

# Оригинальная методика оценки микроциркуляторного русла перипапиллярной зоны диска зрительного нерва при первичной открытоугольной глаукоме

**Фомин Н.Е.**, врач-офтальмолог, ассистент кафедры офтальмологии<sup>1</sup>;  
<https://orcid.org/0000-0002-7738-1839>

**Куроедов А.В.**, д.м.н., начальник офтальмологического центра<sup>2</sup>, профессор кафедры офтальмологии<sup>1</sup>;  
<https://orcid.org/0000-0001-9606-0566>

**Архаров М.А.**, студент 5-го курса<sup>3</sup>; <https://orcid.org/0000-0002-4562-8569>

**Прохоренко В.В.**, студент 3-го курса<sup>3</sup>. <https://orcid.org/0000-0001-5575-0181>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России, 117997, Российская Федерация, Москва, ул. Островитянова, 1;

<sup>2</sup>ФКУ ЦВКГ им. П.В. Мандрыка Минобороны России, 107014, Российская Федерация, Москва, ул. Б. Оленья, 8А;

<sup>3</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет), 105005, Российская Федерация, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1.

**Финансирование:** авторы не получили финансирование при проведении исследования и написании статьи.

**Конфликт интересов:** отсутствует.

**Для цитирования:** Фомин Н.Е., Куроедов А.В., Архаров М.А., Прохоренко В.В. Оригинальная методика оценки состояния микроциркуляторного русла перипапиллярной зоны диска зрительного нерва при первичной открытоугольной глаукоме. *Национальный журнал глаукома*. 2024; 23(2):3-10.

## Резюме

**ЦЕЛЬ.** Изучить состояние микроциркуляции перипапиллярной зоны диска зрительного нерва (ДЗН) с применением оригинального метода объективной оценки в условиях отсутствия необходимого лицензированного программного обеспечения.

**МЕТОДЫ.** Всего включено 30 пациентов (30 глаз). Основную группу составили пациенты с начальной (1 подгруппа, 10 глаз) и далекозашедшей (2 подгруппа, 10 глаз) стадиями первичной открытоугольной глаукомы (ПОУГ), контрольную — лица с неотягощенным офтальмологическим анамнезом (10 глаз). Исследовали перипапиллярную зону ДЗН с применением оптической когерентной томографии с функцией ангиографии (ОКТ-А). Для оценки на сканах распространённости сосудистого русла был разработан оригинальный скрипт на языке Python, анализирующий массив элементов с информацией о собственной яркости.

**РЕЗУЛЬТАТЫ.** Подгруппа 2 наиболее отличались от подгруппы 1 дефицитом капилляров в поверхностном

слое. Были установлены различия между плотностью капиллярной сети в поверхностном и глубоком сосудистых сплетениях между группами, в поверхностном они были статистически значимыми (подгруппа 1 —  $27444,5 \pm 1372,2$ ; подгруппа 2 —  $14126,5 \pm 706,3$ ; контрольная группа —  $45198,5 \pm 2259,9$ ). Корреляционный анализ при далекозашедшей стадии глаукомы подтвердил практически полную атрофию поверхностного слоя, который стал почти «прозрачным» для прибора.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Оригинальная методика, основанная на возможностях комбинации технологии ОКТ-А и дополнительного машинного анализа, может быть использована в составе комплексной диагностики ПОУГ как для подтверждения стадии глаукомного процесса, так и для оценки эффективности проводимых лечебных мероприятий.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** открытоугольная глаукома, диск зрительного нерва, оптическая когерентная томография – ангиография, перипапиллярная зона, сосудистое сплетение.

## Для контактов:

**Фомин Николай Евгеньевич**, e-mail: [nikolay.fomin2608@yandex.ru](mailto:nikolay.fomin2608@yandex.ru)

## ORIGINAL ARTICLE

## Original method for evaluating the microcirculatory bed of the peripapillary optic nerve head in primary open-angle glaucoma

**FOMIN N.E.**, ophthalmologist, Assistant at the Academic Department of Ophthalmology<sup>1</sup>; <https://orcid.org/0000-0002-7738-1839>

**KUROYEDOV A.V.**, Dr. Sci. (Med.), Head of the Ophthalmology Centre<sup>2</sup>, Professor at the Academic Department of Ophthalmology<sup>1</sup>; <https://orcid.org/0000-0001-9606-0566>

**ARKHAROV M.A.**, fifth-year student<sup>3</sup>; <https://orcid.org/0000-0002-4562-8569>

**PROKHORENKO V.V.**, third-year student<sup>3</sup>; <https://orcid.org/0000-0001-5575-0181>

<sup>1</sup>Pirogov Russian National Research Medical University, 1 Ostrovityanova St., Moscow, Russian Federation, 11799;

<sup>2</sup>Mandryka Central Clinical Military Hospital, 8A Bolshaya Olenya St., Moscow, Russian Federation, 107014;

<sup>3</sup>Bauman Moscow State Technical University, 5 Bld. 1 Vtoraya Baumanskaya St., Moscow, Russian Federation, 105005.

**Funding:** the authors received no specific funding for this work.

**Conflicts of Interest:** none declared.

**For citations:** Fomin N.E., Kuroyedov A.V., Arkharov M.A., Prokhorenko V.V. Original method for evaluating the microcirculatory bed of the peripapillary optic nerve head in primary open-angle glaucoma.

