

УДК 617.7-007.681; 53.082.4

DOI: 10.24884/1682-6655-2024-23-4-22-29

Т. Н. МАЛИШЕВСКАЯ¹, Т. Н. КИСЕЛЕВА¹, Е. В. РЕНЗЯК²

Ультразвуковые доплеровские методы в оценке глазного кровотока у пациентов с глаукомой

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр глазных болезней им. Гельмгольца» Минздрава России, Москва, Россия
105062, Россия, Москва, ул. Садовая-Черногрязская, д. 14/19

² Бюджетное учреждение Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Окружная клиническая больница», г. Ханты-Мансийск, Россия
628011, Россия, г. Ханты-Мансийск, ул. Калинина, д. 40
E-mail: malishevskoff@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 12.09.24 г.; принята к печати 18.10.24 г.

Резюме

Первичная открытоугольная глаукома (ПОУГ) относится к нейродегенеративной патологии, приводящей к глаукомному поражению зрительного нерва с характерными дефектами полей зрения. Сосудистая теория патогенеза глаукомы рассматривает глаукомную оптическую нейропатию (ГОН) как результат изменений глазного кровотока. Ультразвуковое исследование (УЗИ) с оценкой глазного кровотока с помощью multifunctional ultrasonic diagnostic devices позволяет изучать параметры гемодинамики в основных ретробульбарных сосудах: глазной артерии (ГА), центральной артерии сетчатки (ЦАС) и задних коротких цилиарных артериях (ЗКЦА). В данном обзоре представлены результаты исследований глазного кровотока с использованием ультразвуковых доплеровских методов у пациентов с ПОУГ и глаукомой нормального давления (ГНД). Многие исследователи подчеркивают важную роль этих методов в диагностике и мониторинге прогрессирования глаукомного поражения зрительного нерва. В клинической практике для повышения информативности метода и получения достоверных результатов необходима стандартизация техники проведения доплерографии сосудов и разработка оптимального протокола исследования для наилучшей интерпретации полученных данных.

Ключевые слова: первичная открытоугольная глаукома, глаукома нормального давления, ультразвуковое исследование, ультразвуковая доплерография, глазной кровотока, зрительный нерв, глаукомная оптическая нейропатия

Для цитирования: Малишевская Т. Н., Киселева Т. Н., Рензяк Е. В. Ультразвуковые доплеровские методы в оценке глазного кровотока у пациентов с глаукомой. Регионарное кровообращение и микроциркуляция. 2024;23(4):22–29. Doi: 10.24884/1682-6655-2024-23-4-22-29.

UDC 617.7-007.681; 53.082.4

DOI: 10.24884/1682-6655-2024-23-4-22-29

TATIANA N. MALISHEVSKAYA¹, TATIANA N. KISELEVA¹,
EKATERINA V. RENZYAK²

Evaluation of ocular blood flow by Doppler Ultrasound in patients with glaucoma

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

² District Clinical Hospital, Khanty-Mansiysk, Russia
40, Kalinina str., Khanty-Mansiysk, Russia, 628011
E-mail: malishevskoff@yandex.ru

Received 12.09.24; accepted 18.10.24

Summary

Primary open-angle glaucoma (POAG) is a neurodegenerative disease causing glaucomatous damage of the optic nerve with characteristic visual field defects. Vascular theory of the glaucoma pathogenesis considers glaucomatous optic neuropathy (GON) as a result of changes in impaired ocular blood flow (OBF). Ultrasound examination with the assessment of OBF using multifunctional ultrasonic diagnostic devices is used for evaluation of hemodynamic parameters in the retrobulbar vessels: ophthalmic artery (OA), central retinal artery (CRA) and short posterior ciliary arteries (sPCA). This review presents the results of ocular blood flow studies using Doppler Ultrasound methods in patients with POAG and normal tension glaucoma (NTG). Many researchers have emphasized the important role of these methods in diagnosing and monitoring the optic nerve damage progression in glaucoma. In clinical practice, the standardization of the vascular Doppler Ultrasound technique and development of a suitable study protocol should improve the informativeness of the method and obtain reliable and reproducible results.

Keywords: primary open-angle glaucoma, normal tension glaucoma, ultrasound examination, Doppler Ultrasound, ocular blood flow, optic nerve, glaucomatous optic neuropathy

For citation: Malishevskaya T. N., Kiseleva T. N., Renzyak E. V. Evaluation of ocular blood flow by Doppler Ultrasound in patients with glaucoma. Regional hemodynamics and microcirculation. 2024;23(4):22–29. Doi: 10.24884/1682-6655-2024-23-4-22-29.

Введение

Первичная открытоугольная глаукома (ПОУГ) относится к нейродегенеративной патологии, сопровождающейся гибелью ганглиозных клеток сетчатки, поражением зрительного нерва с характерными дефектами полей зрения [1].

По данным Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ), глаукома является второй по частоте причиной слепоты среди других заболеваний органа зрения. В настоящее время глаукомой страдают 80 миллионов человек в мире, из них у 11 миллионов отмечается слепота. Показатель общей заболеваемости глаукомой на 100 тыс. населения за 11 лет вырос на 24 % [2].

Патогенез глаукомы сложный, многофакторный и недостаточно изучен. Известно, что в механизме развития этой патологии значимую роль играют изменения гемодинамики глаза. Проведенные эпидемиологические исследования ясно продемонстрировали, что снижение глазного перфузионного давления (ГПД), в особенности диастолического, связано с развитием ПОУГ [3]. Несмотря на то, что повышенное внутриглазное давление (ВГД) считается важным фактором структурного и функционального поражения зрительного нерва, примерно у 65 % пациентов с ПОУГ уровень ВГД на ранних стадиях заболевания сохраняется в пределах нормальных значений. У пациентов с дефицитом кровообращения в сетчатке и зрительном нерве имеет место наибольшая вероятность развития и прогрессирования глаукомной оптической нейрооптикопатии (ГОН) [4]. В эксперименте было доказано наличие ишемического поражения зрительного нерва при моделировании внутриглазной гипертензии и необходимости медикаментозной коррекции уровня ВГД при ГОН [5]. Согласно «сосудистой теории» патогенеза глаукомы, потеря ганглиозных клеток сетчатки является результатом недостаточного кровоснабжения сетчатки и зрительного нерва.

