

Исследование перипапиллярного хориокапиллярного кровотока при глаукоме. Часть 2. Выпадение перипапиллярных хориокапилляров и его связь с прогрессированием глаукомной оптиконейропатии

Курышева Н.И., д.м.н., профессор, заведующая кафедрой глазных болезней¹, заведующая консультативно-диагностическим отделом²; <https://orcid.org/0000-0002-2265-6671>

Ким В.Ю., врач-офтальмолог², ассистент кафедры глазных болезней¹; <https://orcid.org/0000-0001-7861-5863>

Ким В.Е., врач-офтальмолог², ассистент кафедры глазных болезней¹. <https://orcid.org/0000-0002-8400-2817>

¹Медико-биологический университет инноваций и непрерывного образования ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 123098, Российская Федерация, Москва, ул. Живописная, 46, корп. 8;

²Центр офтальмологии ФМБА России, ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 123098, Российская Федерация, Москва, ул. Гамалеи, 15.

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

Конфликт интересов: отсутствует.

Для цитирования: Курышева Н.И., Ким В.Ю., Ким В.Е. Исследование перипапиллярного хориокапиллярного кровотока при глаукоме. Часть 2. Выпадение перипапиллярных хориокапилляров и его связь с глаукомной оптиконейропатией. (Обзор литературы). *Национальный журнал глаукома*. 2024; 23(4):54-59.

Резюме

Выпадение хориокапилляров в бета-зоне перипапиллярной атрофии хориоидеи является важным маркером при диагностике глаукомы. Этот показатель связан с истончением слоя нервных волокон сетчатки, ганглиозных клеток сетчатки, ухудшением полей зрения. Приводятся данные о связи хориокапиллярного кровотока с прогрессированием глаукомной оптиконейропатии,

что позволяет рассматривать выпадение хориокапилляров как важный биомаркер прогрессирования глаукомы. Рассматриваются данные литературы о том, как изменения хориокапиллярного кровотока связаны с лечением глаукомы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: первичная открытоугольная глаукома, глазной кровоток, хориокапиллярный слой, хориоидея.

Для контактов:

Ким Валерия Енгировна, e-mail: kimvaleriya96@gmail.com

LITERATURE REVIEW

Peripapillary choriocapillaris blood flow in glaucoma. Part 2. Peripapillary choriocapillaris dropout and its relationship to the progression of glaucomatous optic neuropathy

KURYSHEVA N.I., Dr. Sci. (Med.), Professor, Head of the Academic Department of Ophthalmology¹, Head of the Consultative and Diagnostic Department²; <https://orcid.org/0000-0002-2265-6671>

Kim V.Yu., ophthalmologist at the Consultative and Diagnostic Department², Assistant Professor at the Academic Department of Ophthalmology¹; <https://orcid.org/0000-0001-7861-5863>

Kim V.E., ophthalmologist at the Consultative and Diagnostic Department², Assistant Professor at the Academic Department of Ophthalmology¹. <https://orcid.org/0000-0002-8400-2817>

¹Medical Biological University of Innovations and Continuing Education, Burnazyan Federal Biophysical Center, Federal Medical and Biological Agency, 46-8 Zhivopisnaya St., Moscow, Russian Federation, 123098;

²Ophthalmological Center, Burnazyan Federal Biophysical Center, Federal Medical and Biological Agency, 15 Gamalei St., Moscow, Russian Federation, 123098.

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

Conflicts of Interest: none declared.

For citations: Kuryшева N.I., Kim V.Yu., Kim V.E. Peripapillary choriocapillaris blood flow in glaucoma. Part 2. Peripapillary choriocapillaris dropout and its relationship to the progression of glaucomatous optic neuropathy. *Natsional'nyi zhurnal glaukoma*. 2024; 23(4):54-59.

Abstract

Choriocapillaris dropout within the beta zone of peripapillary choroidal atrophy is a significant marker in glaucoma diagnosis. This marker is associated with retinal nerve fiber layer thinning, retinal ganglion cell loss, and visual field deterioration. This review highlights data showing a correlation between choriocapillaris blood flow and

the progression of glaucomatous optic neuropathy, suggesting that choriocapillaris dropout serves as a vital biomarker for glaucoma progression, and provides literature evidence on how choriocapillaris blood flow changes relate to glaucoma treatment.

KEYWORDS: primary open-angle glaucoma, ocular blood flow, choroidal microvasculature, choroid.