*Natsional'nyi zhurnal glaukoma.* 2024; 23(2):3-10.

## Abstract

**PURPOSE.** To study the state of microcirculation in the peripapillary region of the optic nerve head (ONH) using an original method of objective assessment in the absence of the necessary licensed software.

**METHODS.** A total of 30 patients (30 eyes) were included. The main group consisted of patients with early (subgroup 1, 10 eyes) and advanced (subgroup 2, 10 eyes) stages of primary open-angle glaucoma (POAG), the control group – individuals without history of ophthalmic complications (10 eyes). The peripapillary region of the ONH was examined using optical coherence tomography angiography (OCT-A). An original script was written in Python language for assessment of the prevalence of the vascular bed on the scans, analyzing an array of elements with brightness data.

**RESULTS.** Subgroup 2 differed most from subgroup 1 in capillary deficiency in the superficial layer. Differences

between the groups were found in the capillary network density in the superficial and deep vascular plexuses, in the superficial layer they were statistically significant (subgroup 1 –  $27444.5 \pm 1372.2$ ; subgroup 2 –  $14126.5 \pm 706.3$ ; control group –  $45198.5 \pm 2259.9$ ). Correlation analysis in advanced glaucoma confirmed almost complete atrophy of the superficial layer, which became almost "transparent" to the device.

**CONCLUSION.** The developed method, based on the capabilities of OCT-A and additional machine analysis, can be used in the complex diagnostics of POAG both to confirm the stage of the pathological process and to assess the effectiveness of the ongoing therapeutic measures.

**KEYWORDS:** open-angle glaucoma, optic nerve head, optical coherence tomography angiography, peripapillary zone, vascular plexus.

Глаукома является одной из основных причин необратимой слепоты во всем мире [1]. По мере роста доли лиц старше 40 лет растет и распространенность глаукомы. Заболевание рассматривается как многофакторное, важное значение в развитии которого имеют сосудистые нарушения в системе кровообращения зрительного нерва, эксайтотоксичность, градиент ликворного и внутриглазного давления (ВГД), склеропатия, различная толерантность зрительного нерва к уровням ВГД и индивидуальная норма последнего. Значимую роль в развитии и прогрессировании глаукомы имеют различные системные и локальные факторы риска. Это приводит к очевидной сложности своевременной диагностики ПОУГ на ее ранних стадиях [2–6].

В настоящий момент (учитывая доказанные факторы патогенеза заболевания) большое значение уделяется оценке состояния микрогемодинамики глаза и морфометрических изменений диска зрительного нерва (ДЗН), а одной из наиболее перспективных методик диагностики признано применение технологии оптической когерентной томографии с ангиографией (ОКТА) [7, 8]. С ее помощью можно получить информацию о состоянии послойного кровотока сосудов сетчатки и перипапиллярной зоны ДЗН. Применение ОКТА позволяет визуализировать мельчайшие сосуды, вплоть до капилляров различного калибра в различных областях сетчатки и на разной ее глубине (в области поверхностных и глубоких сплетений, а также

аваскулярном комплексе) [7, 9–13]. Внедрение визуализации сосудистого русла сетчатки и ДЗН посредством использования ОКТА позволяет оценить интенсивность кровотока как самого ДЗН, так и перипапиллярной сетчатки, а также оценить динамику этих изменений соответственно стадии ПОУГ.

Цель исследования — изучение состояния микроциркуляции перипапиллярной зоны ДЗН с применением оригинального метода объективной оценки в условиях отсутствия необходимого лицензированного программного обеспечения.

## Материал и методы

На базе офтальмологического центра ФКУ ЦВКГ им. П.В. Мандрыка Минобороны России в период с 1 сентября по 1 ноября 2022 года были обследованы 20 пациентов с ПОУГ (15 мужчин, 15 глаз и 5 женщин, 5 глаз), и 10 пациентов (10 глаз) группы контроля, не имеющих глаукомного анамнеза. Во всех случаях диагноз был установлен в соответствии с системой дифференциальной диагностики заболеваний и подтвержден специальными методами исследования. Для изучения перипапиллярной зоны ДЗН применяли технологию ОКТА с использованием оптического когерентного томографа Spectralis OCT (Heidelberg Engineering, Германия) по протоколу ОКТА макулярной зоны сетчатки. Оценка состояния поля зрения проводили с помощью компьютерного статического периметра HFA 750i (Carl Zeiss-Meditec, Германия, США), при которой использовали пороговый тест Threshold 24-2. Для оценки ВГД использовали анализатор вязко-эластических свойств роговицы (ORA, Reichert, США). Для минимизации погрешности измерений, связанных с состоянием толщины роговицы в центральной оптической зоне, основным показателем считали роговично-компенсированный уровень ВГД (IOPcc) [2, 3]. Изучение снимков глаз с целью определения распространенности сосудистого русла (из-за отсутствия необходимого встроенного программного обеспечения) было проведено с помощью машинного анализа, для которого был разработан оригинальный скрипт на языке программирования Python.

**Критерии включения:** один глаз пациента с наиболее выраженными изменениями (у лиц основной группы); наличие простой формы ПОУГ, верифицированной не ранее 6 месяцев до момента включения в исследование; компенсированный уровень ВГД, соответствующий требованиям, указанным в актуальных клинических рекомендациях; отсутствие в анамнезе сопутствующей офтальмопатологии и травм глаза; размер передне-задней оси глаза от 23 до 24 мм; острота зрения  $>0,5$ ; миопия или гиперметропия  $<3$  дптр и астигматизм  $<1,5$  дптр.

