



Научная статья

УДК 617.715:617.7-007.681

DOI: <https://doi.org/10.25276/2410-1257-2022-2-60-66>

Исследование решетчатой мембраны склеры при глаукоме

Н.И. Курышева¹⁻³, В.Ю. Ким^{1, 2}

¹Медико-биологический университет инноваций и непрерывного образования ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

²Федеральный биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

³Академия постдипломного образования ФГБУ ФНКЦ ФМБА России, Москва

РЕФЕРАТ

Основные повреждения при глаукоме начинаются на уровне склеры, где аксоны ганглиозных клеток сетчатки, формирующие волокна зрительного нерва, и ретинальные сосуды проходят через сеть из соединительной ткани, называемой решетчатой мембраной склеры (РМС). Современные методы диагностики, такие как оптическая когерентная томография, особенно SD-ОСТ и Swept-ОСТ (SS-ОСТ), позволяют визуализировать РМС и определять кровотоки в ней, открывая новые возможности диагностики глаукомы. В обзоре представлены сведения об анатомии и кровоснабжении РМС, а также последние данные об исследовании указанных структур методами оптической когерентной томографии.

Ключевые слова: первичная открытоугольная глаукома, решетчатая мембрана склеры, глазной кровотоки, оптическая когерентная томография, давление спинномозговой жидкости

Для цитирования: Курышева Н.И., Ким В.Ю. Исследование решетчатой мембраны склеры при глаукоме. Точка зрения. Восток – Запад. 2022;2: 60–66. <https://doi.org/10.25276/2410-1257-2022-2-60-66>

Автор, ответственный за переписку: Виталий Юрьевич Ким, kim_vitality@mail.ru

Original article

Examination of lamina cribrosa in glaucoma

N.I. Kuryшева¹⁻³, V.Yu. Kim^{1, 2}

¹Medical Biological University of Innovations and Continuing Education, Burnazyan Federal Biophysical Center, Federal Medical and Biological Agency, Moscow, Russian Federation

²Ophthalmological Center, Burnazyan Federal Biophysical Center, Federal Medical and Biological Agency, Moscow, Russian Federation

³Institute of Advanced Training, Federal Medical and Biological Agency, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

The main damage in glaucoma starts at the level of the sclera, where the axons of the retinal ganglion cells forming the optic nerve fibers and retinal vessels pass through a network of connective tissue called the lamina cribrosa (LC). Modern diagnostic methods, such as optical coherence tomography, especially SD-OCT and Swept-OCT (SS-OCT), make it possible to visualize LC and determine blood flow in it, opening up new possibilities for the diagnosis of glaucoma. The review provides information about the anatomy and blood supply of the LC, as well as the latest data on the study of these structures by optical coherence tomography.

Key words: primary open-angle glaucoma, lamina cribrosa, ocular blood flow, swept-source optical coherence tomography, pressure of cerebrospinal fluid

For quoting: Kuryшева N.I., Kim V.Yu. Examination of lamina cribrosa in glaucoma. Point of view. East – West. 2022;2: 60–66. <https://doi.org/10.25276/2410-1257-2022-2-60-66>

Corresponding author: Vitaly Yu. Kim, kim_vitality@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

Глаукома является ведущей причиной необратимой слепоты. В 2017 г. во всем мире было 57,5 млн пациентов с диагнозом «открытоугольная глаукома», ожидается, что к 2040 г. число больных достигнет 111 млн человек [1].

Основным повреждающим фактором для структур глаза при глаукоме выступает повышенное внутриглазное давление (ВГД), что влечет за собой повреждение различных структур, включая аксоны ганглиозных клеток сетчатки, волокна зрительного нерва (ЗН) и ретинальные сосуды. Основные повреждения возникают на уровне склеры, где данные структуры проходят через

специальную сеть из соединительной ткани, называемую решетчатой мембраной склеры (РМС) [2].

