00417-019-04412-0

26. Yin X., Cai Q., Song R., He X., Lu P. Relationship between filtering bleb vascularization and surgical outcomes after trabeculectomy: an optical coherence tomography angiography study. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 2018; 256(12): 2399-2405. doi:10.1007/s00417-018-4136-0

27. de Carlo T.E., Romano A., Waheed N.K., Duker J.S. A review of optical coherence tomography angiography (OCTA). *Int J Retina Vitreous* 2015; 1(5. doi:10.1186/s40942-015-0005-8

28. Lopez M.R., Tyrsa V., Sergiyenko O. Machine Vision: Approaches and Limitations. Computer Vision2008. p. 395-411.

29. Parihar V.R., Boveiri H.R. A Survey and Comparative Analysis on Image Segmentation Techniques. Image Segmentation: A Guide to Image Mining. 2018. p. 1-15.

30. Ghosh A., Sultana F., Sufian A., Chakrabarti A. Fundamental Concepts of Convolutional Neural Network. Recent Trends and Advances in Artificial Intelligence and Internet of Things. 2020. p. 519-567.

31. Ronneberger O., Fischer.P., T. B. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. 2016. p. 234-241.

32. Wei P., Beer M. Regression Models for Machine Learning. Machine Learning in Modeling and Simulation. 2023.

A combined software method for analyzing filtering bleb vascularization from tomographic images using computer vision techniques

Petrov S. Yu.[1]

Solodovnikov V. I.[2]

Milash S. V.[1]

Markelova O. I.[1]

Ephieva A. D.[1]

Pavlov K. V.[1]

Karakotova N. V.[3]

1 - Helmholtz National Medical Research Center of Eye Diseases, Moscow, Russia.
2 - Design Information Technologies Center Russian Academy of Sciences, Moscow Region, Odintsovo, Russia.
3 - Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.

Corresponding Author: *Markelova O. I.;* ***e-mail:*** *levinaoi@mail.ru*
Conflict of interest. *None declared.*
Funding. *The study had no sponsorship.*

Abstract

The state of the filtration bleb is a significant prognostic factor for the outcome of glaucoma surgery; however, existing methods for its assessment are subjective. The aim of this study was to develop an automated method for the objective analysis of filtering bleb images. A dataset of 100 patients with primary open-angle glaucoma who underwent trabeculectomy was used. This dataset included biomicroscopic photographs and OCT-angiographic tomograms performed preoperatively and at 1, 2, and 6 weeks postoperatively. Vascular density and tortuosity (from tomographic images), as well as hyperemia (from color photographs), were calculated programmatically using the corresponding formulas. A convolutional neural network with the U-Net architecture was trained using the calculated parameters in the resulting "OCT-A image - FP photo" pairs to automate the subsequent hyperemia calculation based on the tomographic image using an artificial intelligence tool. This resulted in the creation of specialized software that enables the quantitative assessment of key parameters of the filtration bleb state. The developed method showed high accuracy of the U-Net model during training (88.24%) and subsequent retraining (85.31%). Thus, the proposed solution provides a tool for objective monitoring of the postoperative period, which can contribute to the optimization of patient management strategies and improved prognosis for glaucoma surgery.

Keywords: filtering bleb, glaucoma, computer vision, imaging segmentation, OCT-angiography, convolutional neural network, trabeculectomy

References

1. Quigley H.A., Broman A.T. The number of people with glaucoma worldwide in 2010 and 2020. *Br J Ophthalmol* 2006; 90(3): 262-267. doi:10.1136/bjo.2005.081224

2. Sotimehin A.E., Ramulu P.Y. Measuring Disability in Glaucoma. *J Glaucoma* 2018; 27(11): 939-949. doi:10.1097/IJG.0000000000001068

3. Tielsch J.M., Katz J., Singh K., Quigley H.A., Gottsch J.D., Javitt J., Sommer A. A population-based evaluation of glaucoma screening: the Baltimore Eye Survey. *Am J Epidemiol* 1991; 134(10): 1102-1110. doi:10.1093/oxfordjournals.aje.a116013

4. Tham Y.C., Li X., Wong T.Y., Quigley H.A., Aung T., Cheng C.Y. Global prevalence of glaucoma and projections of glaucoma burden through 2040: a systematic review and meta-analysis. *Ophthalmology* 2014; 121(11): 2081-2090. doi:10.1016/j.ophtha.2014.05.013

5. Клинические рекомендации «Глаукома первичная открытоугольная» (утверждены МЗ РФ, 17.08.2024).