Ряд авторов указывают на существенное влияние системной и местной медикаментозной терапии на гемодинамику глаза у пациентов с ПОУГ [6]. Многочисленные исследования показали, что у больных ПОУГ ишемия сетчатки при нормальном уровне ВГД может возникать на фоне системных сосудистых поражений [7–9].

В клинической практике существует большое число инструментальных методов исследования, которые широко используют для изучения состояния гемодинамики в сосудах глаза у пациентов с ПОУГ. Одним из наиболее доступных, неинвазивных и высокоинформативных методов является ультразвуковое исследование с оценкой кровотока в режимах цветового доплеровского картирования (ЦДК) и импульсно-волновой доплерографии. Этот метод дает возможность определять качественные и количественные характеристики кровотока в ретробульбарных сосудах [10].

Анатомия кровоснабжения зрительного нерва

До сих пор остаются до конца не изученными особенности микроциркуляции передней части зрительного нерва и перипапиллярной области. Малый

калибр сосудов, сложная трехмерная ангиоархитектоника и относительная недоступность тканей для исследования – все это затрудняет изучение кровоснабжения зрительного нерва.

Выделяют 4 анатомические зоны переднего отдела зрительного нерва [11]. Кровоснабжение зрительного нерва осуществляется дифференцированно в различных его участках.

Слой поверхностных нервных волокон питается за счет артериол – ветвей ретинальных артерий из системы центральной артерии сетчатки (ЦАС). Эти мелкие сосуды, получившие название эпипапиллярных сосудов, появляются перипапиллярно в слое нервных волокон и направляются к центру диска зрительного нерва (ДЗН). Височная часть нервных волокон может получать дополнительно кровь из цилиоретинальной артерии.

Преламинарная часть в основном получает кровь из системы задних коротких цилиарных артерий (ЗКЦА) и ветвей, отходящих от круга Цинна–Галлера, который представляет собой интрасклеральные артериолярные анастомозы вокруг ДЗН. Круг Цинна–Галлера образован слиянием ветвей ЗКЦА, от него отходят многочисленные перфорирующие ветви, расходящиеся в преламинарной области, решетчатой пластинке и ретроламинарной части, и затем идущие к перипапиллярной хориоиде и ретроламинарной мозговой оболочке.

Кровоснабжение *решетчатой пластинки* осуществляется ветвями ЗКЦА и артериолами, отходящими от круга Цинна–Галлера. Эти прекапиллярные веточки перфорируют наружные слои решетчатой пластинки до разветвления на интрасептальные капилляры.

Ретроламинарная часть получает кровоснабжение из двух источников: ЦАС и артериол из сплетения мягкой мозговой оболочки, которое является сетью анастомозов и происходит из круга Цинна–Галлера или напрямую из ЗКЦА. Сосудистая сеть мягкой мозговой оболочки представляет собой периферическую концентрическую систему кровоснабжения зрительного нерва, в то время как ЦАС образует аксиально-эксцентрическую сосудистую систему нерва, доставляя кровь к его центральной части [12].

Таким образом, основное кровоснабжение зрительного нерва получает из двух источников – ЗКЦА и ЦАС.

Сосудистая теория патогенеза глаукомы

Эта теория предполагает, что развитие и прогрессирование ГОН является результатом нарушений кровообращения в сосудах глаза. Впервые «сосудистая теория» была выдвинута в 1858 г. E. Von Jaeger, который предположил, что поражение зрительного нерва при повышении ВГД возникает в результате ишемии, а не вследствие сдавления нервных волокон [13].

Механизм патологических изменений гемодинамики глаза при ПОУГ до конца не ясен. Кроме того, до сих пор дискутируется вопрос: нарушения микроциркуляции зрительного нерва и сетчатки являются причиной или следствием глаукомного поражения? По мнению J. Flammer [14], нарушение глазного кровотока при ГОН связано с окислительным стрессом

и дефицитом поступления кислорода к тканям зрительного нерва.

На сегодняшний день в качестве значимых факторов риска развития и прогрессирования ГОН рассматривают недостаточность кровообращения в сосудах глаза, нестабильный уровень глазного перфузионного давления, окислительный стресс, вазоспазм и эндотелиальную дисфункцию [15]. Известно, что ряд системных сосудистых заболеваний, таких как артериальная гипертензия или гипотензия, поражения периферических сосудов, синдром Рейно, первичная сосудистая дисфункция и синдром Фламера влияют на развитие ПОУГ, в особенности глаукомы нормального давления (ГНД) [16]. Ряд авторов в патогенезе ГОН рассматривают атеросклеротическое поражение сонных артерий, однако имеющиеся в литературе сведения достаточно противоречивы. Результаты ретроспективных и когортных исследований показали, что у больных с ПОУГ окклюзионно-стенозированные поражения сонных артерий наблюдаются с той же частотой, что и у лиц, не страдающих глаукомой, и не относятся к причинным факторам заболевания [17–19]. Другие авторы отмечают влияние сосудистой недостаточности вследствие атеросклеротического поражения магистральных артерий головы и шеи [20–22]. J. Gutman et al. [23] обнаружили стенозирующий атеросклероз интракраниального отдела внутренней сонной артерии (ВСА) у 90,3 % пациентов с ГНД, у 45 % больных была выявлена патологическая экскавация ДЗН, размер которой достоверно коррелировал со степенью выраженности стеноза ВСА.