На сканах Angio Disc 4.5×4.5mm (RTVue-100, Optovue Inc., США) β-зона визуализируется в области атрофии пигментного эпителия сетчатки с более четко видимыми хориоидальными сосудами и склерой (рис. 1). Выпадение хориокапилляров определяют как фокальное секторальное выпадение капилляров без какой-либо видимой микрососудистой сети в перипапиллярной области на изображениях en face в режиме ангиографии [1]. Учитывая прогностическую ценность выпадения хориокапилляров, многие авторы активно изучают этот вопрос.

Выпадение хориокапилляров как предиктор к прогрессированию глаукомы

Выпадение хориокапилляров в β-зоне перипапиллярной атрофии (β-ППАХ) коррелирует с прогрессированием глаукомы по данным периметрического индекса MD, а также является предиктором возникновения парафовеолярных скотом [2, 3].

Выпадение хориокапилляров часто является достоверным признаком прогрессирующего истончения слоя нервных волокон сетчатки (СНВС) [4]. У пациентов с глаукомой выпадение глубоких слоев микроциркуляторного русла в β-ППАХ (MvD) связано с истончением СНВС и слоя ганглиозных клеток сетчатки (ГКС) [5–7]. Согласно исследованию Shin J.W., в глазах с MvD периметрические индексы MD и PSD были значительно хуже, средняя плотность сосудов в области диска зрительного нерва (ДЗН) была ниже, СНВС был тоньше, а площадь β-ППАХ — больше, чем в глазах без выпадения хориокапилляров [8].

В недавнем исследовании Eun Ji Lee и соавт. поставили цель определить прогностическую значимость выпадения микроциркуляторного русла хориоидеи для прогнозирования скорости прогрессирующего истончения СНВС в глазах с первичной открытоугольной глаукомой (ПОУГ).

В это исследование был включен 101 глаз у 101 пациента с ПОУГ, которым исходно была выполнена оптическая когерентная томография (ОКТ) с ангио

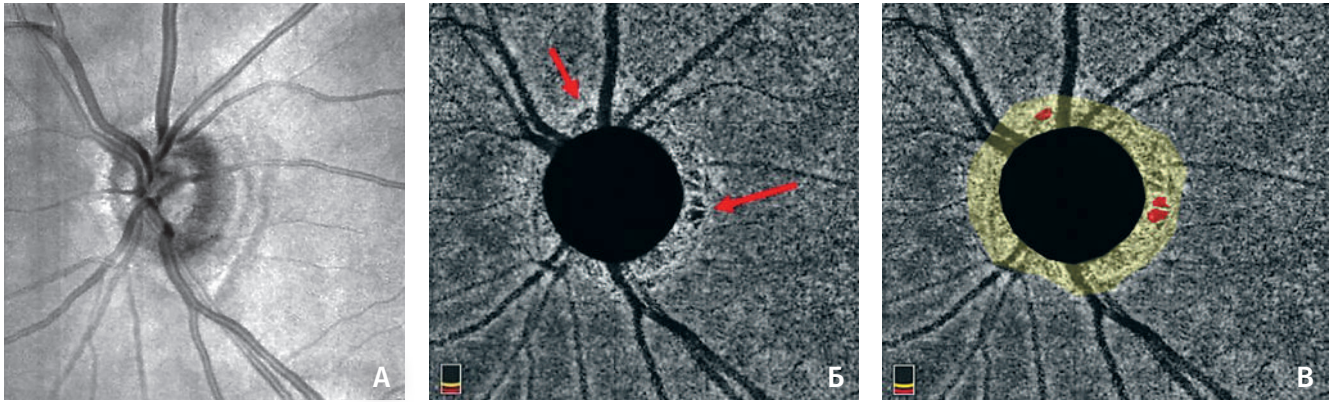


Рис. 1. (А, Б, В) Определение площади и локализации выпадения хориокапилляров в пределах β -зоны перипапиллярной атрофии хориоидеи на карте плотности сосудов диска зрительного нерва. На сканах $4,5 \times 4,5$ мм ДЗН на уровне хориоидеи внутри β -зоны визуализируется полная потеря хориокапилляров (красные стрелки). С помощью сторонней программы ImageJ по пикселям рассчитывается площадь выпадения хориокапилляров в мм^2 внутри β -зоны. В эти области обозначены красным цветом).

Fig. 1. Determining the area and localization of choriocapillaris dropout within the β -zone of peripapillary choroidal atrophy on an optic nerve head vessel density map. Total choriocapillaris loss is visualized within the β -zone in 4.5×4.5 mm optic nerve head scans at the choroidal level (indicated by red arrows). The area of choriocapillaris dropout within the β -zone is calculated in mm^2 using the ImageJ software, with affected areas marked in red on the rightmost image.

