



Клинический анализ параметров васкуляризации фильтрационных подушек после синустрабекулэктомии по томографическим изображениям с использованием методов машинного зрения

С.Ю. Петров¹✉, В.И. Солодовников², С.В. Милаш¹, О.И. Маркелова¹, А.Д. Епхиева¹, К.В. Павлов¹, Н.В. Каракотова³

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

² ФГБУ науки «Центр информационных технологий в проектировании» Российской академии наук, ул. Маршала Бирюзова, д. 7а, Одинцово, Московская область, 143000, Россия

³ ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», 2-я Бауманская улица, д. 5, стр. 4, Москва, 105005, Россия

Состояние фильтрационной подушки (ФП) во многом определяет гипотензивный эффект фистулизирующего антиглаукомного вмешательства. Цель работы — проведение клинического анализа параметров васкуляризации ФП после синустрабекулэктомии (СТЭ) по томографическим изображениям с использованием методов машинного зрения. Материал и методы. В исследование включено 83 пациента (100 глаз) в возрасте от 57 до 81 года с первичной открытоугольной глаукомой развитой и далеко зашедшей стадий с выполненной СТЭ по стандартной методике. Проводили фотографию биомикроскопической картины и оптическую когерентную томографию с ангиографией фильтрационной зоны до операции, спустя 1, 2 и 6 нед после нее. Контроль уровня офтальмотонуса осуществляли в указанные сроки бесконтактным пневмотонометром. По томографическому изображению операционной зоны рассчитывали показатели плотности сосудистой сети, извитости сосудов и степени гиперемии. Результаты. Показатели всех оцениваемых параметров ФП в различной степени увеличиваются к 1-й неделе после операции с тенденцией к нормализации к концу 6-й недели. Наибольшие изменения претерпевают плотность сосудистой сети и степень поверхностной гиперемии. Отмечена корреляция высокой степени между сосудистой плотностью и гиперемией во все сроки наблюдения, а также значимая корреляционная взаимосвязь между уровнем послеоперационного внутриглазного давления и плотностью сосудистой сети со 2-й недели наблюдения с тенденцией к увеличению силы связи к 6-й неделе. Заключение. Разработка комбинированного программного метода определения степени васкуляризации и извитости сосудистой сети ФП, а также гиперемии по томографическим изображениям с использованием методов машинного зрения может послужить основой для оценки эффективности хирургического лечения глаукомы.

Ключевые слова: первичная открытоугольная глаукома; синустрабекулэктомия; фильтрационная подушка; томографические изображения; методы машинного зрения; плотность сосудистой сети; конъюнктивальная гиперемия

Конфликт интересов: отсутствует.

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

Для цитирования: Петров С.Ю., Солодовников В.И., Милаш С.В., Маркелова О.И., Епхиева А.Д., Павлов К.В., Каракотова Н.В. Клинический анализ параметров васкуляризации фильтрационных подушек после синустрабекулэктомии по томографическим изображениям с использованием методов машинного зрения. Российский офтальмологический журнал. 2026; 19 (2): 118-25. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2026-19-2-118-125>

Clinical analysis of trabeculectomy filtering bleb vascularization parameters based on tomographic images using machine vision methods

Sergey Yu. Petrov¹✉, Vladimir I. Solodovnikov², Sergey V. Milash¹, Oksana I. Markelova¹, Anzhela D. Epkhieva¹, Kirill V. Pavlov¹, Natalya V. Karakotova³

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

² Design Information Technologies Center of Russian Academy of Sciences, 7A, Marshal Biryuzov St., Odintsovo, Moscow Region, 143000, Russia

³ Bauman Moscow State Technical University, 5, bild. 4, 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005, Russia
glaucomatosis@gmail.com

*The shape of the filtration bleb (FB) largely determines the hypotensive effect of glaucoma surgery. **Purpose:** to conduct a clinical analysis of the vascularization parameters of FB after trabeculectomy based on tomographic images using machine vision techniques. **Material and methods.** 83 patients (100 eyes) aged 57 to 81 years with moderate and advanced primary open-angle glaucoma underwent trabeculectomy using the standard technique. Biomicroscopic photography and optical coherence tomography with angiography of the filtration zone were performed preoperatively and at 1, 2, and 6 weeks postoperatively. IOP levels were monitored using a contactless pneumotonometer. Vascular network density, vascular tortuosity, and the degree of hyperemia were assessed using the tomographic image of the surgical area. **Results.** All assessed FB parameters increased to varying degrees by 1 week postoperatively, with a tendency to normalize by 6 weeks. Vascular density and the degree of superficial hyperemia experienced the greatest changes. A high correlation was observed between vascular density and hyperemia at all follow-up periods, as well as a significant correlation between postoperative IOP and vascular density beginning in the 2nd week of follow-up, with a tendency toward increased strength by 6 weeks. **Conclusion.** The development of a combined software method for determining the degree of vascularization and tortuosity of the FB vascular network, as well as hyperemia, using tomographic images and machine vision techniques can serve as a basis for assessing the effectiveness of glaucoma surgical treatment.*

Keywords: primary open-angle glaucoma; trabeculectomy; filtration bleb; tomographic images; machine vision techniques; vascular density; conjunctival hyperemia

Conflict of interests: there is no conflict of interests.