N. Fan et al. и T. Tian et al. указывают на взаимосвязь между ухудшением ретинального кровообращения и нарушением мозговой микроциркуляции, в особенности у пациентов с ГНД [24, 25].

В литературе имеются сведения, которые не исключают вторичных нарушений кровообращения в области зрительного нерва и перипапиллярной сетчатки при ПОУГ. Известно, что при развитии атрофии тканей глазного яблока возникает ухудшение их кровоснабжения. При повышении ВГД и прогрессирующей деформации решетчатой пластинки зрительного нерва происходит компрессионное повреждение сосудов, приводящее к нарушению кровообращения данной анатомической области [26]. В то же время имеются убедительные данные, свидетельствующие о первичном характере нарушений гемодинамики глаза при ПОУГ. Например, нарастание дефицита гемоциркуляции неизбежно приводит к прогрессированию глаукомного поражения зрительного нерва, с наибольшей степенью выраженности у пациентов с ГНД. Кроме того, у этих больных отмечается наиболее высокая частота геморрагий в области ДЗН.

Исходя из вышесказанного, применение неинвазивных, высокоинформативных, доступных методов в оценке состояния глазного кровотока при ПОУГ имеет огромное значение в клинической практике.

Ультразвуковое исследование с оценкой кровотока в офтальмологии

Первое исследование, посвященное применению цветового доплеровского картирования (ЦДК) в оф-

тальмологии было опубликовано в 1989 г. Авторы представили основные ультразвукографические характеристики орбитальных сосудов и возможность использования метода в диагностике сосудистой патологии [27].

Ультразвуковое исследование (УЗИ) с оценкой кровотока включает в себя В-режим для визуализации сосудов и окружающих их тканей с одновременным исследованием кровотока в просвете сосуда посредством ЦДК или энергетического картирования (ЭК) и спектрального доплеровского анализа. Цветовой режим позволяет визуализировать сосуд малого калибра благодаря цветовой картограмме потока крови в его просвете, оценить анатомические особенности расположения и наличие деформаций сосуда. Однако диагностировать патологические изменения внутри мелких сосудов на основании результатов ЦДК в большинстве случаев не удается. В связи с этим огромное значение имеют данные спектрального доплеровского режима, позволяющие фиксировать нарушения гемодинамики в зоне поражения по характеру изменений качественных и количественных параметров доплеровского спектра. УЗИ в режимах ЦДК и спектрального доплеровского анализа позволяет регистрировать доплеровский сигнал в орбитальных артериях: ГА, ЦАС, латеральных и медиальных ЗКЦА, а также в ЦВС, вортикозных венах и верхней глазной вене.

УЗИ сосудов орбиты проводят с помощью многофункциональных ультразвуковых диагностических приборов и линейных датчиков с частотой излучения от 7,5 до 20,0 МГц и, в соответствии с рекомендациями международных профессиональных организаций, снижают параметры акустической мощности согласно следующим нормативам: термический индекс (TIS) не более 1,0; механический индекс (MI) не более 0,23, интенсивность ультразвукового потока не более 50 мВ/см² [28].

Благодаря этому методу проводится дифференциация васкулярных и аваскулярных структур и тканей, а также определение количественных показателей гемодинамики в основных магистральных сосудах глаза [29]. С учетом анатомо-физиологических характеристик глазных сосудов наиболее информативными показателями в оценке глазного кровотока являются:

- максимальная систолическая (пиковая) скорость (*PSV*), наибольшая линейная скорость движения частиц крови в потоке в момент его максимального ускорения в систолу;

- конечная диастолическая скорость (*EDV*), зависящая от сопротивления кровотоку дистальнее точки измерения: чем больше это сопротивление, тем меньше диастолическая скорость;

- индекс резистентности, или индекс сопротивления Pourselot (*RI*), рассчитываемый по формуле: $RI = (PSV - EDV) / PSV$, показывает периферическое сопротивление сосуда.

Показатели скорости обычно выражают в см/с, *RI* не имеет единиц измерения и колеблется от 0 до 1,0 (от отсутствия сопротивления до очень высокого сосудистого сопротивления). С клинической точки зрения и учитывая физиологические характеристи-

ки сосудов глаза, наиболее важными параметрами глазного кровотока являются *PSV*, *ESV* и *RI*. Ветви глазной артерии относятся к сосудам резистивного мышечного типа (диаметр – 100 мкм и менее), которые вносят наибольший вклад в общее периферическое сопротивление кровотоку.

В последние годы в офтальмологической литературе дискутируется вопрос о преимуществах и недостатках метода УЗИ, погрешностях измерения показателей гемодинамики и субъективном характере полученных данных [30, 31].

К основным преимуществам ультразвуковых доплеровских методов следует отнести: неинвазивность, безопасность, возможность многократного применения и исследования глазного кровотока при непрозрачных оптических средах, в том числе при зрелой катаракте, метод не требует введения контрастных веществ и исключает лучевую нагрузку. Кроме того, он обладает высокой информативностью для определения ранних доклинических признаков заболевания с оценкой сосудистых поражений, а также изменений гемодинамики в режиме реального времени с выявлением не только органических, но и функциональных нарушений состояния сосудистой системы.

Главным недостатком этого метода, по мнению исследователей, является ограничение возможности оценки объемной скорости кровотока в сосудах глаза [32, 33]. Нередко о состоянии глазного кровотока пытаются судить по параметрам линейной скорости, которые неодинаковы в разных сосудистых бассейнах и не дают информации об объеме кровотока. Кроме того, эхографически невозможно оценить индивидуальные анатомические особенности ретробульбарных сосудов: изменение хода (извитость), наличие анастомозов или сужений.