графией ДЗН и которые находились под наблюдением в течение как минимум 2 лет, в течение которых толщина СНВС измерялась методом последовательной ОКТ в спектральной области.

Выпадение микроциркуляторного русла выявлено в 48 глазах (47,5%). Скорость глобального истончения СНВС была значительно выше в глазах с MvD, чем в глазах без MvD ($-1,6 \pm 0,8$ против $-1,2 \pm 0,9$ мкм/год; $p=0,018$). Глаза с MvD в нижней полусфере ($n=41$) показали более высокую скорость истончения СНВС в этом секторе, чем глаза без MvD ($p=0,036$). Глаза с MvD в обеих полусферах ($n=5$) показали более высокие показатели истончения СНВС в верхнем ($p=0,027$) и нижнем секторах ($p=0,016$), чем глаза без MvD. Многофакторный регрессионный анализ показал, что MvD на исходном уровне ($p=0,003$) и наличие геморрагий ДЗН во время наблюдения ($p=0,001$) были независимо связаны с более быстрыми темпами глобального истончения СНВС. [9]

Также Kim JA и соавт. поставили задачу оценить изменения перипапиллярной хориоидеи у пациентов с ПОУГ и определить, связано ли это изменение с прогрессирующим истончением СНВС. В его работе из 68 участников 37 (54,5%) были женщинами, а средний возраст составил 54,3 года. Из 68 глаз у 22 (32,4%) во время наблюдения отмечалось увеличение площади MvD. Более быстрое глобальное истончение СНВС было связано с большей площадью исходной β -ППАХ ($p=0,1$), обнаружением геморрагий ДЗН в ходе наблюдения ($p=0,001$) и большим увеличением площади MvD ($p=0,002$) [10].

По данным Lin S. с соавт., при обследовании 71 глаза с глаукомой нормального давления (ГНД) наличие MvD наблюдалось в 23 случаях (32,4%). По сравнению с глазами без MvD глаза с MvD имели более тонкий СНВС ($68,8 \pm 9,6$ против $76,2 \pm 16,7$ мкм,

$p=0,016$) и более высокую скорость потери СНВС ($-1,2 \pm 1,5$ против $-0,4 \pm 1,4$ мкм/год, $p=0,036$). При однофакторном анализе показателей потери СНВС наличие MvD на исходном уровне ($p=0,033$) было достоверно связано с прогрессирующей потерей СНВС. После поправки на возраст, женский пол, среднее значение ВГД за период наблюдения, осевую длину, толщину центральной части роговицы и среднее отклонение, наличие MvD на исходном уровне ($p=0,041$) оказалось достоверно связано с более быстрыми темпами потери СНВС. Исходя из вышесказанного, можно предположить, что существует значительная корреляция между наличием MvD и уменьшением толщины СНВС у пациентов с ГНД [11].

Jo YH с соавт., обследовав 80 глаз с ПОУГ, показали что наличие MvD на исходном этапе является независимым предиктором прогрессирования потери поля зрения. Глаза с MvD демонстрировали более высокую скорость потери в центре и в верхней полусфере поля зрения [12].

Недавно Ji Mi Kwon и соавт. выявили, что при выпадении хориокапилляров в юстапапиллярной зоне скорость истончения СНВС достоверно выше в сравнении с группой без выпадения хориокапилляров [5]. Также Yoon J. Lee с соавт., проанализировав 182 глаза с ПОУГ II-III стадий, сделали вывод о том, что поражение микрососудистого русла именно на уровне поверхностного плексуса является значимым предиктором прогрессирующей потери полей зрения [13].

В исследовании Igarashi R и соавт. была показана корреляция между площадью MvD с индексами MD и PSD ($p<0,001$) и СНВС ($p=0,0027$) [14]. Micheletti E. и соавт. показали взаимосвязь расширения MvD с большими флуктуациями ВГД, более высоким пиковым ВГД, низким MD и большим количеством местных гипотензивных препаратов [15].

В первой части обзора нами была упомянута связь состояния решетчатой мембраны склеры (РМС) и хориокапиллярного кровотока. Исходя из этого, многие авторы активно исследуют отношения между двумя этими структурами.

Min Hee Suh с соавт. при обследовании 94 глаз с перепериметрической глаукомой в одной трети случаев выявили MvD. Глаза с MvD имели значительно более тонкий СНВС во всех областях, за исключением нижне-назального сектора, худшие индексы VF и MD, а также более выраженную распространенность дефектов РМС и большую площадь β -ППАХ [7].