**Критерии исключения:** иные формы ПОУГ, кроме указанной выше; наличие соматической патологии в стадии декомпенсации; отказ от подписания добровольного информированного согласия на участие в исследовании.

Статистический анализ проводили с использованием программных систем: SPSS (IBM), SAS (SAS Institute North Carolina), Minitab (Minitab Inc.), Stata (StataCorp.) и MS Excel (Microsoft; все — США) и веб-ресурсов: StatPages.net и G-Power. Параметры, имеющие распределение отличное от нормального, представлены в формате Me [Q25%; Q75%], где Me — медиана, Q25% и Q75% — квартили. Для проверки равенства медиан нескольких выборок применяли H-критерий Краскела – Уоллеса. При отличном от нормального распределении для сравнения нескольких независимых выборок использовали: для попарного сравнения двух независимых выборок — Z-аппроксимацию U-критерия Манна – Уитни, для повторных внутригрупповых сравнений — Z-аппроксимацию T-критерия Вилкоксона. Критический уровень значимости при проверке статистических гипотез принимался равным  $<0,05$ .

## Результаты и обсуждение

Пациенты были разделены на 2 группы: основную группу составили пациенты с начальной (1 подгруппа, средний возраст — 74 года) и далеко зашедшей (2 подгруппа, средний возраст — 73,2 года) стадиями первичной открытоугольной глаукомы (ПОУГ), третью (контрольную, средний возраст — 68,9 лет) группу составили 10 здоровых человек. Сравнительная клиническая характеристика исследуемых приведена в *табл. 1*, из которой видно, что лица контрольной группы были моложе пациентов с глаукомой, при этом возрастных гендерных различий установлено не было.

Пациенты первой подгруппы в 70% случаях получали местную медикаментозную терапию, состоящую из препаратов двух фармакологических групп, в 20% случаях ранее было выполнено лазерное лечение (во всех случаях — селективная лазерная трабекулопластика, СЛТ), а в 10% были ранее оперированы. Пациенты второй подгруппы в 50% случаев были оперированы с использованием классической инцизионной хирургии, в 10% случаев была выполнена СЛТ. Кроме этого, все пациенты второй подгруппы получали местное гипотензивное лечение, при этом в 20% случаев для достижения «целевого» уровня ВГД использовали монотерапию, а в остальных случаях применялись от 2 лекарственных препаратов. Пациенты контрольной группы лечение не получали. Наиболее часто используемыми медикаментозными препаратами в качестве постоянной топической гипотензивной терапии были препараты из группы бета-адреноблокаторов

Таблица 1. Эпидемиологические характеристики пациентов, n=30.  
Table 1. Epidemiological characteristics of study patients, n=30.

	Основная группа / Main group		Контрольная группа, n=10, абс./% Control group, n=10, abs./%	Достоверность, p Statistical significance, p
	Подгруппа 1, n=10, абс./% Subgroup 1, n=10, abs./%	Подгруппа 2, n=10, абс./% Subgroup 2, n=10, abs./%		
Мужчины, n=19 Men, n=19	7 (70)	8 (80)	6 (60)	p <sub>1-2</sub> =0,524 p <sub>1-3</sub> =0,681 p <sub>2-3</sub> =0,596
Средний возраст, лет Average age, years	74 (68; 74)	72,5 (66,5; 75)	68 (66; 70)	p <sub>1-2</sub> =0,603 p <sub>1-3</sub> =0,547 p <sub>2-3</sub> =0,568
Женщины, n=11 Women, n=11	3 (30)	2 (20)	4 (40)	p <sub>1-2</sub> =0,717 p <sub>1-3</sub> =0,642 p <sub>2-3</sub> =0,689
Средний возраст, лет Average age, years	75 (72; 75)	71 (67; 75)	64 (61; 68)	p <sub>1-2</sub> =0,549 p <sub>1-3</sub> =0,732 p <sub>2-3</sub> =0,662
Средний возраст (все пациенты), лет Average age (all patients), years	74 (71; 75)	72,5 (67; 75)	66,0 (65; 70)	p=0,021* p <sub>1-2</sub> =0,624 p <sub>1-3</sub> =0,009* p <sub>2-3</sub> =0,032*

**Примечание:** \* — достоверность различия признака между группами (основной и контрольной) <0,05.

**Note:** \* — significance of the difference between the groups (main and control) <0.05.

(пациенты основной группы использовали их в 70% случаев), местные ингибиторы карбоангидразы (пациенты 1 подгруппы применяли их в 90% случаев, пациенты 2 подгруппы — в 70% случаев), аналоги простагландинов (пациенты основной группы использовали их в 50% случаев).