6. Picht G., Grehn F. Classification of filtering blebs in trabeculectomy: biomicroscopy and functionality. *Curr Opin Ophthalmol* 1998; 9(2): 2-8. doi:10.1097/00055735-199804000-00002

7. Broadway D.C., Bloom P.A., Bunce C., Thiagarajan M., Khaw P.T. Needle revision of failing and failed trabeculectomy blebs with adjunctive 5-fluorouracil: survival analysis. *Ophthalmology* 2004; 111(4): 665-673. doi:10.1016/j.ophtha.2003.07.009

8. Feyi-Waboso A., Ejere H.O. Needling for encapsulated trabeculectomy filtering blebs. *Cochrane Database Syst Rev* 2012; 2012(8): CD003658. doi:10.1002/14651858.CD003658.pub3

9. Cantor L.B., Mantravadi A., WuDunn D., Swamynathan K., Cortes A. Morphologic classification of filtering blebs after glaucoma filtration surgery: the Indiana Bleb Appearance Grading Scale. *J Glaucoma* 2003; 12(3): 266-271. doi:10.1097/00061198-200306000-00015

10. Klink T., Kann G., Ellinger P., Klink J., Grehn F., Guthoff R. The prognostic value of the wuerzburg bleb classification score for the outcome of trabeculectomy. *Ophthalmologica* 2011; 225(1): 55-60. doi:10.1159/000314717

11. Smith M., Chipman M.L., Trope G.E., Buys Y.M. Correlation between the indiana bleb appearance grading scale and intraocular pressure after phacotrabeculectomy. *J Glaucoma* 2009; 18(3): 217-219. doi:10.1097/IJG.0b013e31817d23e0

12. Wells A.P., Ashraff N.N., Hall R.C., Purdie G. Comparison of two clinical Bleb grading systems. *Ophthalmology* 2006; 113(1): 77-83. doi:10.1016/j.ophtha.2005.06.037

13. Еричев В.П., Новиков И.А., Хачатрян Г.К., и др. Объем фильтрационной подушки в прогнозировании эффективности антиглаукомной операции: предварительные результаты. Национальный журнал глаукома. 2024; 23(4):3-10. doi: 10.53432/2078-4104-2024-23-4-3-10.

14. Beer T.W., Baldwin H.C., Goddard J.R., Gallagher P.J., Wright D.H. Angiogenesis in pathological and surgical scars. *Hum Pathol* 1998; 29(11): 1273-1278. doi:10.1016/s0046-8177(98)90256-8

15. Shaunak S., Thomas S., Gianasi E., Godwin A., Jones E., Teo I., Mireskandari K., Luthert P., Duncan R., Patterson S., Khaw P., Brocchini S. Polyvalent dendrimer glucosamine conjugates prevent scar tissue formation. *Nat Biotechnol* 2004; 22(8): 977-984. doi:10.1038/nbt995

16. Brown N.J., Smyth E.A., Cross S.S., Reed M.W. Angiogenesis induction and regression in human surgical wounds. *Wound Repair Regen* 2002; 10(4): 245-251. doi:10.1046/j.1524-475x.2002.10408.x

17. Шмырева В.Ф., Петров С.Ю., Антонов А.А., Сипливый В.И., Стратонников А.А., Савельева Т.А., Шевчик С.А., Рябова А.В. Метод оценки оксигенации субконъюнктивального сосудистого русла с помощью спектроскопии отраженного света (экспериментальное исследование). *Глаукома* 2008; 2: 9-14.