Этим же авторами показано, что средние значения сосудистой плотности в перипапиллярной сетчатке (срVD) для глаз с дефектами РМС были значительно ниже, чем для глаз без дефекта в целом и в нижнетемпоральной области (IT). Глаза с дефектами РМС в нижневисочном секторе имели достоверно более низкие значения срVD, чем глаза без таких дефектов в соответствующих нижних секторах. Глаза с дефектами РМС в верхнетемпоральном секторе (ST) имели более низкие срVD, чем в других секторах. [16]

В нашем недавнем исследовании была отмечена обратная зависимость между индексом кривизны РМС (LCCI, показателем деформации и изменения положения РМС по отношению к плоскости мембраны Бруха, не зависящий от толщины хориоидеи) и плотностью капилляров в области ДЗН и в фовеа и парафовеа. Большей зоне выпадения хориокапилляров соответствовали более высокие значения LCCI [17].

Ранее нами было показано, что снижение кровотока в задних коротких цилиарных артериях, питающих хориоидею и РМС, ассоциировано со снижением толщины СНВС и сетчатки во всех секторах макулярной области [18]. Увеличение LCCI, по нашим данным, достоверно связано как с истончением перипапиллярной хориоидеи, так и с площадью выпадения хориокапилляров. Все это подтверждает теорию о первичном инсульте РМС при глаукоме, выдвинутую Burgoyne C, согласно которой первичное повреждение происходит в аксонах ГКС преимущественно на уровне РМС [19].

В работе Akagi T. и соавт. наблюдалось следующее распределение глаз по наличию хориокапилляров или их отсутствию: в 42 глазах было выявлено выпадение хориокапилляров в области ДЗН с височной стороны с хорошей визуализацией передней поверхности РМС (MvD-D), в 37 — выпадение хориокапилляров в области ДЗН с височной стороны, но с сомнительной визуализацией передней поверхности РМС (псевдо-MvD-D) и в 44 — отсутствие выпадения хориокапилляров (No MvD-D), соответственно. В глазах с MvD-D наблюдались значительно более низкое внутриглазное давление, худшие значения MD, бо льшие размеры экскавации, более тонкий слой СНВС и меньшая плотность капилляров в перипапиллярной зоне, чем в глазах с псевдо-

MvD-D либо без выпадения хориокапилляров. Многофакторный логистический регрессионный анализ показал значимые ассоциации MvD-D с бо льшими значениями экскавации, худшим MD, более частыми дефектами РМС и более выраженным выпадением хориокапилляров в перипапиллярной области [20].

Lee J.Y. и соавт. показали, что у больных глаукомой при выпадении хориокапилляров наблюдались худшие показатели индексов VF и MD, более истонченный СНВС, более высокая распространенность фокального дефекта РМС и выпадение перипапиллярных глубоких слоев микроциркуляторного русла, чем в группе без CMvD [21].

В исследовании Kim J.A. изучалось влияние MvD на структурно-функциональные изменения в глазах с ПОУГ. Перипапиллярное выпадение микрососудистого русла оказалось связано с ухудшением функции оставшихся аксонов в глазах с ПОУГ [22].

Lee E.J. с соавт. сравнили характеристики MvD в глазах с неартериитной передней ишемической оптической нейропатией (NAION) и в глазах с ГНД. Факторами, связанными с различием NAION от ГНД, были площадь MvD и расположение относительно височной области. Клинические характеристики MvD различались между глазами с NAION и глазами с ГНД. Таким образом, ОКТ с ангиографией может обеспечить дополнительный подход к дифференциальной диагностике, прежде всего, ГНД от NAION [23].

Исследование Lee A. и соавт. 159 глаз с ПОУГ, разделенных на две группы по выпадению хориокапилляров в перипапиллярной зоне (67 с MvD и 92 без MvD) показало, что при наличии MvD выпадение хориокапилляров чаще наблюдалось в нижней полусфере перипапиллярной сетчатки (52 глаза, 77,6%). Авторы не выявили достоверной разницы в средних значениях VF и MD между группами. При сравнении параметров ОКТ и ОКТ с ангиографией в глазах с MvD СНВС и ГКС были значительно тоньше [24].

При сравнении MvD в глаукомных глазах с β -ППАХ и без β -зоны было обнаружено, что MvD имели сходные характеристики как при наличии, так и при отсутствии β -зоны. Клинические и структурные характеристики ДЗН, потенциально имеющие отношение к нарушению перфузии, зависели от присутствия MvD, а не от наличия β -ППА. [25]

Согласно данным Cheng W., при фокально ишемическом фенотипе ДЗН потеря плотности хориокапилляров выше на 7,85%, 10,89% и 8,88%, соответственно, по сравнению с миопическим, сенильным склеротическим и с фенотипом, характеризующийся общим расширением экскавации ДЗН. Это исследование заключалось в динамическом осмотре 96 глаз с ПОУГ в течение 2,5 лет. Многофакторная регрессия показала независимую связь между скоростью потери хориокапилляров и истончением СНВС [26].