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

For citation: Petrov S.Yu., Solodovnikov V.I., Milash S.V., Markelova O.I., Epkhieva A.D., Pavlov K.V., Karakotova N.V. Clinical analysis of trabeculectomy filtering bleb vascularization parameters based on tomographic images using machine vision methods. Russian ophthalmological journal. 2026; 19 (2): 118-25 (In Russ.). <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2026-19-2-118-125>

Состояние фильтрационной подушки (ФП) во многом определяет гипотензивный эффект фистулизирующего антиглаукомного вмешательства [1]. 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) [2, 3]. Определение различных групп признаков со временем привело к формированию специализированных классификационных систем ФП, градация по которым коррелирует с прогнозом успешности операций [4–8]. Для оценки биомикроскопических признаков чаще всего применяют Вюрцбургскую классификацию (WBCS, Würzburg 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) [1, 4, 7–9]. Однако использование только субъективных параметров ограничивает их практическое применение [10].

В последние 20 лет с развитием новых методов визуализации структурную оценку ФП стали проводить с помощью ультразвуковой биомикроскопии и оптической когерентной томографии (ОКТ) переднего отрезка глаза [11–24]. Новые методы позволяют оценить такие морфологические параметры, как толщина стенки, размеры внутренней полости, пространства под склеральным лоскутом и внутреннего соустья. Впрочем, несмотря на определение значений указанных параметров в случаях успешно функционирующих ФП, очевидно, что корреляция между ними и достижением целевого внутриглазного давления (ВГД) далеко не очевидна. Так, значительные размеры ФП могут наблюдаться как при нормальных, так и существенно повышенных значениях ВГД.

Так или иначе, ключевым фактором, влияющим на эволюцию ФП, является состояние сосудистой сети зоны операции, поскольку именно выраженность сосудистого фактора напрямую влияет на аутоиммунный воспалительный процесс и избыточное фиброзирование путей оттока [1, 4, 8, 25]. 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 ФП с 2008 г. 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 [26, 27]. В 2010 г. разработана программа для ЭВМ «Гиперемия-3» (свидетельство о гос. регистрации № 010610642 от 18.01.2010), которая после загрузки цифровой фотографии ФП определяет среднюю степень гиперемии, вычисляя ее по проценту яркости красного канала трехканального цифрового изображения относительно суммарной яркости каналов.

В настоящее время произошел значительный прорыв в развитии ОКТ, благодаря внедрению в практику ОКТ с функцией ангиографии (ОКТА) с возможностью визуализации кровотока в микрососудах. Это связано с развитием новых технологий: высокоскоростных ОКТ-томографов, фотоприемников и лазерных источников, которые с большой скоростью перестраиваются в пределах определенной спектральной полосы [28]. ОКТА представляет собой бесконтактный метод, который обладает высоким разрешением и позволяет визуализировать сосудистую сеть без использования контрастных веществ не только в поверхностных тканях, но и в более глубоких слоях. С помощью этого метода можно получить изображения не только крупных сосудов, но и микрососудистого русла, вплоть до капилляров, а также оценить плотность распределения микрососудов. ОКТА заняла ведущее место в исследовании сосудов заднего отрезка глаза, в то же время и сосудистая сеть фильтрационной зоны стала отдельным предметом интереса исследователей, послужив основой для оценки состояния подушки для оценки эффективности хирургического лечения глаукомы [17, 29–35].

В 2025 г. нами был предложен комбинированный программный метод анализа васкуляризации ФП по томографическим изображениям с использованием методов машинного зрения, позволяющий оценить степень васкуляризации, извитости и гиперемии сосудистой сети [36].

ЦЕЛЬ работы — проведение клинического анализа параметров васкуляризации ФП после синустрабекулэктомии (СТЭ) по томографическим изображениям с использованием методов машинного зрения.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Клиническое наблюдательное исследование проведено в 2024–2025 гг. на базе отделов глаукомы и патологии рефракции, бинокулярного зрения и офтальмоэргномики ФГБУ «НМИЦ глазных болезней им. Гельмгольца» Минздрава России.

В исследование включены 83 пациента старше 18 лет (100 глаз) с выполненной СТЭ по стандартной методике с отсепаровкой конъюнктивального лоскута в верхнем квадранте глазного яблока основанием к конъюнктивальному своду, формированием поверхностного склерального лоскута размером 4 × 4 мм основанием к лимбу и репозицией конъюнктивального лоскута с наложением на него 2 узловых швов (викрил 8/0).

Делали фотографию биомикроскопической картины и ОКТА фильтрационной зоны до операции, спустя 1, 2 и 6 нед после нее. Цветные изображения получены при помощи интегрированного в шелевую лампу SL-980 (Италия) цифрового фотоаппарата. Томографические изображения получены на сканирующем лазерном офтальмоскопе Mirante (Япония).

Контроль уровня офтальмотонуса осуществляли в указанные сроки бесконтактным пневмотонометром Canon Full Auto Tonometer TX-F (Япония), используя показатели истинного ВГД Ро.

Для оценки параметров васкуляризации ФП нами был разработан комбинированный программный метод анализа по томографическим изображениям с использованием машинного зрения [36].

Программный модуль производит расчет следующих показателей.

1. Определение плотности сосудов, т. е. относительной площади сосудов на томографическом изображении. Для этого 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 [37]. В рамках данной работы применяли бинарную сегментацию, при которой все пиксели изображения относятся либо к классу «сосудистая сеть», либо к классу «фон». Сосудистую плотность можно определить, 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 — черными (значение 0), вычисление плотности сводится к подсчету доли белых пикселей от общего числа пикселей изображения по формуле:

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

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

2. Определение извитости сосудов проводили в несколько этапов: скелетизация (определение множества точек, равноудаленных от границ объекта), поиск точек ветвлений и концов, анализ извитости ветвей и ее финальное усреднение. Каждый этап описывается соответствующими формулами, которые в рамках ограниченного объема данной публикации не приводятся.