Измерение показателей гемодинамики в ЗКЦА сопряжено с трудностями идентификации сосудов в ретробульбарном пространстве.

Другим недостатком метода является влияние на состояние глазного кровотока проксимальных стенозов магистральных артерий головы и шеи. У пациентов со стенозами ВСА более 70 % наблюдается значительное ухудшение кровотока в ретробульбарных артериях [34].

Необходимо с осторожностью сравнивать показатели глазного кровотока, полученные с помощью разных ультразвуковых сканеров и датчиков. Результаты исследований гемодинамики глаза, проведенные А. G. Boehm et al. [35] с использованием двух разных датчиков (7,5 и 12 МГц), показали, что более высокоскоростные измерения кровотока регистрировались при применении датчика с частотой излучения 7,5 МГц.

Результаты исследования гемодинамики зависят от опыта и квалификации врача, а также достаточного количества времени, требующегося для проведения повторных измерений показателей кровотока в ретробульбарных сосудах. Кроме того, на гемодинамику глаза могут оказывать влияние внешние факторы: курение, кофе, пища, интенсивная физическая нагрузка и время суток. В протокол

исследования рекомендовано вносить данные ВГД, систолического, диастолического и среднего артериального давления [36].

Ультразвуковое исследование с оценкой кровотока у пациентов с глаукомой

С появлением ультразвуковых доплеровских методов исследования кровотока были получены доказательства ухудшения кровообращения в зрительном нерве при глаукоме.

Проведенные нами ультразвуковые доплеровские исследования гемодинамики глаза продемонстрировали выраженное снижение показателей скорости кровотока (максимальной систолической и конечной диастолической) и увеличение индекса резистентности в ГА и ЦАС у пациентов с глаукомной оптической нейропатией при ГНД [37]. Другие опубликованные результаты исследования выявили наряду с дефицитом артериального кровотока в системе ЦАС и ЗКЦА существенное снижение скорости венозного кровотока у больных ПОУГ по сравнению со здоровыми лицами [38].

Многие авторы в своих исследованиях определили нарушения кровообращения в сосудах глаза у пациентов с ПОУГ и ГНД по сравнению со здоровыми лицами того же возраста (табл. 2). Одно из самых крупных исследований The Leuven Eye Study (2016), включавшее 546 пациентов с ПОУГ, позволило выявить снижение показателей скорости кровотока в ЦАС и ГА без достоверных изменений гемодинамики в ЗКЦА по сравнению с группой контроля [39]. Krzyżanowska-Berkowska et al. [40] определили у пациентов с глаукомой нарушение кровообращения в ГА и ЦАС наряду с деформацией решетчатой пластинки зрительного нерва. Допплеровские показатели глазного кровотока считаются важными критериями в мониторинге глаукомы, и снижение показателей максимальной систолической (*PSV*) и конечной диастолической скорости (*EDV*) кровотока в артериях глаза рассматриваются в качестве биомаркеров прогрессирования заболевания (табл. 1). Так, Zegadlo et al. [41] при обследовании 89 пациентов с различными стадиями ПОУГ с помощью ультразвуковой доплерографии показали взаимосвязь между дефицитом глазного кровотока, повышением вазорезистентности в глазных сосудах и истончением слоя нервных волокон сетчатки. Авторы рекомендовали использование этого метода не только в качестве диагностического теста, но и для оценки эффективности лечения при повышенном риске прогрессирования ГОН.

М. Kalayci et al. [42] при сравнении результатов обследования 145 пациентов в динамике обнаружили снижение *EDV* в ГА и повышение индекса резистентности в ГА и ЦАС у пациентов с ПОУГ и ГНД по сравнению с группой здоровых добровольцев. Авторы предложили использовать УЗИ с оценкой кровотока для выявления степени тяжести глаукомного поражения зрительного нерва и мониторинга прогрессирования заболевания (табл. 2). Аналогичные данные были получены Eniola et al. в 2018 году при обследовании 200 пациентов с ПОУГ [43].

**Ультразвуковые доплеровские методы в оценке глазного кровотока у пациентов с глаукомой
(данные литературы)**

Table 1

Doppler ultrasound in the evaluation of ocular blood flow in patients with glaucoma (literature data)

Клинические исследования	Пациенты/глаза с ПОУГ	Результаты	Выводы
Abegao P. et al. [39]	546 пациентов: 214 с ПОУГ; 192 с ГНД; контроль – 140 здоровых лиц	– Снижение скорости кровотока в сосудах глаза – Асимметрия толщины хориоидеи	Регистрацию показателей глазного кровотока необходимо использовать в ежедневной клинической практике для диагностики глаукомы
Krzyz' anowska-Berkowska et al. [40]	211 пациентов: 70 с ПОУГ, 72 с подозрением на глаукому	Снижение PSV и средней скорости кровотока в ГА и ЦАС	Нарушения гемодинамики могут быть связаны с изменениями структурных характеристик lamina cribrosa зрительного нерва при ПОУГ
Kalayci et al. [42]	145 пациентов: 35 с ПОУГ, 65 с ГНД и контроль – 45 здоровых лиц	Повышение RI в ГА и ЦАС	Показатели вазорезистентности в ГА и толщины комплекса интима–медиа ВСА могут быть использованы в диагностике ПОУГ
Eniola et al. [43]	200 глаз, из них 100 с ПОУГ и 100 глаз без патологии	– Снижение PSV и EDV в ГА и ЦАС – Повышение RI в ГА и ЦАС	При ПОУГ регистрируется снижение скорости кровотока и повышение вазорезистентности в сосудах глаза по сравнению с нормой
Н. И. Курышева и др. [46]	62 глаза: ПОУГ – 32 глаза, контроль – 30 здоровых глаз	Снижение EDV в ЦАС и ЗКЦА	Показатели глазного кровотока являются информативными в диагностике ранних стадий ПОУГ

П р и м е ч а н и е: здесь и в табл. 2 ПОУГ – первичная открытоугольная глаукома, ГНД – глаукома нормального давления, ГА – глазная артерия, ЦАС – центральная артерия сетчатки, ЗКЦА – задние короткие цилиарные артерии, PSV – максимальная систолическая скорость кровотока, EDV – конечная диастолическая скорость кровотока, RI – индекс резистентности.