Изменение хориокапиллярного кровотока в результате хирургии глаукомы

Наблюдения за 56 пациентами с ПОУГ показали, что спустя 3 месяца после синустрабекулэктомии на фоне снижения ВГД и уменьшения индекса кривизны РМС происходит значительное увеличение плотности капиллярной сети (VD) в РМС, но не в перипапиллярной сетчатке. Согласно данным однофакторного анализа увеличение VD в РМС было связано с большим процентным снижением ВГД ($P = 1/4\ 0,040$) и индекса кривизны РМС. Однако многофакторный анализ показал, что только снижение индекса РМС было значимым фактором, влияющим на увеличение VD в РМС [27].

Shin J.W. и соавт., изучив 31 глаз у 31 пациента с ПОУГ, выявили, что через 3 месяца после операции внутриглазное давление и глубина РМС значительно снизились: с $26,3 \pm 11,8$ мм рт.ст. до $12,5 \pm 3,6$ мм рт.ст. и с $501,1 \pm 130,2$ мкм до $455,8 \pm 112,7$ мкм, соответственно (везде $p < 0,001$). Улучшение состояния микрососудистого русла наблюдалось в 19 глазах. Максимальное снижение офтальмотонуса и глубины РМС было достоверно выше в глазах

с улучшенной микроциркуляцией в хориокапиллярах по сравнению с глазами, где положительная динамика отсутствовала ($p = 0,020$ и $p = 0,005$). Усиление хориокапиллярного кровотока было достоверно связано с максимальным снижением глубины РМС ($p = 0,026$). Авторы пришли к выводу, что синустрабекулэктомия может улучшить перипапиллярную микроциркуляцию сетчатки у пациентов с ПОУГ. Это открытие позволяет предположить, что уменьшение глубины РМС, вызванное снижением внутриглазного давления, может влиять на улучшение перипапиллярной микроциркуляции при ПОУГ [28].

Заключение

Исследование параметров хориокапиллярного кровотока и локальных выпадений перипапиллярных хориокапилляров предоставляет большой объем информации в диагностике и прогнозировании течения глаукомы. Дальнейшее развитие методов визуализации позволит наиболее подробно оценивать степень поражения сетчатки и ДЗН. Перспективы в этом плане связаны с проведением больших исследований в различных этнических группах с применением искусственного интеллекта.

Литература

1. Suh MH, Zangwill LM, Manalastas PI, et al. Deep Retinal Layer Microvasculature Dropout Detected by the Optical Coherence Tomography Angiography in Glaucoma. *Ophthalmology* 2016; 123(12):2509-2518. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2016.09.002>
2. Kwon JM, Weinreb RN, Zangwill LM, Suh MH. Parapapillary Deep-Layer Microvasculature Dropout and Visual Field Progression in Glaucoma. *Am J Ophthalmol* 2019; 200:65-75. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2018.12.007>
3. Rao HL, Srinivasan T, Pradhan ZS, et al. Optical Coherence Tomography Angiography and Visual Field Progression in Primary Angle Closure Glaucoma. *J Glaucoma* 2021; 30(3):e61-e67. <https://doi.org/10.1097/IJG.0000000000001745>
4. Lee SH, Kim TW, Lee EJ et al. Focal lamina cribrosa defects are not associated with steep lamina cribrosa curvature but with choroidal microvascular dropout. *Sci Rep* 2020; 10:6761. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63681-6>
5. Kwon JM, Weinreb RN, Zangwill LM, Suh MH. Juxtapapillary Deep-Layer Microvasculature Dropout and Retinal Nerve Fiber Layer Thinning in Glaucoma. *Am J Ophthalmol* 2021; 227:154-165. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2021.02.014>
6. Suh MH, Zangwill LM, Manalastas PIC, et al. Deep-Layer Microvasculature Dropout by Optical Coherence Tomography Angiography and Microstructure of Parapapillary Atrophy. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2018; 59(5):1995-2004. <https://doi.org/10.1167/iovs.17-23046>
7. Suh MH, Na JH, Zangwill LM, Weinreb RN. Deep-layer Microvasculature Dropout in Preperimetric Glaucoma Patients. *J Glaucoma* 2020; 29(6):423-428. <https://doi.org/10.1097/IJG.0000000000001489>
8. Shin JW, Jo YH, Song MK, Won HJ, Kook MS. Nocturnal blood pressure dip and parapapillary choroidal microvasculature dropout in normal-tension glaucoma. *Sci Rep* 2021; 11(1):206. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80705-3>
9. Lee EJ, Kim JA, Kim TW. Influence of Choroidal Microvasculature Dropout on the Rate of Glaucomatous Progression: A Prospective Study. *Ophthalmol Glaucoma* 2020; 3(1):25-31. <https://doi.org/10.1016/j.ogla.2019.10.001>
10. Kim JA, Lee EJ, Kim TW. Evaluation of Parapapillary Choroidal Microvasculature Dropout and Progressive Retinal Nerve Fiber Layer Thinning in Patients With Glaucoma. *JAMA Ophthalmol* 2019; 137(7):810-816. <https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2019.1212>