3. Расчет гиперемии фильтрационной зоны. Поскольку гиперемия — это видимое покраснение участка конъюнктивы, 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).

Очевидно, что для данной методики расчета гиперемии требуется цветное фотографическое изображение, получение которого в условиях реальной практики затруднительно вследствие отсутствия интегрированного фотоаппарата в базовой комплектации шелевых ламп.

Нашей задачей стало программное обучение искусственного интеллекта (ИИ) определению гиперемии именно по томографическим изображениям на базе пары «снимок ОКТА — фото ФП».

В качестве алгоритма глубокого обучения применяли сверточную нейронную сеть Convolutional Neural Networks (CNN) — класс нейронных сетей, используемый для работы с данными, имеющими пространственную структуру, например изображениями, аудио или видеозаписями [38].

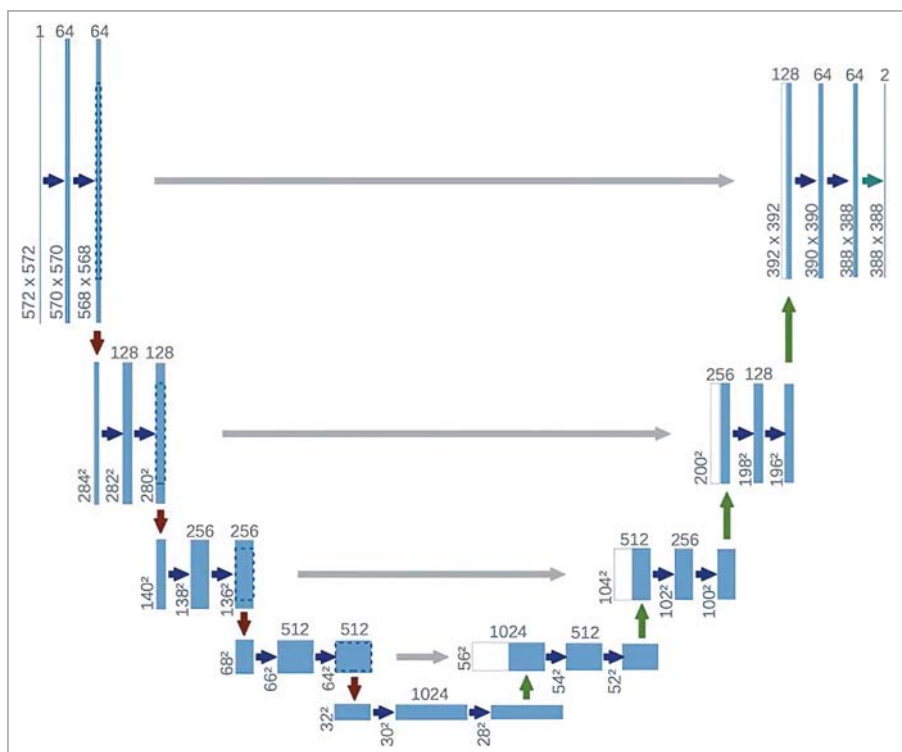


Рис. 1. Архитектура сверточной нейронной сети U-Net
Fig. 1. Architecture of the U-Net convolutional neural network

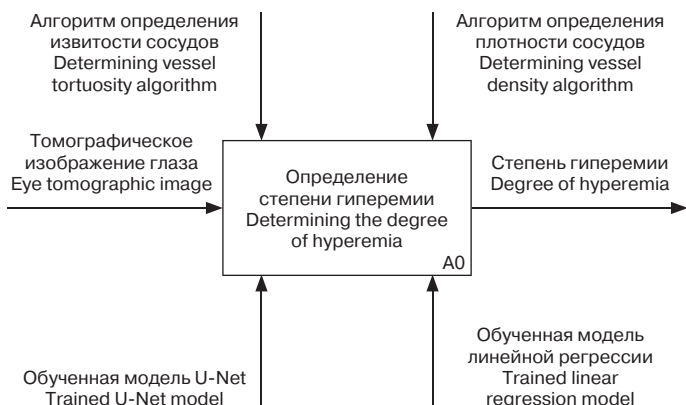


Рис. 2. Схема формализации постановки задачи
Fig. 2. Formalization scheme for the problem statement

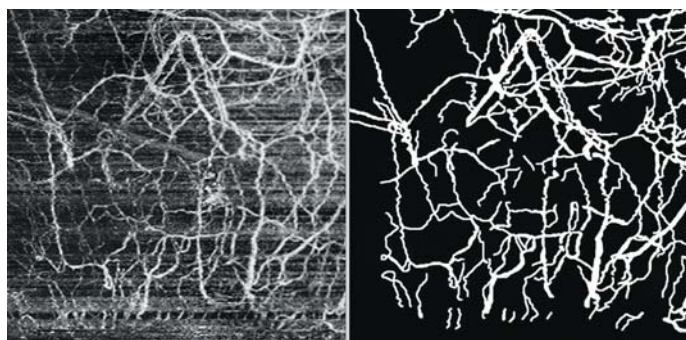


Рис. 3. Пример томографического изображения и соответствующей маски
Fig. 3. An example of a tomographic image and the corresponding mask

включающую три основных компонента: нисходящий (сжимающий) путь, «бутылочное горлышко» и восходящий (восстанавливающий) путь (рис. 1).