Таблица 2

Ультразвуковые доплеровские методы в мониторинге состояния глазного кровотока у пациентов с глаукомой (данные литературы)

Table 2

Doppler Ultrasound in the monitoring of ocular blood flow in patients with glaucoma (literature data)

Клинические исследования	Пациенты/глаза с ПОУГ	Результаты	Выводы
Zegadlo et al. [41]	89 глаз: 31 с препериметрической ПОУГ, 29 – с начальной 12 – с развитой и 17 с далекозашедшей стадией ПОУГ	– Снижение PSV в ГА и ЦАС при далекозашедшей стадии – Повышение RI в ЦАС при развитой/далекозашедшей стадии	Доплеровские критерии необходимы для определения риска прогрессирования ГОН и контроля лечения глаукомы
Kalayci et al. [42]	145 человек: 35 с ПОУГ, 65 с ГНД, 45 лиц без глаукомы	Повышение RI в ГА и ЦАС	Метод может быть использован для оценки степени тяжести и мониторинга прогрессирования глаукомы
Calvo et al., [44]	262 пациента с подозрением на глаукому (срок наблюдения 48 месяцев)	RI > 0,75 в ГА связан с развитием глаукомы	Снижение показателей скорости кровотока может являться фактором риска развития глаукомы
Magureanu et al. [45]	102 пациента (202 глаза) с подтвержденным диагнозом ГОН	Снижение PSV в ЦАС при прогрессировании глаукомы	УЗИ с оценкой кровотока – важный диагностический метод, который можно использовать в динамике для коррекции медикаментозной терапии
F. Jimenez-Aragon et al. [47]	71 пациент с ПОУГ (срок наблюдения 5 лет)	– Снижение EDV в ГА и ЦАС – Повышение RI в ГА и ЦАС	Показатели кровотока – важные биомаркеры для определения высокого риска прогрессирования глаукомы

П р и м е ч а н и е: препериметрическая ПОУГ – глаукома, при которой имеются структурные изменения диска зрительного нерва и сетчатки при нормальных показателях стандартной компьютерной периметрии.

По данным P. Calvo et al. [44], индекс резистентности выше 0,75 в ГА связан с риском развития глаукомы. Имеются сведения об информативности показателей скорости кровотока и RI в ГА, ЦАС и ЗКЦА в мониторинге функционально-структурных характеристик зрительного нерва у пациентов с ПОУГ при повышенном ВГД [45–47].

F. Galassi et al. [48] использовали ЦДК с доплерографией при обследовании 44 пациентов с ПОУГ в динамике в течение 7 лет и установили прямую достоверную корреляцию между снижением показателей скорости кровотока в артериях глаза и прогрессированием потери поля зрения.

Заключение

Ультразвуковые доплеровские методы исследования сосудов глаза позволяют диагностировать признаки нарушения кровотока в ГА, ЦАС, ЗКЦА и глазных венах у пациентов с ПОУГ. По многочисленным данным литературы, наиболее выраженные изменения регионарного глазного кровотока имеют место у пациентов с ГНД. Следует подчеркнуть, что кровоток в ЦАС и ЗКЦА наиболее чувствителен к колебаниям ВГД, что отражается снижением конечной диастолической скорости кровотока и повышением показателей вазорезистентности в этих сосудах.

Будущие исследования необходимы для изучения связи структурных повреждений при глаукоме и регионарного артериального кровотока, а также взаимосвязи нарушений артериального и венозного кровотока. Проведение исследований с более длительными периодами наблюдения могут объяснить взаимосвязь между нарушением глазного кровообращения, функционально-структурными изменениями зрительного нерва и прогрессированием глаукомы. Однако следует учитывать зависимость результатов УЗИ с оценкой кровотока от квалификации и профессиональных навыков врача, проводящего исследование. В клинической практике для повышения информативности метода и получения достоверных сведений о состоянии гемодинамики глаза необходима стандартизация техники проведения доплерографии ретробульбарных сосудов и разработка оптимального протокола исследования для наилучшей интерпретации полученных данных.

Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare that they have no conflict of interest.

Литература / References

1. Omodaka K, Kikawa T, Kabakura S, Tsuda S, Ninomiya T, Takahashi N, Pak K. Clinical characteristics of glaucoma patients with various risk factors. *BMC Ophthalmol*. 2022;22(1):373. Doi: 10.1186/s12886-022-02587-52.
2. Современные перспективы и разработки местных гипотензивных препаратов для лечения глаукомы / Петров С.Ю., Филиппова О.М., Малишевская Т.Н., Маркелова О.И. // *Росс. офтальмол. журн.* – 2024. – Т. 17, № 2. – С. 154–159. [Petrov SYu, Filippova OM, Malishevskaya TN,

Markelova OI. Current trends and prospects of the local anti-hypertensive drugs development for the glaucoma treatment. *Russ Ophthalmol J*. 2024;17(2):154-159. (In Russ.]. Doi: 10.21516/2072-0076-2024-17-2-154-159.