18. Шмырева В.Ф., Петров С.Ю., Антонов А.А., Стратонников А.А., Савельева Т.А., Шевчик С.А., Рябова А.В., Урываев Ю.В. Исследование метаболизма тканей переднего отрезка глаза по уровню оксигенации гемоглобина в венозном русле при первичной открытоугольной глаукоме. *Глаукома* 2008; 3: 3-10.

19. Hayek S., Labbe A., Brasnu E., Hamard P., Baudouin C. Optical Coherence Tomography Angiography Evaluation of Conjunctival Vessels During Filtering Surgery. *Transl Vis Sci Technol* 2019; 8(4): 4. doi:10.1167/tvst.8.4.4

20. Kido A., Akagi T., Ikeda H.O., Kameda T., Suda K., Miyake M., Hasegawa T., Numa S., Tsujikawa A. Longitudinal changes in complete avascular area assessed using anterior segmental optical coherence tomography angiography in filtering trabeculectomy bleb. *Sci Rep* 2021; 11(1): 23418. doi:10.1038/s41598-021-02871-2

21. Liu Z., Wang H., Jiang H., Gameiro G.R., Wang J. Quantitative analysis of conjunctival microvasculature imaged using optical coherence tomography angiography. *Eye Vis (Lond)* 2019; 6(5. doi:10.1186/s40662-019-0130-9

22. Mastropasqua R., Brescia L., Di Antonio L., Guarini D., Giattini D., Zuppardi E., Agnifili L. Angiographic biomarkers of filtering bleb function after XEN gel implantation for glaucoma: an optical coherence tomography-angiography study. *Acta Ophthalmol* 2020; 98(6): e761-e767. doi:10.1111/aos.14371

23. Mastropasqua R., Fasanella V., Agnifili L., Curcio C., Ciancaglini M., Mastropasqua L. Anterior segment optical coherence tomography imaging of conjunctival filtering blebs after glaucoma surgery. *Biomed Res Int* 2014; 2014(610623. doi:10.1155/2014/610623

24. Seo J.H., Kim Y.A., Park K.H., Lee Y. Evaluation of Functional Filtering Bleb Using Optical Coherence Tomography Angiography. *Transl Vis Sci Technol* 2019; 8(3): 14. doi:10.1167/tvst.8.3.14

25. Seo J.H., Lee Y., Shin J.H., Kim Y.A., Park K.H. Comparison of conjunctival vascularity changes using optical coherence tomography angiography after trabeculectomy and phacotrabeculectomy. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 2019; 257(10): 2239-2255. doi:10.1007/s00417-019-04412-0

26. Yin X., Cai Q., Song R., He X., Lu P. Relationship between filtering bleb vascularization and surgical outcomes after trabeculectomy: an optical coherence tomography angiography study. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 2018; 256(12): 2399-2405. doi:10.1007/s00417-018-4136-0

27. de Carlo T.E., Romano A., Waheed N.K., Duker J.S. A review of optical coherence tomography angiography (OCTA). *Int J Retina Vitreous* 2015; 1(5. doi:10.1186/s40942-015-0005-8

28. Lopez M.R., Tyrsa V., Sergiyenko O. Machine Vision: Approaches and Limitations. Computer Vision2008. p. 395-411.

29. Parihar V.R., Boveiri H.R. A Survey and Comparative Analysis on Image Segmentation Techniques. Image Segmentation: A Guide to Image Mining. 2018. p. 1-15.

30. Ghosh A., Sultana F., Sufian A., Chakrabarti A. Fundamental Concepts of Convolutional Neural Network. Recent Trends and Advances in Artificial Intelligence and Internet of Things. 2020. p. 519-567.

31. Ronneberger O., Fischer.P., T. B. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. 2016. p. 234-241.

32. Wei P., Beer M. Regression Models for Machine Learning. Machine Learning in Modeling and Simulation. 2023.