Современные методы диагностики, такие как оптическая когерентная томография, особенно Swep-OCT (SS-OCT), позволяют визуализировать РМС, открывая новые возможности диагностики глаукомы.

Анатомия, кровоснабжение и патофизиология решетчатой мембраны склеры

РМС является структурой задней поверхности склеры, через которую проходят демиелинизированные аксоны ганглиозных клеток, формирующие впоследствии волокна ЗН. Через образованные каналы также проходят капилляры, обеспечивающие трофическую поддержку как аксонам, так и самой РМС (рис. 1). Толщина последней в 4–5 раз меньше, чем толщина остальной склеры в заднем полюсе глазного яблока [3]. Известно, что РМС является наиболее уязвимым местом к воздействию повышенного ВГД. Под его влиянием происходят прогиб и деформация РМС, что, в свою очередь, вызывает повреждение находящихся здесь капилляров и аксонов. В итоге развивается ишемический инсульт аксонов, приводящий к их апоптозу и последующей гибели [3–6]. Следует подчеркнуть, что нарушения кровотока в капиллярах РМС также ослабляют ее собственные структуры. Решетчатая часть ЗН получает питание из ветвей задних коротких цилиарных артерий либо напрямую, либо из круга Цинна–Галлера, если он присутствует.

В кровоснабжении этого отдела не участвует ни центральная артерия сетчатки, ни ее ветви [7].

Следует подчеркнуть, что для задних цилиарных артерий (ЗЦА), кровоснабжающих РМС, характерна одна важная особенность: наличие зон водораздела между их ветвями. ЗЦА и их ветви – это конечные артерии. Когда ткань питается двумя или более конечными/концевыми артериями, граница между территориями, кровоснабжаемыми ими, называется «зоной водораздела». Зоны водораздела между различными мозговыми артериями хорошо известны. Однако наличие этих зон между ЗЦА подчас недооценивается офтальмологами. Значимость зон водораздела состоит в том, что в случае падения перфузионного давления в сосудистом ложе одной или более концевых артерий, зона водораздела, которая является областью сравнительно слабой васкуляризации, оказывается наиболее уязвимой для ишемии. Этот феномен хорошо известен в неврологии при развитии инфарктов зон водораздела коры головного мозга.

Если количество ветвей ЗЦА больше одной, то между кровоснабжаемыми ими отделами могут быть зоны, которые при определенных ситуациях перестают получать кровь. Самая типичная из этих ситуаций – значительное падение артериального давления, например, на фоне приема антигипертензивных препаратов или повышение ВГД, как при глаукоме. В результате возникают зоны ишемии в РМС и проходящих через нее аксонах, что в дальнейшем приводит к атрофии ее нервных волокон, дистрофии [7].

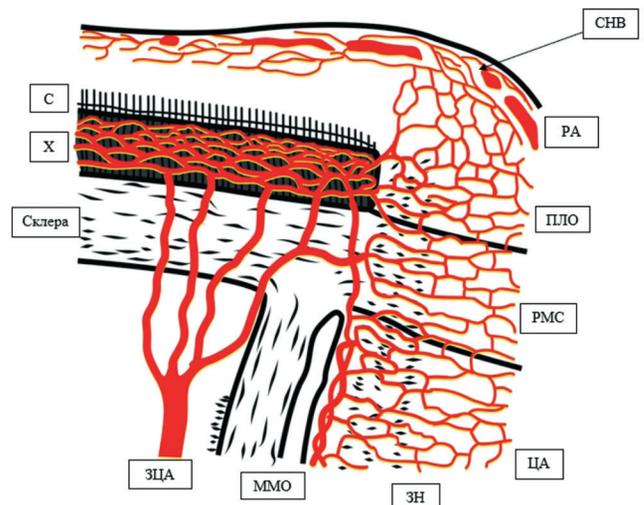


Рис. 1. ЦАС – центральная артерия сетчатки; X – хориоидея; РМС – решетчатая мембрана склеры; СНВС – слой нервных волокон; ЗН – зрительный нерв; ММО – мягкая мозговая оболочка; ЗЦА – задние цилиарные артерии; ПЛО – преламинарный отдел; С – сетчатка; РА – ретинальные артерии (Hayreh, 1974)