3. Chan KKW, Tang F, Tham CCY, Young AL, Cheung CY. Retinal vasculature in glaucoma: a review. *BMJ Open Ophthalmol*. 2017;1(1):e000032. Doi: 10.1136/bmjophth-2016-000032.

4. Harris A, Guidoboni G, Siesky B, Mathew S, Verticchio Vercellin AC, Rowe L, Arciero J. Ocular blood flow as a clinical observation: Value, limitations and data analysis. *Prog Retin Eye Res*. 2020:100841. Doi: 10.1016/j.preteyeres.2020.100841.

5. Schmetterer L, Kiel JW. *Ocular blood flow*. New York, Springer; 2012:147-158.

6. Nivean PD, Ariga M, Chithra M, Gohil P, Das S, Jaidheep G. Efficacy of dorzolamide in improving ocular blood flow in patients with open-angle glaucoma: The Indian carbonic anhydrase inhibitor trial. 2022;70(12):4164-4167. Doi: 10.4103/ijo.IJO_1055_22.

7. Кuryшева Н.И. Сосудистая теория патогенеза глаукомной оптиконейропатии: обоснование с позиций анатомии и физиологии глазного кровотока. Часть 1 // *Нац. журн. Глаукома.* – 2017. – Т. 16, № 3. – С. 90–97. [Kuryshva NI. Vascular theory of the glaucomatous optic neuropathy pathogenesis: rationale in terms of ocular blood flow anatomy and physiology. Part 1. *Nat J Glaucoma*. 2017;16(3):90-97. (In Russ.)].

8. Wu X, Konieczka K, Liu X, Chen M, Yao K, Wang K, Flammer J. The role of ocular blood flow in normal tension glaucoma. *Adv Ophthalmol Pract Res*. 2022;2(1):100036. Doi: 10.1016/j.aopr.2022.100036.

9. Ahmad SS. Controversies in the vascular theory of glaucomatous optic nerve degeneration. *Taiwan J Ophthalmol*. 2016;6:182-186. Doi: 10.1016/j.tjo.2016.05.009.

10. Возможности цветового дуплексного сканирования в диагностике сосудистой патологии глаза / Киселева Т.Н., Зайцев М.С., Рамазанова К.А., Луговкина К.В. // *Росс. офтальмол. журн.* – 2018. – Т. 11, № 3. – С. 84–94. [Kiseleva TN, Zaitsev MS, Ramazanova KA, Lugovkina KV. Possibilities of color Duplex Imaging in the diagnosis of ocular vascular pathology. *Russ Ophthalmol J*. 2018;11(3):84-94. (In Russ.)]. Doi: 10.21516/2072-0076-2018-11-3-84-94.

11. Harris A, Jonescu-Cuepers C, Kagemann L, Chulla T, Krieglstein G. Ocular blood flow – vascular anatomy, pathophysiology and metabolism. Philadelphia, Butterworth-Heinemann, 2003:128.

12. Анатомические характеристики и структурные особенности зрительного нерва / Киселева Т.Н., Баева А.В., Елисеева Е.К., Луговкина К.В. // *Росс. офтальмол. журн.* – 2024. – Т. 17, № 1. – С. 130–135. [Kiseleva TN, Baeva AV, Eliseeva EK, Lugovkina KV. Anatomical characteristics and structural features of the optic nerve. *Russ Ophthalmol J*. 2024;17(1):130-135. (In Russ.)]. Doi: 10.21516/2072-0076-2024-17-1-130-135.

13. Zarzecki M, Obuchowska I, Ustymowicz A, Konopińska J. Glaucoma Surgery and Ocular Blood Flow in Colour Doppler Imaging: Is There a Link? *Clin Ophthalmol*. 2024;18:49-60. Doi: 10.2147/OPHTH.S441805.

14. Flammer J, Orgül S, Costa VP, Orzalesi N, Krieglstein GK, Serra LM, Renard JP, Stefánsson E. The impact of ocular blood flow in glaucoma. *Prog Retin Eye Res*. 2002;21:359-393. Doi: 10.1016/s1350-9462(02)00008-3.

15. Killer H, Pircher A. Normal tension glaucoma: Review of current understanding and mechanisms of the pathogenesis. *Eye*. 2018;32:924-930. Doi: 10.1038/s41433-018-0042-2.