Формализация постановки задачи определения степени гиперемии по томографическим изображениям глаза с учетом выбранных моделей сегментации и регрессии представлена на рисунке 2.

Обучение модели U-Net проводили на сформированном датасете клинических изображений и соответствующих им масок, размеченных вручную (рис. 3).

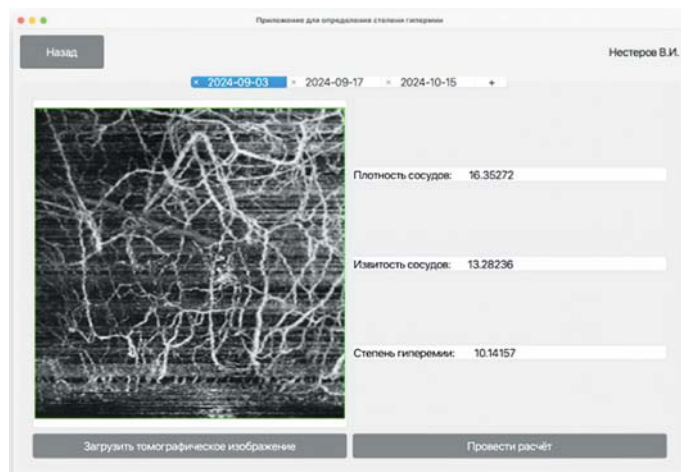


Рис. 4. Экран работы с наблюдениями. После загрузки томографического изображения операционной зоны производится расчет плотности сосудистой сети, извитости и степени гиперемии сосудов
Fig. 4. Observation work screen. After loading the tomographic image of the surgery area, the density, tortuosity and degree of hyperemia of the vessels are calculated

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 отчеты, формируемые по одному пациенту и по всем пациентам, должны сохраняться в формате Microsoft Excel.

Интерфейс финальной программы для работы с наблюдениями представлен на рисунке 4. На данном экране можно переключаться между наблюдениями, добавлять наблюдения при нажатии на «+» и удалять наблюдения, нажимая на крестик. Кроме того, можно загружать томографические изображения и проводить расчет для выбранного наблюдения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Всего в исследование было включено 83 пациента (100 глаз) обоих полов в возрасте от 57 до 81 года (в среднем $73,3 \pm 8,1$ года) с первичной открытоугольной глаукомой (ПОУГ) развитой и далеко зашедшей стадий с декомпенсированным офтальмотонусом. По томографическому

изображению операционной зоны рассчитывали показатели плотности сосудистой сети, извитости сосудов и степени гиперемии. Пример расчета данных показателей у пациента К. 72 лет представлен в таблице 1.

Уровень ВГД (Ро) до операции составил $27,4 \pm 2,1$ мм рт. ст., спустя 1 нед после операции — $11,3 \pm 0,7$ мм рт. ст., через 2 нед — $11,7 \pm 0,9$ мм рт. ст., через 6 нед — $13,3 \pm 1,1$ мм рт. ст.

Динамика сосудистой плотности. Данный показатель в предоперационном периоде продемонстрировал максимальную вариабельность: от 2,35 до 20,65 %, сохранив широкий разброс во все сроки наблюдения (табл. 2, рис. 5). Максимальное увеличение плотности сосудов — на 44,4 % — выявлено спустя 1 нед после операции с плавной нормализацией к 6-й неделе.

Динамика извитости сосудов. Показатель извитости сосудистого русла (штопорообразные сосуды) показал незначительную вариабельность как в предоперационном периоде, так и в последующие сроки (табл. 2, рис. 6). Следует отметить, что, несмотря на субъективное значимое увеличение извитости в ранние сроки, расчетная величина увеличения составила в среднем всего 7,5 % спустя 1 нед после операции с плавной нормализацией к 6-й неделе.

Таблица 1. Пример рассчитываемых показателей в исследуемые сроки пациента К.

Table 1. An example of calculated indicators during the studied periods for patient K.

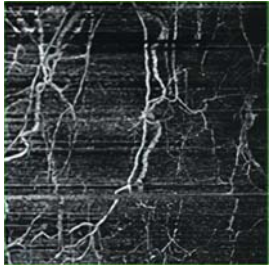
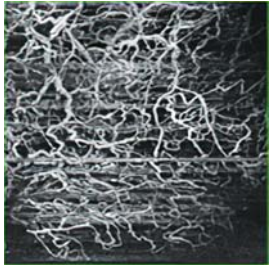
Показатели Parameters	До операции Preoperative	1 нед 1 week	2 нед 2 weeks	6 нед 6 weeks
				
Плотность сосудов, % Vascular density, %	6,85	16,53 (+141,3 %)	12,66 (+84,8 %)	6,99 (+2,0 %)
Извитость сосудов, % Vascular tortuosity, %	12,85	14,96 (+16,4 %)	14,08 (+9,6 %)	13,75 (+7,0 %)
Степень гиперемии, % Degree of hyperemia, %	6,87	11,37 (+65,5 %)	8,81 (+28,2 %)	6,74 (-1,9 %)