Fig. 1. ЦАС – central retinal artery; X – choroid; РМС – sieve-like membrane of the sclera; СНВС – nerve fibre layer; ЗН – optic nerve; ММО – pia mater; ЗЦА – posterior ciliary artery; ПЛО – prelaminar region; С – retina; РА – retinal arteries (Hayreh, 1974)

Особого внимания заслуживает связь между дегенерацией РМС и ее кровотоком. С появлением оптической когерентной томографии (ОКТ) у врачей появилась возможность исследовать хориоидею глаза, оценить кровоток и сопоставить результаты исследования кровотока глаза вместе с патологическими проявлениями в сетчатке или диске ЗН [8]. Применив метод цветового доплеровского картирования, авторы установили, что нарушение глазного кровотока связано с деформацией решетчатой мембраны, но только при глаукоме. У здоровых пациентов данной связи не обнаружено [9]. В то же время, по-видимому, существует связь между уменьшением плотности сосудов в РМС и целостностью ее структуры. Было показано, что грубые структурные нарушения РМС являются непосредственной причиной потери плотности сосудов при исследовании глазного дна на ангио-ОКТ [10].

По данным литературы, с возрастом в РМС происходят необратимые структурные и биохимические изменения, в частности: увеличение коллагеновых волокон I, II и III типов, что способствует снижению эластичности и увеличению жесткости РМС. Данные изменения ведут за собой увеличение напряжения в области РМС при нормальных колебаниях ВГД. Вследствие повышенного механического напряжения в области РМС происходят активация астроцитов и увеличение синтеза коллагеназы, направленной на повышение эластичности РМС [11].

Отмечается, что с возрастом эластичность РМС снижается. Коллаген II типа замещается на коллагены I и IV типа, обеспечивающие прочность. Однако данный процесс не повышает сопротивляемость мембраны нагрузкам, а делает ее еще более уязвимой к воздействию ВГД и интракраниального давления [11].

Также было замечено, что повышение ВГД приводит к повышению экспрессии эластина в астроцитах решетчатой мембраны. Данные клетки, даже под влиянием относительно небольшого повышения давления, начинают активнее вырабатывать эластин с измененными свойствами, что приводит к потере эластичности РМС и повышению степени ее деформации [12].

Группа корейских ученых обнаружила связь между снижением толщины РМС и когнитивными расстройствами. Авторы считают, что данный параметр РМС можно использовать как маркер оценки прогрессирования таких заболеваний, как болезнь Альцгеймера [13].

Исследование решетчатой мембраны склеры методом оптической когерентной томографии

Впервые появившийся в клинической практике в 2012 г. ОКТ с режимом Swept-source позволил получать данные быстрее и измерять более глубокие слои, чем предыдущие аналоги томографов. Скорость сканирования в приборах с Swept-source вдвое выше, чем у устройств SD-OCT (100 000 А-сканирований в секунду по сравнению с 50 000 А-сканирований в секунду), благодаря чему становится возможным быстрее получать В-сканы и исследовать широкое поле при В-сканировании (12 мм против 6–9 мм при стандартной SD-OCT), а также получать более точное трехмерное изображение стекловидного тела, сетчатки и хориоидеи. Помимо этого, данный метод позволил визуализировать структуры сосудистой оболочки, стекловидного тела и сетчатки за плотными преретинальными кровоизлияниями. Swept-source OCT положительно повлияла и внесла огромный вклад в исследования структур глазного яблока [14].

До недавнего времени единственным способом исследования РМС было применение гистологических методов [15]. Это осуществлялось *ex vivo* на донорских глазах, когда оценивались, например, напряжение и упругость мембраны [16]. Однако развитие в сфере ОКТ с режимом увеличенной глубины обеспечивает более детальную визуализацию. Некоторым авторам удавалось оценить ее глубину, толщину и угол ее наклона [17].