16. Trivli A, Koliarakis I, Terzidou C, Goulielmos GN, Siganos CS, Spandidos DA, Dalianis G, Detorakis ET. Normal-tension glaucoma: Pathogenesis and genetics. *Exp Ther Med*. 2019;17:563-574. Doi: 10.3892/etm.2018.7011.
17. Muller M, Kessler C, Wessel K, Mehdorn E, Kompf D. Low-tension glaucoma: a comparative study with retinal ischemic syndromes and anterior ischemic optic neuropathy. *Ophthalm Surg*. 1993;24(12):835-838. Choi J, Kook MS. Systemic and Ocular Hemodynamic Risk Factors in Glaucoma. *Biomed Res Int*. 2015;2015:141905. Doi: 10.1155/2015/141905.
18. Chou CC, Hsu MY, Lin CH, Lin CC, Wang CY, Shen YC, Wang IJ. Risk of developing open-angle glaucoma in patients with carotid artery stenosis: A nationwide cohort study. *PLoS ONE*. 2018;13(4):e0194533. Doi: 10.1371/journal.pone.0194533.
19. Funk RO, Hodge DO, Kohli D, Roddy GW. Multiple Systemic Vascular Risk Factors Are Associated With Low-Tension Glaucoma. *J. Glaucoma* 2022;31(1):15-22. Doi: 10.1097/IJG.0000000000001964.
20. Тарасова Л.Н., Киселева Т.Н., Фокин А.А. Глазной ишемический синдром. – М.: Медицина, 2003. – 173 С. [Tarasova LN, Kiseleva TN, Fokin AA. Ocular ischemic syndrome. Moscow, Medicine, 2003:173. (In Russ.)].
21. Киселева Т.Н., Григорьева Е.Г., Тарасова Л.Н. Глаукоматозная нейропатия в сочетании с патологией сонных артерий: особенности патогенеза и диагностики // *Вестн. офтальмол.* – 2003. – Т. 119, № 6. – С. 5–7. [Kiseleva TN, Grigoreva EG, Tarasova LN. Glaucomatous neuropathy combined with carotid pathology: features of pathogenesis and diagnosis. *Vestnik Oftalmologii*. 2003;119(6):5-7. (In Russ.)].
22. Lin WYu, Wang JJ, Chen Ch Y, Liu Ch Y, Lin MH, Yang YH, Lai ChH. The Relationship Between Carotid Artery Stenosis and the Development of Open-Angle Glaucoma: A Long-term Cohort Study in Taiwan. *Ophthalmic Epidemiol*. 2024;1-9. Doi: 10.1080/09286586.2024.2371467.
23. Gutman J, Melamed S, Ashkenazy J, Blumenthal M. Optic nerve compression by carotid arteries in low-tension glaucoma. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. 1993;231(12):711-717. Doi: 10.1007/BF00919286.
24. Fan N, Wang P, Tang L, Liu X. Ocular blood flow and normal tension glaucoma. *Biomed Res Int*. 2015;2015:308505. Doi: 10.1155/2015/3085058.
25. Tian T, Liu YH. Normal-tension glaucoma and Alzheimer's disease: Retinal vessel signs as a possible common underlying risk factor. *Med Hypotheses*. 2011;77(3):466. Doi: 10.1016/j.mehy.2011.06.039.
26. Микроциркуляция глаза при глаукоме. Часть 1. Методы исследования. / Петров С.Ю., Киселева Т.Н., Охоцимская Т.Д., Маркелова О.И. // *Офтальмол. ведомости*. – 2024. – Т. 17, № 3. – С. 113–123. [Petrov SYu, Kiseleva TN, Okhotsimskaya TD, Markelova OI. Eye microcirculation in glaucoma. Part 1. Diagnostic methods. *Ophthalmology reports*. 2024;17(3):113-123. (In Russ.)]. Doi: 10.17816/OV628995.
27. Erickson SJ, Hendrix LE, Massaro BM et al. Color Doppler flow imaging of the normal and abnormal orbit. *Radiology*. 1989;173(2):511-516. Doi: 10.1148/radiology.173.2.2678264.
28. Guidance for Industry and FDA staff/ Information for Manufacturers Seeking Marketing Clearance of Diagnostic Ultrasound Systems and Transducers (Appendix om 30.09.97 E). Silver Spring, 2008:64.
29. Нероев В.В., Киселева Т.Н., Луговкина К.В. Ультразвуковые исследования в офтальмологии : руководство для врачей. 1-е изд. / под ред. В.В. Нероева, Т.Н. Киселевой. – М.: ИКАР, 2019. – 324 С. [Neroev VV, Kiseleva TN, Lugovkina KV. *Ultrasound in Ophthalmology : guide for doctors*. 1st ed. / eds by VV Neroev, TN Kiseleva. Moscow, IKAR, 2019:324. (In Russ.)].
30. Williamson T, Baxter G, Pyott A, Wykes W, Dutton GN. A comparison of Color Doppler imaging of orbital vessels and other methods of blood flow assessment. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. 1995;233(2):80-84. Doi: 10.1007/BF00241476.
31. Castilla-Guerra L, Gomez Escobar A, Gomez Cerezo JF. Utility of Doppler ultrasound for the study of ocular vascular disease. *Rev Clin Esp (Barc)*. 2021;221(7):418-425. Doi: 10.1016/j.rceng.2020.11.007.
32. Banou L, Dastiridou A, Giannoukas A, Kouvelos G, Baros Ch, Androudi S. The Role of Color Doppler Imaging in the Diagnosis of Glaucoma: A Review of the Literature. *Diagnostics*. 2023;13(4):588. Doi: 10.3390/diagnostics13040588.
33. Tranquart F, Bergès O, Koskas P et al. Color Doppler imaging of orbital vessels: personal experience and literature review. *J Clin Ultrasound*. 2003;31(5):258-273. Doi: 10.1002/jcu.10169.
34. Oglat AA, Matjafri MZ, Suardi N, Oqlat MA, Abdelrahman MA, Oqlat AA. A review of medical Doppler ultrasonography of blood flow in general and especially in common carotid artery. *J Med Ultrasound*. 2018;26(1):3-13. Doi: 10.4103/JMU.JMU_11_17.
35. Boehm AG, Helmke K, Berry CC, Weinreb RN. Comparison of two transducers for Color Doppler Imaging of the retrobulbar vessels. *J Glaucoma*. 2002;11(2):148-153. Doi: 10.1097/00061198-200204000-00011.
36. Bittner M, Faes L, Boehni SC et al. Colour Doppler analysis of ophthalmic vessels in the diagnosis of carotid artery and retinal vein occlusion, diabetic retinopathy and glaucoma: systematic review of test accuracy studies. *BMC Ophthalmol*. 2016;16(1):214. Doi: 10.1186/s12886-016-0384-0.
37. Малишевская Т.Н., Киселева Т.Н., Филиппова Ю.Е. и др. Структурно-функциональные особенности периферических сосудов при глаукоме // *Вестн. офтальмол.* – 2020. – Т. 136, № 5. – С. 67–76. [Malishevskaya TN, Kiseleva TN, Filippova YuE, Vlasova AS, Nemtsova IV, Vasilchenko VV, Zaytsev MS. Structural and functional features of peripheral vasculature in patients with glaucoma. *Russ Ann Ophthalmol*. 2020;136(5):67-76. (In Russ.)]. Doi: 10.17116/oflta202013605167.
38. Курьшева Н.И., Киселева Т.Н., Рыжков П.К. и др. Влияние венозного кровотока глаза на состояние комплекса ганглиозных клеток сетчатки у больных первичной открытоугольной глаукомой // *Офтальмология*. – 2013. – Т. 10, № 1. – С. 26–31. [Kuryshva NI, Kiseleva TN, Ryzhkov PK, Fomin AV, Khodak NA, Arzhevnishvili TD. The influence of venous blood flow on the retinal ganglion cell complex in patients with primary open angle glaucoma. *Ophthalmol Russ*. 2013;10(1):26-31. (In Russ.)]. Doi: 10.18008/1816-5095-2013-1-26-31.
39. Abegão Pinto L, Willekens K, Van Keer K, Shibesh A, Molenberghs G, Vandewalle E, Stalmans I. Ocular blood flow in glaucoma – the Leuven Eye Study. *Acta Ophthalmol*. 2016;94(6):592-598. Doi: 10.1111/aos.12962.
40. Krzyzanowska-Berkowska P, Czajor K, Iskander DR. Associating the biomarkers of ocular blood flow with lamina cribrosa parameters in normotensive glaucoma suspects. Comparison to glaucoma patients and healthy controls. *PLoS ONE*. 2021;16(3):e0248851. Doi: 10.1371/journal.pone.0248851.
41. Zegadlo A, Wierzbowska J. Colour Doppler imaging of retrobulbar circulation in different severity of glaucoma optic neuropathy. *Med Ultrason*. 2021;23(4):410-417.
42. Kalayci M, Tahtabasi M. Assessment of Doppler flow parameters of the retrobulbar arteries and internal carotid artery in patients with glaucoma: The significance of ophthalmic artery peak ratio and the intima-media thickness of the internal