Таблица 2. Динамика рассчитываемых показателей в исследуемые сроки

Table 2. Dynamics of the calculated indicators during the studied periods

Показатели Parameters	До операции Preoperative		1 нед 1 week			2 нед 2 weeks			6 нед 6 weeks		
	min-max	M $\pm$ δ	min-max	M $\pm$ δ	Δ	min-max	M $\pm$ δ	Δ	min-max	M $\pm$ δ	Δ
Плотность сосудов, % Vascular density, %	2,35–20,65	11,71 $\pm 4,41$	3,04–27,51	16,91 $\pm 5,54$	+44,4 %	6,04–21,21	15,09 $\pm 4,03$	+28,9 %	6,99–18,67	13,00 $\pm 3,89$	+11,00 %
Извитость сосудов, % Vascular tortuosity, %	11,75–13,88	13,08 $\pm 0,51$	13,23–14,69	14,06 $\pm 0,39$	+7,5 %	13,08–14,64	13,75 $\pm 0,43$	+5,1 %	12,75–14,26	13,61 $\pm 0,53$	+4,0 %
Степень гиперемии, % Degree of hyperemia, %	5,83–11,25	8,57 $\pm 1,48$	8,73–14,75	11,64 $\pm 1,34$	+35,8 %	8,81–12,28	10,62 $\pm 1,01$	+23,9 %	6,74–11,35	9,82 $\pm 1,30$	+14,6 %

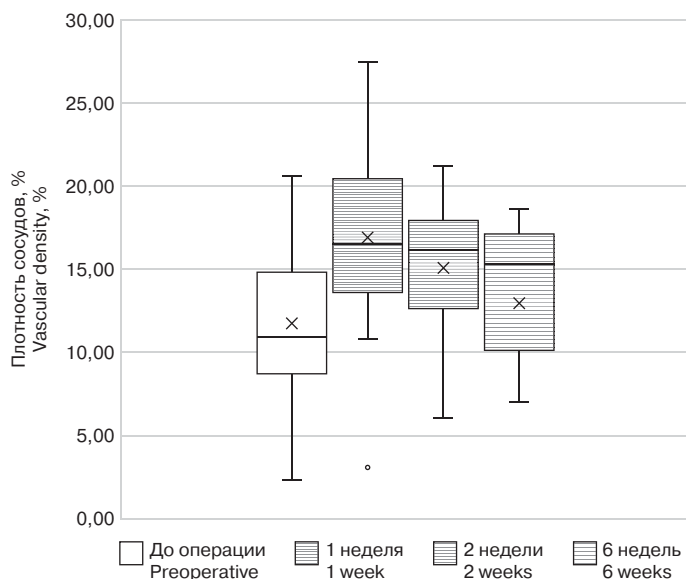


Рис. 5. Динамика плотности сосудов в исследуемые сроки
Fig. 5. Dynamics of vessel density during the studied periods

Динамика показателя гиперемии. Вариабельность степени гиперемии, как и ее динамические изменения в послеоперационном периоде в целом схожи с показателем плотности сосудистой сети, что вполне ожидаемо, поскольку эти параметры взаимосвязаны. Однако, поскольку показатель гиперемии отражает состояние сосудистой сети поверхностных слоев, в то время как плотность сосудов рассчитывается по томографическим изображениям, отображающим все сосуды на глубине до 2 мм, вариабельность гиперемии оказалась менее выраженной, чем плотности (табл. 2, рис. 7). Характерно, что к 6-й неделе полной нормализации гиперемии не отмечено, впрочем, прирост в 14 % в сравнении с предоперационным уровнем вряд ли можно считать значимым.

Взаимосвязь между параметрами. Штопорообразно извитые сосуды — конъюнктивальные сосуды, преимущественно венозные, с характерной извитостью в виде штопора. Образуются вследствие застойных тканевых процессов в послеоперационном периоде, что рассматривается в качестве прогностически неблагоприятного признака. В предоперационном периоде корреляция данного показателя с плотностью сосудистой сети не отмечена, однако спустя 1 и 2 нед фиксировали наличие умеренной связи, которая исчезала к концу периода наблюдения с нормализацией большинства показателей. Какой-либо корреляции между извитостью сосудов и гиперемией не установлено. Не установлено также связи между извитостью и уровнем ВГД до операции, однако в послеоперационном периоде отмечали наличие слабой связи (табл. 3).

Плотность сосудистой сети ожидаемо продемонстрировала высокую корреляционную взаимосвязь с параметром конъюнктивальной гиперемии как до операции, так и во все сроки наблюдения после нее.

Говоря об уровне офтальмотонуса, следует отметить полное отсутствие какой-либо его корреляции со всеми тремя исследуемыми параметрами перед операцией. Наиболее сильная связь уровня ВГД в послеоперационном периоде отмечена с плотностью сосудистой сети и гиперемией со 2-й недели наблюдения. В случае с показателем плотности эта связь усилилась к 6-й неделе, а с гиперемией, наоборот, уменьшилась (табл. 3).

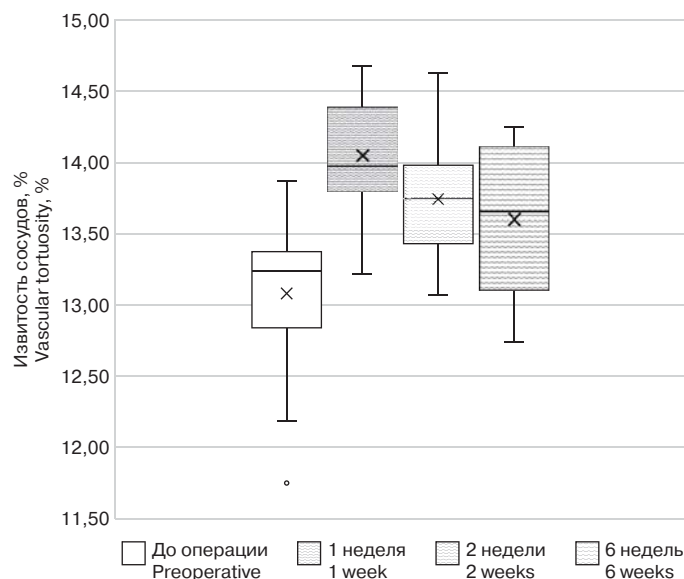


Рис. 6. Динамика извитости сосудов в исследуемые сроки
Fig. 6. Dynamics of vessel tortuosity during the studied periods