Толщина, глубина и индекс кривизны решетчатой мембраны склеры как важные биомаркеры глаукомного поражения

ОКТ открыла новые перспективы в изучении биомеханических свойств решетчатой мембраны, позволяя проследить, как они изменяются под воздействием разных факторов. Так, появилась возможность измерить глубину РМС (расстояние от внешней поверхности решетчатой мембраны до плоскости открытия мембраны

Бруха), индекс кривизны решетчатой мембраны (рис. 2), ее форму, толщину, дефекты в структуре самой мембраны, морфологию пор [17, 18].

Толщина РМС – один из первых показателей, на который обращают внимание при проведении ОКТ-исследования. В норме толщина мембраны может варьировать от 119 до 463 мкм. В исследовании решетчатой мембраны среди здорового китайского населения было отмечено, что толщина центральной зоны РМС уменьшается с возрастом пациента [4]. Однако многие исследования показывают, что глаза с меньшей толщиной мембраны более чувствительны к воздействию повышенного ВГД [19, 20].

Так, исследователи [19] сравнили толщину РМС у пациентов с открыто- и закрытоугольной глаукомой (ЗУГ). По их результатам среднее значение толщины у глаукомных пациентов было ниже, чем в контрольной группе: средняя толщина в контрольной группе – 290,75 мкм, при первичной открытоугольной глаукомой (ПОУГ) – 257,17 мкм, а при первичной ЗУГ – 226,99 мкм).

Другая группа исследователей проверяла данные толщины у пациентов с псевдоэксфолиативной глаукомой (ПЭГ) и пришла к выводу, что снижение толщины РМС является ранним признаком прогрессирования данной формы глаукомы [20]. При сравнении индекса кривизны РМС у пациентов с ПОУГ и с ПЭГ было установлено, что средние значения этого показателя при последней были выше, чем при ПОУГ [21].

Индекс кривизны решетчатой мембраны является показателем деформации и изменения положения решетчатой мембраны по отношению к плоскости мембраны Бруха. Глубина кривизны РМС определяется как расстояние от внешней поверхности решетчатой мембраны до плоскости открытия мембраны Бруха. Индекс кривизны РМС рассчитывается по формуле:

$$(В/ГКРМС) \times 100,$$

где ГКРМС – глубины прогиба решетчатой мембраны (рис. 2).

Согласно данным корейского исследования, индекс кривизны решетчатой мембраны, исследованный авторами на 284 глазах здоровых лиц, имеет среднее значение – $7,46 \pm 1,22$ [22].

В течение последних лет было сформировано множество моделей, при помощи которых авторы пытаются объяснить и предсказать возникновение деформаций в РМС под влиянием давления либо предлагают новые модели, основанные на жесткости тканей решетчатой мембраны [15].

Другое исследование [24] также было направлено на изучение индекса кривизны и глубины решетчатой мембраны у пациентов с ПОУГ. Исследовав 77 глаз с ПОУГ и 77 глаз контрольной группы, авторы подтвердили, что индекс кривизны позволяет наиболее четко дифференцировать здоровые глаза от глаз с ПОУГ. Было отмечено, что у мужчин с диагнозом ПОУГ средние значения индекса и глубины были больше, чем у женщин [23]. Дан-

ные показали прямую корреляцию между индексом кривизны решетчатой мембраны и снижением светочувствительности сетчатки по данным периметрии у пациентов с ПОУГ.

Корейскими исследователями получены данные, демонстрирующие диагностическую эффективность определения глубины решетчатой мембраны и индекса ее кривизны при дифференцировке глаукомы нормального давления (ГНД) и аутосомно-доминантной оптической атрофии. Показатели глубины РМС и индекса кривизны были больше у пациентов с ГНД [25]. В то же время оказалось, что при ГНД толщина РМС была меньше, а ее деформация более выражена по сравнению с ПОУГ с высоким ВГД. При этом важно, что при высоком ВГД толщина РМС и ее деформация не отличались от аналогичных показателей в норме [26].