carotid artery. *Int Ophthalmol.* 2020;40(12):3337-3348. Doi: 10.1007/s10792-020-01520-3.

43. Eniola MA, Adeyomoye AAO, Musa KO, Ishola AAS, Olatunji OO. Ophthalmic artery and central retinal artery Doppler patterns in primary open angle glaucoma patients at the Lagos University teaching Hospital, Nigeria. *J West Afr Coll Surg.* 2018;8(3):1-21.

44. Calvo P, Ferreras A, Polo V, Güerri N, Seral P, Fuertes-Lazaro I, Pablo LE. Predictive value of retrobulbar blood flow velocities in glaucoma suspects. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2012;53(7):3875-3884. Doi: 10.1167/iovs.11-8817.

45. Magureanu M, Stanila A, Bunescu LV, Armeanu C. Color Doppler imaging of the retrobulbar circulation in progressive glaucoma optic neuropathy. *Rom J Ophthalmol.* 2016;60(4):237-248.

46. Курьшьева Н.И., Паршунина О.А., Маслова Е.В. и др. Диагностическая значимость исследования глазного кровотока в раннем выявлении первичной открытоугольной глаукомы // Нац. журн. Глаукома. – 2015. – Т. 14, № 3. – С. 19–29. [Kuryshcheva NI, Parshunina OA, Maslova EV, Shatalova EO, Kiseleva TN, Lagutin MB. Role of eye hemoperfusion in the progress of primary open-angle glaucoma. *Nat J Glaucoma.* 2015;14(3):19-29. (In Russ.)].

47. Jimenez-Aragon F, Garcia-Martin E, Larrosa-Lopez R, Artigas-Martín JM, Seral-Moral P, Pablo LE. Role of color Doppler imaging in early diagnosis and prediction of progression in glaucoma. *Biomed Res Int.* 2013;2013:871689. Doi: 10.1155/2013/871689.

48. Galassi F, Sodi A, Ucci F, Renieri G, Pieri B, Baccini M. Ocular hemodynamics and glaucoma prognosis. *Arch Ophthalmol.* 2003;121(12):1711-1715. Doi: 10.1001/archophth.121.12.1711.

Информация об авторах

Малишевская Татьяна Николаевна – доктор медицинских наук, заведующая отделением аналитической работы, доцент кафедры непрерывного медицинского образования, Национальный медицинский исследовательский центр глазных болезней им. Гельмгольца, Москва, Россия, e-mail: malishevskoff@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-3679-8619.

Киселева Татьяна Николаевна – доктор медицинских наук, профессор, руководитель отдела ультразвуковых исследований, профессор кафедры непрерывного медицинского образования, Национальный медицинский исследовательский центр глазных болезней им. Гельмгольца, Москва, Россия, e-mail: tkisseleva@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-9185-6407.

Рензяк Екатерина Владимировна – врач-офтальмолог офтальмологического центра, Бюджетное учреждение Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Окружная клиническая больница», г. Ханты-Мансийск, Россия, e-mail: katrenzyak@mail.ru, ORCID: 0009-0007-2258-2207.

Authors information

Malishevskaya Tatiana N. – MD, Head, Analytical Department, Associate Professor, Continuing Medical Education Department, Helmholtz National Medical Research Center for Eye Diseases, Moscow, Russia, e-mail: malishevskoff@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-3679-8619.

Kiseleva Tatiana N. – MD, Professor, Head, Ultrasound department, Professor, Continuing Medical Education Department, Helmholtz National Medical Research Center for Eye Diseases, Moscow, Russia, e-mail: tkisseleva@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-9185-6407.

Renzyak Ekaterina V. – Ophthalmologist, Ophthalmological Center, District Clinical Hospital, Khanty-Mansiysk, Russia, e-mail: katrenzyak@mail.ru, ORCID: 0009-0007-2258-2207.