В дополнительный объем диагностического обследования была включена ОКТ-А перипапиллярной зоны ДЗН. Перед проведением манипуляции всем пациентам проводили измерение уровня артериального давления (АД) (уровень систолического АД не превышал 140 мм рт.ст., диастолического — 90 мм рт.ст.). При анализе результатов во внимание принимали, в первую очередь, плотность капиллярной сети, а полученные данные сопоставляли со структурными изменениями. Толщину слоя нервных волокон сетчатки (СНВС) определяли по секторам (нижний — I, верхний — S, носовой — N, височный — T). В ходе выполнения ОКТА были изучены три сосудистых сплетения: поверхностный, глубокий и аваскулярный. Для исследования снимков глаз в целях определения распространенности сосудистого русла по причине отсутствия необходимого встроенного программного обеспечения в данном типе прибора был разработан скрипт на языке программирования Python. Каждый снимок глаза представляет собой массив элементов, в которых содержится информация о собственной яркости. В программе был реализован алгоритм, согласно которому определяли соотношение светлых и темных элементов (пикселей). Так как на итоговом изображении сосуды были отображены как светлые участки, а бессосудистая зона — темными, то при

подсчете соотношения светлых и темных зон был получена возможность получить относительную распространенность сосудистого сплетения на всей площади снимка. После математической обработки снимков данные выводились в терминал и сохранялись в сводную таблицу. В табл. 2 приведен сравнительный анализ основных клинических характеристик пациентов.

Установленные показатели ОКТА в поверхностном слое при ПОУГ были достоверно ниже по сравнению с данными здоровых обследуемых, также они различались между стадиями глаукомы. В организации кровоснабжения СНВС основную роль играют капилляры радиального поверхностного перипапиллярного плексуса. Пациенты с далекозашедшей стадией ПОУГ наиболее отличались от пациентов с начальной стадией ПОУГ дефицитом капилляров именно в поверхностном слое (рисунки).

Помимо этого, были отмечены различия между плотностью капиллярной сети в поверхностном и глубоком сосудистых сплетениях между группами, причем в поверхностном они были статистически значимыми (соответственно, для 1 подгруппы —  $27444,5 \pm 1372,2$ ; для 2 подгруппы —  $14126,5 \pm 706,3$ ; для группы контроля —  $45198,5 \pm 2259,9$ ;  $p=0,002$  и  $p=0,001$ ).

Для формирования предположения о первичных изменениях плотности сосудистого русла в поверхностном слое значения отношений белых пикселей к черным были усреднены. Это позволило дифференцировать наблюдаемую плотность сосудов на глазном дне в зависимости от группы наблюдения и по очевидной причине отсутствия встроенного

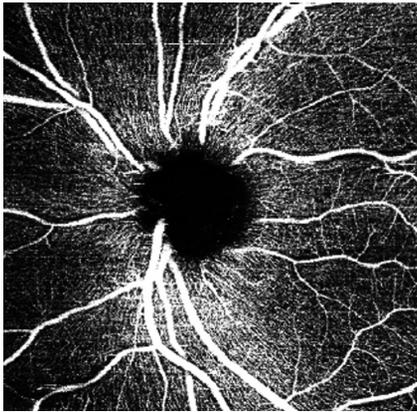
Таблица 2. Сравнительная характеристика основных показателей у пациентов исследуемых групп, n=30.

Table 2. Comparative characteristics of the main indicators in study patients, n=30.

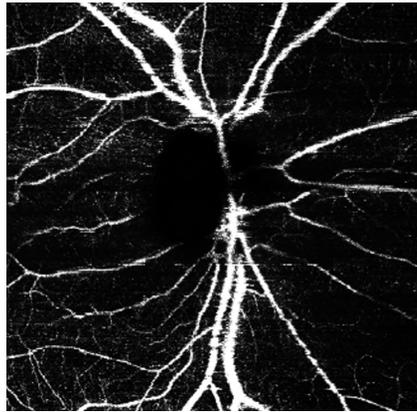
Показатели Indicators	Основная группа / Main group		Контрольная группа, n=10 Control group, n=10	Достоверность, p Statistical significance, p
	Подгруппа 1, n=10 Subgroup 1, n=10	Подгруппа 2, n=10 Subgroup 2, n=10		
MD, дБ MD, dB	-3,8 (-4,7; -3,3)	-21,3 (-26,9; -17,4)	-1,7 (-2,6; -1,5)	p=0,001* p <sub>1-2</sub> =0,011** p <sub>1-3</sub> =0,011** p <sub>2-3</sub> =0,001**
PSD, дБ PSD, dB	1,9 (1,5; 2,7)	9,1 (7,9; 11)	1,7 (1,4; 1,9)	p=0,001* p <sub>1-2</sub> =0,001** p <sub>1-3</sub> =0,334 p <sub>2-3</sub> =0,001**
ИОРсс, мм рт.ст. ИОРсс, mm Hg	18,5 (16; 19,7)	23,2 (18,2; 24,8)	15,6 (12; 17,3)	p=0,003* p <sub>1-2</sub> =0,080 p <sub>1-3</sub> =0,094 p <sub>2-3</sub> =0,001**
CH, мм рт.ст. CH, mm Hg	8,8 (8,1; 9,8)	8,2 (6,9; 8,9)	10,2 (9,5; 10,6)	p=0,004* p <sub>1-2</sub> =0,134 p <sub>1-3</sub> =0,071 p <sub>2-3</sub> =0,001**
CRF, мм рт.ст. CRF, mm Hg	9,1 (7,9; 11,2)	9,1 (8,6; 12,4)	9,5 (8,5; 10,7)	p=0,934
ПЗО, мм AL, mm	23,7 (23,1; 24,3)	24,1 (23,7; 24,2)	23,4 (23,2; 24,5)	p=0,671
Пахиметрия, мкм Pachymetry, μm	532,5 (525; 553)	527,0 (525; 539)	536,5 (525; 553)	p=0,782
CHBC I, мкм RNFL I, μm	118 (103; 140)	56 (39; 61)	138 (121; 149)	p=0,001* p <sub>1-2</sub> =0,001** p <sub>1-3</sub> =0,286 p <sub>2-3</sub> =0,001*
CHBC S, мкм RNFL S, μm	109 (89; 123)	55 (53; 66)	139 (127; 147)	p=0,001* p <sub>1-2</sub> =0,011** p <sub>1-3</sub> =0,032** p <sub>2-3</sub> =0,001**
CHBC N, мкм RNFL N, μm	76 (61; 96)	35,5 (33; 43)	89 (72; 101)	p=0,001* p <sub>1-2</sub> =0,003** p <sub>1-3</sub> =0,297 p <sub>2-3</sub> =0,001**
CHBC T, мкм RNFL T, μm	57 (48; 77)	43 (33; 50)	74 (61; 81)	p=0,003* p <sub>1-2</sub> =0,019** p <sub>1-3</sub> =0,316 p <sub>2-3</sub> =0,001**
Аваскулярный слой, пикселей (белых) Avascular layer, pixels (white)	8174,5 (5481; 12011)	12300 (4051; 13229)	5176 (3371; 7249)	p=0,082
Глубокий слой, пикселей (белых) Deep layer, pixels (white)	8965 (6278; 12247)	7272,5 (4382; 10296)	4689 (3556; 7798)	p=0,085
Поверхностный слой, пикселей (белых) Superficial layer, pixels (white)	27444,5 (26706; 33142)	14126,5 (10584; 15839)	45198,5 (29640; 47313)	p=0,001* p <sub>1-2</sub> =0,002** p <sub>1-3</sub> =0,128 p <sub>2-3</sub> =0,001**