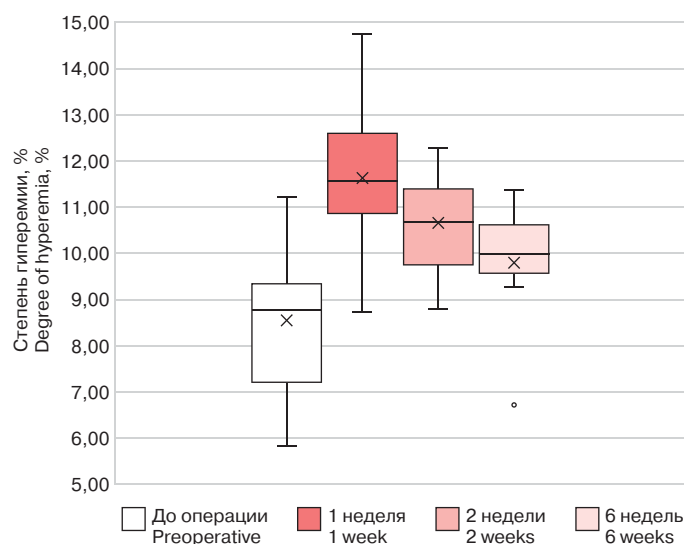


Рис. 7. Динамика показателя гиперемии сосудов в исследуемые сроки
Fig. 7. Dynamics of the vessel's hyperemia index during the studied periods

Таблица 3. Корреляция между исследуемыми параметрами
Table 3. Correlation between the study parameters

Показатели Parameters	До операции Preoperative	1 нед 1 week	2 нед 2 weeks	6 нед 6 weeks
Извитость/плотность Tortuosity/density	0,022	0,408	0,420	0,106
Гиперемия/плотность Hyperemia/density	0,805	0,890	0,750	0,718
Извитость/гиперемия Tortuosity/hyperemia	0,601	0,054	0,286	0,616
ВГД/плотность IOP/density	0,071	0,041	0,850	0,927
ВГД/извитость IOP/tortuosity	0,064	0,237	0,260	0,380
ВГД/гиперемия IOP/hyperemia	0,094	0,164	0,709	0,468

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Разработан комбинированный программный метод определения степени васкуляризации и извитости сосудистой сети ФП, а также гиперемии по томографическим изображениям с использованием методов машинного зрения.
2. Показатели всех оцениваемых параметров ФП в различной степени увеличиваются к 1-й неделе после операции с тенденцией к нормализации к концу 6-й недели. Наибольшие изменения претерпевают плотность сосудистой сети и степень поверхностной гиперемии.
3. Отмечена высокая степень корреляции между сосудистой плотностью и гиперемией во все сроки наблюдения.
4. Отмечена высокая корреляционная взаимосвязь между уровнем послеоперационного ВГД и плотностью сосудистой сети со 2-й недели наблюдения с тенденцией к увеличению силы связи к 6-й неделе.