References

1. Suh MH, Zangwill LM, Manalastas PI, et al. Deep Retinal Layer Microvasculature Dropout Detected by the Optical Coherence Tomography Angiography in Glaucoma. *Ophthalmology* 2016; 123(12):2509-2518. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2016.09.002>
2. Kwon JM, Weinreb RN, Zangwill LM, Suh MH. Parapapillary Deep-Layer Microvasculature Dropout and Visual Field Progression in Glaucoma. *Am J Ophthalmol* 2019; 200:65-75. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2018.12.007>
3. Rao HL, Srinivasan T, Pradhan ZS, et al. Optical Coherence Tomography Angiography and Visual Field Progression in Primary Angle Closure Glaucoma. *J Glaucoma* 2021; 30(3):e61-e67. <https://doi.org/10.1097/IJG.0000000000001745>
4. Lee SH, Kim TW, Lee EJ et al. Focal lamina cribrosa defects are not associated with steep lamina cribrosa curvature but with choroidal microvascular dropout. *Sci Rep* 2020; 10:6761. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63681-6>
5. Kwon JM, Weinreb RN, Zangwill LM, Suh MH. Juxtapapillary Deep-Layer Microvasculature Dropout and Retinal Nerve Fiber Layer Thinning in Glaucoma. *Am J Ophthalmol* 2021; 227:154-165. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2021.02.014>
6. Suh MH, Zangwill LM, Manalastas PIC, et al. Deep-Layer Microvasculature Dropout by Optical Coherence Tomography Angiography and Microstructure of Parapapillary Atrophy. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2018; 59(5):1995-2004. <https://doi.org/10.1167/iovs.17-23046>
7. Suh MH, Na JH, Zangwill LM, Weinreb RN. Deep-layer Microvasculature Dropout in Preperimetric Glaucoma Patients. *J Glaucoma* 2020; 29(6):423-428. <https://doi.org/10.1097/IJG.0000000000001489>
8. Shin JW, Jo YH, Song MK, Won HJ, Kook MS. Nocturnal blood pressure dip and parapapillary choroidal microvasculature dropout in normal-tension glaucoma. *Sci Rep* 2021; 11(1):206. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80705-3>
9. Lee EJ, Kim JA, Kim TW. Influence of Choroidal Microvasculature Dropout on the Rate of Glaucomatous Progression: A Prospective Study. *Ophthalmol Glaucoma* 2020; 3(1):25-31. <https://doi.org/10.1016/j.ogla.2019.10.001>
10. Kim JA, Lee EJ, Kim TW. Evaluation of Parapapillary Choroidal Microvasculature Dropout and Progressive Retinal Nerve Fiber Layer Thinning in Patients With Glaucoma. *JAMA Ophthalmol* 2019; 137(7):810-816. <https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2019.1212>