**Примечание:** MD — значение среднего отклонения светочувствительности от возрастной нормы; PSD — стандартное (среднеквадратичное) отклонение паттерна; CH — корнеальный гистерезис; CRF — фактор резистентности роговицы; ПЗО — передне-задняя ось; \*p<0,05 — достоверность различия признака между основной и контрольной группами; \*\*p<0,05 — достоверность различия признака между 3 подгруппами.

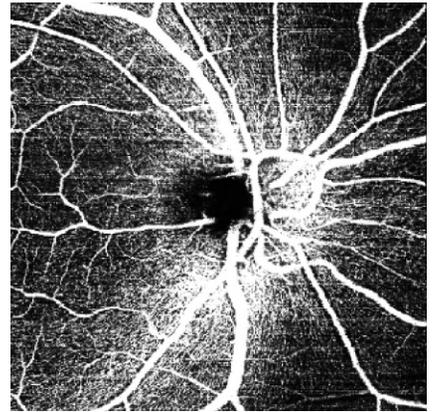
**Note:** MD — mean deviation of light sensitivity from the age norm; PSD — standard (root mean square) deviation of the pattern; CH — corneal hysteresis; CRF — corneal resistance factor; AL — axial length; \*p<0.05 — significance of the difference between the main and control groups; \*\*p<0.05 — significance of the difference between the 3 subgroups.



Подгруппа 1 / Subgroup 1



Подгруппа 2 / Subgroup 2



Группа контроля / Control group

**Рисунок.** Пример изображений распространенности капилляров в поверхностном слое перипапиллярной зоны ДЗН.  
**Figure.** Example images showing the prevalence of capillaries in the superficial layer of the peripapillary region of the ONH.

программного обеспечения для автоматической оценки сосудистого русла в перипапиллярной зоне. Усреднение результатов позволило установить ключевые зависимости, определяющие целесообразность применения данной методики. Результаты усреднения данных представлены в табл. 3.

В поверхностном слое было отмечено уменьшение количества белых пикселей, что является явным признаком снижения плотности распространенности сосудов. Аvascularный и глубокий слои микроциркуляторного русла сетчатки у пациентов контрольной группы значительно затемняются поверхностным слоем, что создает трудности для визуализации глубже лежащих изменений за счет поглощения волн. Вместе с этим, по мере прогрессирования заболевания визуализация глубже лежащих слоев улучшается. Так, у пациентов с начальной стадией ПОУГ истончение сосудистых слоев было незначительным, а у лиц с далекозашедшей стадией заболевания глубокий слой был уже значительно изменен. Это свидетельствует о том, что развитая стадия заболевания сопровождается разрушением сосудистого русла, однако, ответить на вопрос о наличии изменений в глубоком слое при начальной стадии на момент выполнения исследования не представляется возможным, так как их полученные результаты были сопоставимы с группой здоровых лиц. Малая и растущая дисперсия доли белого в глубоком слое подтверждает наше предположение о затемнении поверхностного слоя, то есть о снижении количества сосудов, и, как следствие, нарушения трофических функций сетчатки данной области. Отрицательные значения корреляции у пациентов 3 группы между поверхностным слоем с другими подтверждают предположение о снижении кровотока глубоких слоев; в аваскулярном слое сильного снижения не наблюдается (табл. 4).