Литература/References

1. 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
2. Broadway DC, Bloom PA, Bunce C, Thiagarajan M, Khaw PT. Needle revision of failing and failed trabeculectomy blebs with adjunctive 5-fluorouracil: survival analysis. *Ophthalmology*. 2004; 111(4): 665–73. doi: 10.1016/j.ophtha.2003.07.009
3. Feyi-Waboso A, Ejere HO. Needling for encapsulated trabeculectomy filtering blebs. *Cochrane Database Syst Rev*. 2012; 2012 (8): CD003658. doi: 10.1002/14651858.CD003658.pub3
4. Cantor LB, 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 Jun; 12 (3): 266–71. doi: 10.1097/00061198-200306000-00015
5. Klink T, Kann G, Ellinger P, et al. The prognostic value of the wuerzburg bleb classification score for the outcome of trabeculectomy. *Ophthalmologica*. 2011; 225 (1): 55–60. doi: 10.1159/000314717
6. Smith M, Chipman ML, Trope GE, Buys YM. Correlation between the indian bleb appearance grading scale and intraocular pressure after phacotrabeculectomy. *J Glaucoma*. 2009; 18 (3): 217–9. doi: 10.1097/IJG.0b013e31817d23e0
7. Wells AP, Ashraff NN, Hall RC, Purdie G. Comparison of two clinical Bleb grading systems. *Ophthalmology*. 2006; 113 (1): 77–83. doi: 10.1016/j.ophtha.2005.06.037
8. Wells AP, Crowston JG, Marks J, et al. A pilot study of a system for grading of drainage blebs after glaucoma surgery. *J Glaucoma*. 2004; 13 (6): 454–60. doi: 10.1097/00061198-200412000-00005
9. Crowston JG, Kirwan JF, Wells A, Kennedy C, Murdoch I.E. Evaluating clinical signs in trabeculectomized eyes. *Eye (Lond)*. 2004; 18 (3): 299–303. doi: 10.1038/sj.eye.6700638
10. 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. [Erichiev V.P., Novikov I.A., Khachatryan G.K., et al. Volume of the filtering bleb in prediction of the effectiveness of glaucoma surgery: preliminary results. *Natsional'nyi zhurnal Glaukoma*. 2024; 23 (4): 3–10 (In Russ.)]. doi: 10.53432/2078-4104-2024-23-4-3-10
11. Golez E, 3rd, Latina M. The use of anterior segment imaging after trabeculectomy. *Semin Ophthalmol*. 2012; 27 (5–6): 155–9. doi: 10.3109/08820538.2012.707275
12. Ishikawa H, Liebmann JM, Ritch R. Quantitative assessment of the anterior segment using ultrasound biomicroscopy. *Curr Opin Ophthalmol*. 2000; 11 (2): 133–9. doi: 10.1097/00055735-200004000-00012
13. Kawana K, Kiuchi T, Yasuno Y, Oshika T. Evaluation of trabeculectomy blebs using 3-dimensional cornea and anterior segment optical coherence tomography. *Ophthalmology*. 2009; 116 (5): 848–55. doi: 10.1016/j.ophtha.2008.11.019
14. Kojima S, Inoue T, Nakashima K, Fukushima A, Tanihara H. Filtering blebs using 3-dimensional anterior-segment optical coherence tomography: a prospective investigation. *JAMA Ophthalmol*. 2015; 133 (2): 148–56. doi: 10.1001/jamaophthalmol.2014.4489
15. Kokubun T, Kunikata H, Tsuda S, et al. Quantification of the filtering bleb's structure with anterior segment optical coherence tomography. *Clin Exp Ophthalmol*. 2016; 44 (6): 446–54. doi: 10.1111/ceo.12689
16. Leung CK, Yick DW, Kwong YY, et al. Analysis of bleb morphology after trabeculectomy with Visante anterior segment optical coherence tomography. *Br J Ophthalmol*. 2007; 91 (3): 340–4. doi: 10.1136/bjo.2006.100321
17. Mastropasqua R, Fasanella V, Agnifili L, et al. Anterior segment optical coherence tomography imaging of conjunctival filtering blebs after glaucoma surgery. *Biomed Res Int*. 2014; 2014 (610623). doi: 10.1155/2014/610623
18. Napoli PE, Zucca I, Fossarello M. Qualitative and quantitative analysis of filtering blebs with optical coherence tomography. *Can J Ophthalmol*. 2014; 49 (2): 210–6. doi: 10.1016/j.cjco.2013.10.003
19. Narita A, Morizane Y, Miyake T, et al. Characteristics of successful filtering blebs at 1 year after trabeculectomy using swept-source three-dimensional anterior segment optical coherence tomography. *Jpn J Ophthalmol*. 2017; 61 (3): 253–9. doi: 10.1007/s10384-017-0504-2
20. Singh M, Aung T, Aquino MC, Chew PT. Utility of bleb imaging with anterior segment optical coherence tomography in clinical decision-making after trabeculectomy. *J Glaucoma*. 2009; 18 (6): 492–5. doi: 10.1097/IJG.0b013e31818d38ab
21. Singh M, Aung T, Friedman DS, et al. Anterior segment optical coherence tomography imaging of trabeculectomy blebs before and after laser suture lysis. *Am J Ophthalmol*. 2007; 143 (5): 873–5. doi: 10.1016/j.ajo.2006.12.001
22. Singh M, Chew PT, Friedman DS, et al. Imaging of trabeculectomy blebs using anterior segment optical coherence tomography. *Ophthalmology*. 2007; 114 (1): 47–53. doi: 10.1016/j.ophtha.2006.05.078
23. Wen JC, Stinnett SS, Asrani S. Comparison of anterior segment optical coherence tomography bleb grading, Moorfields bleb grading system, and intraocular pressure after trabeculectomy. *J Glaucoma*. 2017; 26 (5): 403–8. doi: 10.1097/IJG.0000000000000636
24. Yamamoto T, Sakuma T, Kitazawa Y. An ultrasound biomicroscopic study of filtering blebs after mitomycin C trabeculectomy. *Ophthalmology*. 1995; 102 (12): 1770–6. doi: 10.1016/s0161-6420(95)30795-6
25. Sacu S, Rainer G, Findl O, Georgopoulos M, Vass C. Correlation between the early morphological appearance of filtering blebs and outcome of trabeculectomy with mitomycin C. *J Glaucoma*. 2003; 12 (5): 430–5. doi: 10.1097/00061198-200310000-00006
26. Шмырева В.Ф., Петров С.Ю., Антонов А.А. и др. Исследование метаболизма тканей переднего отрезка глаза по уровню оксигенации гемоглобина в венозном русле при первичной открытоугольной глаукоме. *Глаукома*. 2008; 3: 3–10. [Shmireva V.F., Petrov S.Yu., Antonov A.A., et al. The study of the metabolism of the tissues in the anterior segment of the eye in relation to hemoglobin oxygenation in venous system at primary open-angle glaucoma. *Glaucoma*. 2008; 3: 3–10 (In Russ.)].
27. Шмырева В.Ф., Петров С.Ю., Антонов А.А. и др. Метод оценки оксигенации субконъюнктивального сосудистого русла с помощью спектроскопии отраженного света (экспериментальное исследование). *Глаукома*. 2008; 2: 9–14. [Shmireva V.F., Petrov S.Yu., Antonov A.A., et al. Method of evaluation of subconjunctival vascular bed with reflected light spectroscopy (experimental study). *Glaucoma*. 2008; 2: 9–14 (In Russ.)].
28. Spaide RF, Fujimoto JG, Waheed NK, Sadda SR, Staurenghi G. Optical coherence tomography angiography. *Prog Retin Eye Res*. 2018; 64: 1–55. doi: 10.1016/j.preteyeres.2017.11.003
29. 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
30. Kido A, Akagi T, Ikeda HO, et al. 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
31. Liu Z, Wang H, Jiang H, Gameiro GR, Wang J. Quantitative analysis of conjunctival microvasculature imaged using optical coherence tomography angiography. *Eye Vis (Lond)*. 2019; 2:6:5 eCollection 2019. doi: 10.1186/s40662-019-0130-9
32. Mastropasqua R, Brescia L, Di Antonio L, et al. Angiographic biomarkers of filtering bleb function after XEN gel implantation for glaucoma: an optical coherence tomography-angiography study. *Acta Ophthalmol*. 2020; 98 (6): e761–e7. doi: 10.1111/aos.14371
33. Seo JH, Kim YA, Park KH, 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
34. Seo JH, Lee Y, Shin JH, Kim YA, Park KH. Comparison of conjunctival vascularization changes using optical coherence tomography angiography after trabeculectomy and phacotrabeculectomy. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. 2019; 257 (10): 2239–55. doi: 10.1007/s00417-019-04412-0
35. 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): 2399–405. doi: 10.1007/s00417-018-4136-0
36. Петров С.Ю., Солодовников В.И., Милаш С.В. и др. Комбинированный программный метод анализа васкуляризации фильтрационных подушек по томографическим изображениям с использованием методов машинного зрения. *Медицина*. 2025; 13 (4): 1–16. [Petrov S.Yu., Solodovnikov V.I., Milash S.V. A combined software method for analyzing