В исследовании, проведенном Л. Арутюняном и соавт., сравнивалась глубина РМС у пациентов с разными стадиями ПОУГ. Авторы не заметили статистически достоверной разницы между контрольной группой и пациентами с начальной и развитой стадиями глаукомы. Однако, начиная с далеко зашедшей стадии, были обнаружены достоверные отличия с контролем, а именно существенное увеличение глубины РМС [5]. При этом толщина преламеллярного слоя нервных волокон была достоверно снижена по сравнению с контролем уже в начальную стадию заболевания, что совпадает с другими данными [8].

Результаты наблюдения за больными глаукомой (114 глаз) в течение 2,5 года показали, что чем сильнее изменена морфологическая структура решетчатой мембраны, а именно ее толщина и кривизна, тем быстрее происходит истончение слоя нервных волокон. Показатель индекса кривизны, по сравнению с параметром толщины решетчатой мембраны, является лучшим маркером истончения слоя нервных волокон сетчатки, а следовательно, и определения прогрессирования глаукомы [29].

Решетчатая мембрана склеры и трансламинарное давление

Не стоит забывать, что ВГД – не единственная сила, влияющая на решетчатую мембрану. Цереброспинальная жидкость и внутричерепное давление также оказывают действие на РМС. Была предложена версия, согласно которой низкое внутричерепное давление и давление цереброспинальной жидкости с ретроламинарной стороны могут быть причиной возникновения таких же механических изменений и повреждений, как при ПОУГ, но с нормальными цифрами ВГД [30, 31]. Однако в большинстве клинических исследований по этому вопросу была небольшая группа пациентов, что могло повлиять на результаты [30, 31]. До сих пор не существует точных данных о силе давления со стороны цереброспинальной жидкости в орбитальной области (все данные были получены при исследовании люмбальной области). Кроме того, ВГД и цереброспинальное давление изменяют-

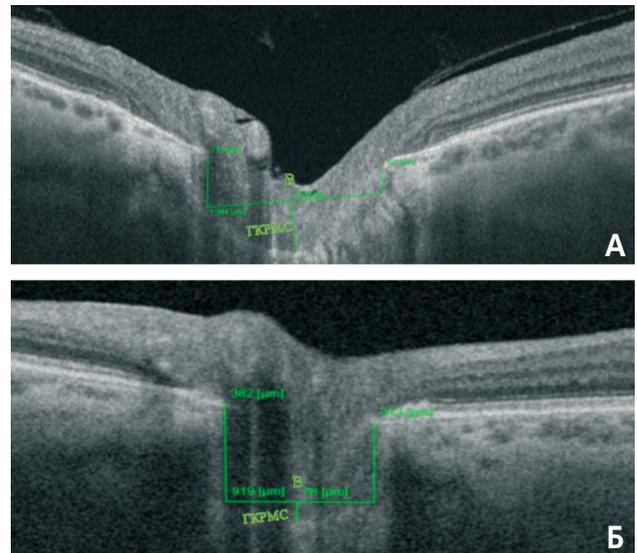


Рис. 2. Определение глубины и кривизны РМС: собственные примеры сканирования РМС больного с начальной стадией глаукомы (А) и здорового обследуемого того же возраста (Б). Глубина прогиба решетчатой мембраны (ГКРМС) на рисунке «Б» значительно меньше, что говорит о нормальной структуре РМС. Сканирование производилось на томографе DRI OCT Triton (Торсон, Япония). На скане показаны две линии, проведенные от каждой точки окончания мембраны Бруха (МБ) с носовой и височной стороны перпендикулярно контрольной линии (линия, соединяющая височный и носовой конец экскавации диска ЗН, на рисунке показана сплошной зеленой линией) до тех пор, пока они не соприкоснутся с передней поверхностью решетчатой мембраны. Линия, соединяющая две точки на передней поверхности решетчатой мембраны (Б), используется в качестве контрольной для измерения глубины прогиба решетчатой мембраны