11. Lin S, Cheng H, Zhang S, et al. Parapapillary Choroidal Microvasculature Dropout Is Associated With the Decrease in Retinal Nerve Fiber Layer Thickness: A Prospective Study. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2019; 60(2):838-842. <https://doi.org/10.1167/iovs.18-26115>
12. Jo YH, Shin JW, Song MK, Won HJ, Kook MS. Baseline Choroidal Microvasculature Dropout as a Predictor of Subsequent Visual Field Progression in Open-angle Glaucoma. *J Glaucoma* 2021; 30(8):672-681. <https://doi.org/10.1097/IJG.0000000000001853>
13. Yoon J, Lee A, Song WK et al. Association of superficial macular vessel density with visual field progression in open-angle glaucoma with central visual field damage. *Sci Rep* 2023; 13(1):7190. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34000-6>
14. Igarashi R, Ochiai S, Akagi T, et al. Parapapillary choroidal microvasculature dropout in eyes with primary open-angle glaucoma. *Sci Rep* 2023; 13(1):20601. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48102-8>
15. Micheletti E, Moghimi S, Nishida T, et al. Factors associated with choroidal microvascular dropout change. *Br J Ophthalmol* 2023; 107(10):1444-1451. <https://doi.org/10.1136/bjo-2022-321157>
16. Suh MH, Zangwill LM, Manalastas PI, et al. Optical Coherence Tomography Angiography Vessel Density in Glaucomatous Eyes with Focal Lamina Cribrosa Defects. *Ophthalmology* 2016; 123(11):2309-2317. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2016.07.023>
17. Курышева Н.И., Ким В.Ю., Ким В.Е., Лавер А.Б. Индекс кривизны решетчатой мембраны склеры и его связь с морфофункциональными и микроциркуляторными нарушениями при глаукоме. *Национальный журнал Глаукома* 2023; 22(3):15-25. <https://doi.org/10.53432/2078-4104-2023-22-3-15-25>
18. Курышева Н.И. Роль нарушений ретиальной микроциркуляции в прогрессировании глаукомной оптиконейропатии. *Вестник офтальмологии* 2020; 136(4):57-65. <https://doi.org/10.17116/oftalma202013604157>
19. Burgoyne CF, Downs JC. Premise and prediction-how optic nerve head biomechanics underlies the susceptibility and clinical behavior of the aged optic nerve head. *J Glaucoma* 2008; 17(4):318-328. <https://doi.org/10.1097/IJG.0b013e31815a343b>
20. Akagi T, Zangwill LM, Shoji T, et al. Optic disc microvasculature dropout in primary open-angle glaucoma measured with optical coherence tomography angiography. *PLoS One* 2018; 13(8):e0201729. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201729>
21. Lee JY, Shin JW, Song MK, Hong JW, Kook MS. An Increased Choroidal Microvasculature Dropout Size is Associated With Progressive Visual Field Loss in Open-Angle Glaucoma. *Am J Ophthalmol* 2021; 223:205-219. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2020.10.018>
22. Kim JA, Kim TW, Lee EJ, Girard MJA, Mari JM. Comparison of Lamina Cribrosa Morphology in Eyes with Ocular Hypertension and Normal-Tension Glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2020; 61(4):4. <https://doi.org/10.1167/iovs.61.4.4>
23. Lee EJ, Kee HJ, Park KA, Han JC, Kee C. Comparative Topographical Analysis of Choroidal Microvascular Dropout Between Glaucoma and Nonarteritic Anterior Ischemic Optic Neuropathy. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2021; 62(13):27. <https://doi.org/10.1167/iovs.62.13.27>
24. Lee A, Shin JW, Lee JY, Baek MS, Kook MS. Vasculature-function relationship in open-angle glaucomatous eyes with a choroidal microvasculature dropout [published correction appears in *Sci Rep*. 2023; 13(1):915]. *Sci Rep* 2022; 12(1):19507. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23109-9>
25. Lee EJ, Song JE, Hwang HS, Kim JA, Lee SH, Kim TW. Choroidal Microvasculature Dropout in the Absence of Parapapillary Atrophy in POAG. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2023; 64(3):21. <https://doi.org/10.1167/iovs.64.3.21>
26. Cheng W, Song Y, Li F, et al. Longitudinal Choriocapillaris Vascular Density Changes in Different Types of Primary Open-Angle Glaucoma. *Transl Vis Sci Technol* 2023; 12(1):21. <https://doi.org/10.1167/tvst.12.1.21>
27. Kim JA, Kim TW, Lee EJ, Girard MJA, Mari JM. Microvascular Changes in Peripapillary and Optic Nerve Head Tissues After Trabeculectomy in Primary Open-Angle Glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2018; 59(11):4614-4621. <https://doi.org/10.1167/iovs.18-25038>
28. Shin JW, Sung KR, Uhm KB, et al. Peripapillary Microvascular Improvement and Lamina Cribrosa Depth Reduction After Trabeculectomy in Primary Open-Angle Glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2017; 58(13):5993-5999. <https://doi.org/10.1167/iovs.17-22787>