filtering bleb vascularization parameters from tomographic images using machine vision methods. *Medicine*. 2025; 13 (4): 1–16 (In Russ.)]. doi: 10.29234/2308-9113-2025-13-4-1-16

37. Parihar VR, Boveiri HR. A survey and comparative analysis on image segmentation techniques. *Image segmentation: A guide to image mining*. 2018.

38. 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: 519–67.
39. Ronneberger O, Fischer P, Brox T. U-Net: Convolutional Networks for biomedical image segmentation. *International conference on medical image computing and computer-assisted intervention*. 2016: 234–41.

Вклад авторов в работу: С.Ю. Петров, В.И. Солодовников — концепция и дизайн исследования, обзор литературы, сбор и анализ данных, написание статьи; С.В. Милаш, О.И. Маркелова, А.Д. Епхьева, К.В. Павлов — обзор литературы, сбор и обработка данных, написание статьи; Н.В. Каракотова — разработка программного обеспечения.

Authors' contribution: S.Yu. Petrov, V.I. Solodovnikov — concept and design of the study, review of the literature, data collection and analysis, writing of the article; S.V. Milash, O.I. Markelova, A.D. Epkhieva, K.V. Pavlov — review of the literature, data collection and processing, writing of the article; N.V. Karakotova — software development.

Поступила: 24.10.2025. Переработана: 07.11.2025. Принята к печати: 08.11.2025

Originally received: 24.10.2025. Final revision: 07.11.2025. Accepted: 08.11.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Сергей Юрьевич Петров — д-р мед. наук, начальник отдела глаукомы, ORCID 0000-0001-6922-0464

Сергей Викторович Милаш — канд. мед. наук, старший научный сотрудник отдела патологии рефракции, бинокулярного зрения и офтальмоэргномики, ORCID 0000-0002-3553-9896

Оксана Игоревна Маркелова — младший научный сотрудник отдела глаукомы, ORCID 0000-0002-8090-6034

Анжела Давидовна Епхьева — аспирант отдела глаукомы, ORCID 0009-0006-8100-9681

Кирилл Владиславович Павлов — аспирант отдела глаукомы, ORCID 0009-0006-9009-6545

ФГБУ науки «Центр информационных технологий в проектировании» Российской академии наук, ул. Маршала Бирюзова, д. 7а, Одинцово, Московская область, 143000, Россия

Владимир Игоревич Солодовников — канд. техн. наук, директор, ORCID 0000-0001-5533-214X

ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана 2-я Бауманская улица, д. 5, стр. 4, Москва, 105055, Россия

Наталья Владимировна Каракотова — студент

Для контактов: Сергей Юрьевич Петров, glaucomatosis@gmail.com

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

Sergey Yu. Petrov — Dr. of Med. Sci., head of glaucoma department, ORCID 0000-0001-6922-0464

Sergei V. Milash — Cand. of Med. Sci., senior researcher, department of refraction pathology, binocular vision and ophthalmoeconomics, ORCID 0000-0002-3553-9896

Oksana I. Markelova — junior researcher, glaucoma department, ORCID 0000-0002-8090-6034

Anzhela D. Epkhieva — PhD, glaucoma department, ORCID 0009-0006-8100-9681

Kirill V. Pavlov — PhD, glaucoma department, ORCID 0009-0006-9009-6545

Design Information Technologies Center Russian Academy of Sciences, 7A, Marshal Biryuzov St., Odintsovo, Moscow Region, 143000, Russia

Vladimir I. Solodovnikov — Cand. of Techn. Sci., director, ORCID 0000-0001-5533-214X

Bauman Moscow State Technical University, 5, Build. 4, 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105055, Russia

Natalya V. Karakotova — student

For contacts: Sergey Yu. Petrov, glaucomatosis@gmail.com