Было установлено, что у пациентов с начальной стадией заболевания по сравнению с контрольной группой доля белых пикселей в поверхностном слое падает, а в других слоях увеличивается (аваску-

лярный слой — с 4,17% до 8%, глубокий — с 4,61% до 10,07%, поверхностный — с 33,69% до 27,50%). В частности, корреляционные отношения между аваскулярным и глубоким слоем (из-за улучшения условий съемки глубокого слоя) становятся слабыми (с 0,66 до 0,19); между поверхностным и глубоким — вначале уменьшается, а затем увеличивается (с 0,33 в контрольной группе до 0,06 у пациентов с начальной стадией и 0,42 у пациентов с далекозашедшей стадией), доля видимого белого в глубоком слое приближается к доле белого у снижающегося поверхностного слоя (с 33,69% и 4,61% до 11,13 и 6,28%); аваскулярный слой лучше визуализируется, но из-за незначительного возрастания доли белых пикселей, корреляция меняется незначительно. В свою очередь, результаты корреляционного анализа у пациентов с далекозашедшей глаукомой свидетельствуют о том, что у таких пациентов поверхностный слой практически полностью атрофирован и почти «прозрачен» для прибора. Наблюдаются мелкие сосуды в аваскулярном и глубоком слоях.

Ограничения исследования: в исследование было включено небольшое число участников (30 человек), в числе которых лица, представляющие группу контроля (здоровые), были моложе пациентов основной группы, а в качестве метода получения снимков глазного дна использовался прибор только одного производителя.

## Заключение

Прогрессирование глаукомной оптической нейропатии, проявляющееся структурными изменениями ДЗН, сопровождается снижением интенсивности кровотока как самого ДЗН, так и перипапиллярной зоны в виде секторального либо диффузного уменьшения плотности капилляров [16–18]. Объективная оценка состояния плотности сосудов может иметь большое диагностическое значение в клинической практике для раннего выявления ПОУГ,

Таблица 3. Усредненные показатели распределения и дисперсия сосудистого русла у пациентов всех групп, абс./%, n=30.

Table 3. Average indicators of the distribution and dispersion of the vascular bed in patients of all groups, abs./%, n=30.

Показатели Indicators	Поверхностный слой Superficial layer	Аваскулярный слой Avascular layer	Глубокий слой Deep layer
Усредненные показатели распределения сосудистого русла / Average indicators of the distribution of the vascular bed			
Группа 1 / Group 1	27,5%	8%	10,1%
Группа 2 / Group 2	11,1%	9,5%	6,3%
Группа 3 / Group 3	33,7%	4,2%	4,6%
Дисперсия сосудистого русла / Dispersion of the vascular bed			
Группа 1 / Group 1	0,0038	0,001868854	0,003921
Группа 2 / Group 2	0,001323	0,00506513	0,001169
Группа 3 / Group 3	0,006894	0,000391776	0,000598

Таблица 4. Анализ корреляции параметров на различной глубине сканирования слоев у пациентов исследуемых групп.

Table 4. Correlation analysis of the parameters at different scanning depths of layers in patients of the studied groups.

Параметры Parameters	Поверхностный слой Superficial layer	Аваскулярный слой Avascular layer	Глубокий слой Deep layer
Поверхностный слой Superficial layer	1	-0,16354 <sup>1</sup> -0,18138 <sup>2</sup> 0,807888 <sup>3</sup>	-0,3306 <sup>1</sup> 0,055463 <sup>2</sup> 0,419155 <sup>3</sup>
Аваскулярный слой Avascular layer	-0,16354 <sup>1</sup> -0,18138 <sup>2</sup> 0,807888 <sup>3</sup>	1	-0,03253 <sup>1</sup> -0,6849 <sup>2</sup> -0,0827 <sup>3</sup>
Глубокий слой Deep layer	-0,3306 <sup>1</sup> 0,055463 <sup>2</sup> 0,419155 <sup>3</sup>	0,663996 <sup>1</sup> 0,193145 <sup>2</sup> 0,74922 <sup>3</sup>	1
Средняя величина Average value	-0,03253 <sup>1</sup> -0,6849 <sup>2</sup> -0,0827 <sup>3</sup>	-0,59473 <sup>1</sup> 0,0107824 <sup>2</sup> -0,39939 <sup>3</sup>	0,070833 <sup>1</sup> 0,2254 <sup>2</sup> -0,33328 <sup>3</sup>

**Примечание:** 1 – данные пациентов контрольной группы; 2 – данные пациентов 1 подгруппы; 3 – данные пациентов 2 подгруппы.

**Note:** 1 – data of patients in the control group; 2 – data of patients in subgroup 1; 3 – data of patients in subgroup 2.

поскольку изменения выявляются уже при начальной стадии и нарастают по мере прогрессирования заболевания [19, 20].

Разработанный метод объективной оценки состояния микроциркуляции перипапиллярной зоны ДЗН основан на обработке полученных ОКТ-А снимков с помощью оригинального скрипта, написанного на языке программирования Python. В ходе проведенного исследования использовался оптический когерентный томограф Spectralis ОСТ, однако, предложенный алгоритм обработки полученных снимков ОКТ-А позволяет анализировать результаты в исходном графическом формате (например, .JPG, .JPEG, .PNG), полученные с помощью любых аналогичных приборов.