11. Lin S, Cheng H, Zhang S, et al. Parapapillary Choroidal Microvasculature Dropout Is Associated With the Decrease in Retinal Nerve Fiber Layer Thickness: A Prospective Study. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2019; 60(2):838-842. <https://doi.org/10.1167/iovs.18-26115>
12. Jo YH, Shin JW, Song MK, Won HJ, Kook MS. Baseline Choroidal Microvasculature Dropout as a Predictor of Subsequent Visual Field Progression in Open-angle Glaucoma. *J Glaucoma* 2021; 30(8):672-681. <https://doi.org/10.1097/IJG.0000000000001853>
13. Yoon J, Lee A, Song WK et al. Association of superficial macular vessel density with visual field progression in open-angle glaucoma with central visual field damage. *Sci Rep* 2023; 13(1):7190. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34000-6>
14. Igarashi R, Ochiai S, Akagi T, et al. Parapapillary choroidal microvasculature dropout in eyes with primary open-angle glaucoma. *Sci Rep* 2023; 13(1):20601. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48102-8>
15. Micheletti E, Moghimi S, Nishida T, et al. Factors associated with choroidal microvascular dropout change. *Br J Ophthalmol* 2023; 107(10):1444-1451. <https://doi.org/10.1136/bjo-2022-321157>
16. Suh MH, Zangwill LM, Manalastas PI, et al. Optical Coherence Tomography Angiography Vessel Density in Glaucomatous Eyes with Focal Lamina Cribrosa Defects. *Ophthalmology* 2016; 123(11):2309-2317. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2016.07.023>
17. Kurysheva N.I., Kim V.Yu., Kim V.E., Laver A.B. Lamina cribrosa curvature index and its relationship with morphofunctional and microcirculatory disorders in glaucoma. *National Journal glaucoma* 2023; 22(3):15-25. <https://doi.org/10.53432/2078-4104-2023-22-3-15-25>
18. Kurysheva NI. The role of retinal microcirculation disorders in the progression of glaucomatous optic neuropathy. *Russian Annals of Ophthalmology* 2020; 136(4):57-65. <https://doi.org/10.17116/oftalma202013604157>
19. Burgoyne CF, Downs JC. Premise and prediction-how optic nerve head biomechanics underlies the susceptibility and clinical behavior of the aged optic nerve head. *J Glaucoma* 2008; 17(4):318-328. <https://doi.org/10.1097/IJG.0b013e31815a343b>
20. Akagi T, Zangwill LM, Shoji T, et al. Optic disc microvasculature dropout in primary open-angle glaucoma measured with optical coherence tomography angiography. *PLoS One* 2018; 13(8):e0201729. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201729>
21. Lee JY, Shin JW, Song MK, Hong JW, Kook MS. An Increased Choroidal Microvasculature Dropout Size is Associated With Progressive Visual Field Loss in Open-Angle Glaucoma. *Am J Ophthalmol* 2021; 223:205-219. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2020.10.018>
22. Kim JA, Kim TW, Lee EJ, Girard MJA, Mari JM. Comparison of Lamina Cribrosa Morphology in Eyes with Ocular Hypertension and Normal-Tension Glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2020; 61(4):4. <https://doi.org/10.1167/iovs.61.4.4>
23. Lee EJ, Kee HJ, Park KA, Han JC, Kee C. Comparative Topographical Analysis of Choroidal Microvascular Dropout Between Glaucoma and Nonarteritic Anterior Ischemic Optic Neuropathy. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2021; 62(13):27. <https://doi.org/10.1167/iovs.62.13.27>
24. Lee A, Shin JW, Lee JY, Baek MS, Kook MS. Vasculature-function relationship in open-angle glaucomatous eyes with a choroidal microvasculature dropout [published correction appears in *Sci Rep*. 2023; 13(1):915]. *Sci Rep* 2022; 12(1):19507. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23109-9>
25. Lee EJ, Song JE, Hwang HS, Kim JA, Lee SH, Kim TW. Choroidal Microvasculature Dropout in the Absence of Parapapillary Atrophy in POAG. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2023; 64(3):21. <https://doi.org/10.1167/iovs.64.3.21>
26. Cheng W, Song Y, Li F, et al. Longitudinal Choriocapillaris Vascular Density Changes in Different Types of Primary Open-Angle Glaucoma. *Transl Vis Sci Technol* 2023; 12(1):21. <https://doi.org/10.1167/tvst.12.1.21>
27. Kim JA, Kim TW, Lee EJ, Girard MJA, Mari JM. Microvascular Changes in Peripapillary and Optic Nerve Head Tissues After Trabeculectomy in Primary Open-Angle Glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2018; 59(11):4614-4621. <https://doi.org/10.1167/iovs.18-25038>
28. Shin JW, Sung KR, Uhm KB, et al. Peripapillary Microvascular Improvement and Lamina Cribrosa Depth Reduction After Trabeculectomy in Primary Open-Angle Glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2017; 58(13):5993-5999. <https://doi.org/10.1167/iovs.17-22787>