Применение на практике нового метода объективной оценки микроциркуляции перипапиллярной зоны может быть включено в состав комплексной диагностики ПОУГ, как для подтверждения стадии глаукомного процесса, так и для оценки эффективности проводимых лечебных (консервативных и хирургических) мероприятий.

#### Участие авторов:

Концепция и дизайн исследования: Фомин Н.Е., Куроедов А.В.

Сбор и обработка материала: Фомин Н.Е., Куроедов А.В.

Статистическая обработка: Архаров М.А., Прохоренко В.В.

Написание статьи: Фомин Н.Е., Архаров М.А.

Редактирование: Куроедов А.В.

## Литература

1. Grzybowski A., Och M., Kanclerz P. et al. Primary Open Angle Glaucoma and Vascular Risk Factors: A Review of Population Based Studies from 1990 to 2019. *J Clin Med* 2020; 11;9(3):761. <https://doi.org/10.3390/jcm9030761>.
2. Tham Y.-C., Cheng C.-Y. Associations between chronic systemic diseases and primary open angle glaucoma: An epidemiological perspective. *Clin Exp Ophthalmol* 2016; 45:24-32. <https://doi.org/10.1111/ceo.12763>.
3. Mahabadi N., Foris L.A., Tripathy K. Open Angle Glaucoma. Treasure Island (FL): Stat Pearls Publishing 2022.
4. Zhang N., Wang J., Li Y. Prevalence of primary open angle glaucoma in the last 20 years: a meta-analysis and systematic review. *Sci Rep* 2021; 11(13762). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92971-w>.
5. Lin M., Hou B., Liu L. Automated diagnosing primary open-angle glaucoma from fundus image by simulating human's grading with deep learning. *Sci Rep* 2022; 12(14080). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17753-4>.
6. Baba M., Idriss A., Yahya T. et al. Primary Open Angle Glaucoma: Epidemiological, Clinical and Therapeutic Aspects of 63 Cases at National Hospital Center in Mauritania. *Open J Ophthalmol* 2020; 10: 229-240. <https://doi.org/10.4236/ojoph.2020.103025>.
7. Курьшева Н.И., Маслова Е.В., Трубилина А.В., Фомин А.В. ОКТ-ангиография и цветное доплеровское картирование в исследовании гемоперфузии сетчатки и зрительного нерва при глаукоме. *Офтальмология* 2016; 13(2):102-110. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2016-2-102-110>.
8. Herbot C.P., Takeuchi M., Papasavvas I. et al. Optical Coherence Tomography Angiography (OCT-A) in Uveitis: A Literature Review and a Reassessment of Its Real Role. *Diagnostics*. 2023; 13:601. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13040601>.
9. Жукова С.И., Юрѳева Т.Н., Микова О.И. и соавт. ОКТ-ангиография в оценке хориоретинального кровотока при колебании внутриглазного давления у больных первичной открытоугольной глаукомой. *РМЖ Клиническая офтальмология* 2016; 16(2):98-103 <https://doi.org/10.21689/2311-7729-2016-16-2-98-103>.
10. Lykkebirk L., Lindberg A.S.W., Karlesand I. et al. Peripapillary Vessel Density in Relation to Optic Disc Drusen: A Multimodal Optical Coherence Tomography Study. *Journal of Neuroophthalmology* 2023; 43(2):185-190. <https://doi.org/10.1097/wno.0000000000001667>.
11. Bilici S., Duman R. The current clinical role of optical coherence tomography angiography in neuro-ophthalmological diseases. *Taiwan Journal of Ophthalmology* 2022; 12(3):264-272. [https://doi.org/10.4103/tjo.tjo\\_55\\_21](https://doi.org/10.4103/tjo.tjo_55_21).
12. Курьшева Н.И. ОКТ-ангиография и ее роль в исследовании региональной микроциркуляции при глаукоме (часть первая). *Российский офтальмологический журнал*. 2018; 11(2): 82-86. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2018-11-2-82-86>.
13. Yan Y., Liao Y.J. Updates on ophthalmic imaging features of optic disc drusen, papilledema, and optic disc edema. *Current Opinion in Neurology* 2021; 34(1):108-115. <https://doi.org/10.1097/WCO.0000000000000881>.
14. Maidenko K. Primary open angle glaucoma: mechanisms of pathogenesis and genetic predisposition. Review. *Medical Science of Ukraine (MSU)* 2022; 18(2):89-102. <https://doi.org/10.32345/2664-4738.2.2022.11>.
15. Liu L., Jia Y., Takusagawa H.L. et al. Optical Coherence Tomography Angiography of the Peripapillary Retina in Glaucoma. *JAMA Ophthalmol* 2015; 133(9):1045-1052. <https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2015.2225>.
16. Wang Y., Fawzi A.A., Varma R. et al. Pilot study of optical coherence tomography measurement of retinal blood flow in retinal and optic nerve diseases. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2011; 52(2):840-845. <https://doi.org/10.1167/iovs.10-5985>.
17. Savastano M., Lumbroso B., Rispoli M. In vivo characterization of retinal vascularization morphology using optical coherence tomography angiography. *Retina* 2015; 35(11):2196-2203. <https://doi.org/10.1097/IAE.0000000000000635>.
18. Tabl A.A., Tabl M.A. Correlation between OCT-angiography and photopic negative response in patients with primary open angle glaucoma. *Int Ophthalmol* 2023; 43:1889-1901. <https://doi.org/10.1007/s10792-022-02588-9>.
19. Курьшева Н.И., Маслова Е.В. Оптическая когерентная томография с функцией ангиографии в диагностике глаукомы. *Вестник офтальмологии* 2016; 132(5):98-102. <https://doi.org/10.17116/oftalma2016132598-102>.

## References

1. Grzybowski A., Och M., Kanclerz P. et al. Primary Open Angle Glaucoma and Vascular Risk Factors: A Review of Population Based Studies from 1990 to 2019. *J Clin Med* 2020; 11;9(3):761. <https://doi.org/10.3390/jcm9030761>.
2. Tham Y.-C., Cheng C.-Y. Associations between chronic systemic diseases and primary open angle glaucoma: An epidemiological perspective. *Clin Exp Ophthalmol* 2016; 45:24-32. <https://doi.org/10.1111/ceo.12763>.
3. Mahabadi N., Foris L.A., Tripathy K. Open Angle Glaucoma. Treasure Island (FL): Stat Pearls Publishing 2022.
4. Zhang N., Wang J., Li Y. Prevalence of primary open angle glaucoma in the last 20 years: a meta-analysis and systematic review. *Sci Rep* 2021; 11(13762). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92971-w>.
5. Lin M., Hou B., Liu L. Automated diagnosing primary open-angle glaucoma from fundus image by simulating human's grading with deep learning. *Sci Rep* 2022; 12(14080). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17753-4>.
6. Baba M., Idriss A., Yahya T. et al. Primary Open Angle Glaucoma: Epidemiological, Clinical and Therapeutic Aspects of 63 Cases at National Hospital Center in Mauritania. *Open J Ophthalmol* 2020; 10: 229-240. <https://doi.org/10.4236/ojoph.2020.103025>.
7. Kurysheva N.I., Maslova E.V., Trubulina A.V., Fomin A.V. OCT angiography and Color Doppler Imaging in the study of hemoperfusion in the retina and optic nerve in POAG. *Russian Journal of Ophthalmology* 2016; 13(2):102-110. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2016-2-102-110>.
8. Herbot C.P., Takeuchi M., Papasavvas I. et al. Optical Coherence Tomography Angiography (OCT-A) in Uveitis: A Literature Review and a Reassessment of Its Real Role. *Diagnostics*. 2023; 13:601. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13040601>.
9. Zhukova S.I., Iureva T.N., Mikova O.I. et al. OCT-Angiography in assessment of chorioretinal blood flow in patients with primary open angle glaucoma and IOP fluctuations. *RMJ Clinical Ophthalmology* 2016; 16(2):98-103. <https://doi.org/10.21689/2311-7729-2016-16-2-98-103>.
10. Lykkebirk L., Lindberg A.S.W., Karlesand I. et al. Peripapillary Vessel Density in Relation to Optic Disc Drusen: A Multimodal Optical Coherence Tomography Study. *Journal of Neuroophthalmology* 2023; 43(2):185-190. <https://doi.org/10.1097/wno.0000000000001667>.
11. Bilici S., Duman R. The current clinical role of optical coherence tomography angiography in neuro-ophthalmological diseases. *Taiwan Journal of Ophthalmology* 2022; 12(3):264-272. [https://doi.org/10.4103/tjo.tjo\\_55\\_21](https://doi.org/10.4103/tjo.tjo_55_21).
12. Kurysheva N.I. OCT angiography and its role in the study of retinal microcirculation in glaucoma (part one). *Russian Journal of Ophthalmology*. 2018; 11(2): 82-86. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2018-11-2-82-86>.
13. Yan Y., Liao Y.J. Updates on ophthalmic imaging features of optic disc drusen, papilledema, and optic disc edema. *Current Opinion in Neurology* 2021; 34(1):108-115. <https://doi.org/10.1097/WCO.0000000000000881>.
14. Maidenko K. Primary open angle glaucoma: mechanisms of pathogenesis and genetic predisposition. Review. *Medical Science of Ukraine (MSU)* 2022; 18(2):89-102. <https://doi.org/10.32345/2664-4738.2.2022.11>.
15. Liu L., Jia Y., Takusagawa H.L. et al. Optical Coherence Tomography Angiography of the Peripapillary Retina in Glaucoma. *JAMA Ophthalmol* 2015; 133(9):1045-1052. <https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2015.2225>.
16. Wang Y., Fawzi A.A., Varma R. et al. Pilot study of optical coherence tomography measurement of retinal blood flow in retinal and optic nerve diseases. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2011; 52(2):840-845. <https://doi.org/10.1167/iovs.10-5985>.
17. Savastano M., Lumbroso B., Rispoli M. In vivo characterization of retinal vascularization morphology using optical coherence tomography angiography. *Retina* 2015; 35(11):2196-2203. <https://doi.org/10.1097/IAE.0000000000000635>.
18. Tabl A.A., Tabl M.A. Correlation between OCT-angiography and photopic negative response in patients with primary open angle glaucoma. *Int Ophthalmol* 2023; 43:1889-1901. <https://doi.org/10.1007/s10792-022-02588-9>.
19. Kurysheva N.I., Maslova E.V. Optical coherence tomography angiography in glaucoma diagnosis. *Vestnik oftalmologii* 2016; 132(5):98-102. <https://doi.org/10.17116/oftalma2016132598-102>.