Fig. 2. Depth and curve determination of the scleral sieve-like membrane: personal examples of membrane scanning of a patient with initial glaucoma (A) and a healthy person of the same age (B). The depth of deflection in the sieve-like membrane (ГКРМС) is much less in figure «Б», which indicates the normal structure of the sieve-like membrane. Scanning was performed on DRI OCT Triton tomograph (Topcon, Japan). The scan shows two lines drawn from each end point of Bruch's membrane from the nasal and temporal sides perpendicular to the control line (the solid green line shows the line connecting the temporal and nasal ends of the optic nerve excavation) until they come into contact with the front surface of the sieve-like membrane. A line connecting two points on the front surface of the sieve-like membrane (Б) is used as a reference to measure the depth and deflection of the membrane

ся в зависимости от циркадного ритма, что затрудняет расчет трансмембранного давления и оценку состояния мембраны и проходящих через нее аксонов [30, 31].

Следует, кроме того, обратить внимание на другие параметры РМС, в частности – количество дефектов в ней, которые также могут быть изучены методом ОКТ. В одном из корейских исследований был проведен сравнительный анализ глаз с миопией в сочетании с ПОУГ и без данного заболевания. В группу пациентов с миопией входили глаза –2,0 дптр и выше, а также с аксиаль-

ной длиной глаза больше 24,0 мм. Результаты показали, что при сочетании миопии с ПОУТ количество дефектов РМС достоверно превышало таковое в миопических глазах без глаукомы [32].

Все вышесказанное позволяет утверждать, что повышение глубины РМС является признаком развития глаукомной оптической нейропатии. Есть основания предполагать, что данный параметр имеет ценность и в плане оценки эффективности проводимой гипотензивной терапии. Так, было показано, что уменьшение глубины РМС после проведения трабекулэктомии у пациентов с ПОУТ на фоне миопии является хорошим признаком приостановки и замедления прогрессирования глаукомы [33].

Сравнивая глаза с одной и той же стадией глаукомы, но отличающиеся наличием или отсутствием локальных дефектов в решетчатой мембране склеры (ЛК-РМС), исследователи из Калифорнии пришли к выводу, что глаза с ЛК-РМС характеризовались более низкой плотностью капилляров в радиальном плексусе головки ЗН и в нижне-височном секторе перипапиллярной сетчатки [34], а также более существенным фокальным дефектом ганглиозного слоя сетчатки [35].

Данные о наличии и местоположении дефектов решетчатой РМС могут предсказать дальнейшую потерю слоя нервных волокон сетчатки (СНВС) у пациентов с глаукомой, являясь, таким образом, предиктором прогрессирования заболевания. Речь идет о деформации пор РМС, изменении ее структуры и уменьшении толщины [26]. Было показано, что оценка указанных параметров особенно важна с точки зрения мониторинга ГНД [27].

Перспективы

Перспективы в изучении РМС связаны с внедрением в клиническую практику систем, связанных с углубленным обучением (DL)* и искусственным интеллектом (ИИ). Достижения в области ИИ могут сделать это возможным. Углубленное обучение как составляющая ИИ использует компьютерную нейронную сеть, которая может обучаться на большой базе данных для обнаружения конкретной патологии. Это поможет более точно визуализировать мембрану Бруха и переднюю поверхность РМС [36]. Недавние исследования показали, что система ИИ способна лучше распознавать патологические изменения в диске ЗН, перипапиллярной сетчатке, склере, хориоидее, ретинальном пигментном эпителии и РМС, чем врач-эксперт.

* DL – «Deep learning» (углубленное обучение) – компьютерная технология, одно из направлений в области машинного обучения, посредством которого анализируются обширные базы данных и сравниваются с условным эталоном. Поскольку большинство диагностических технологий в офтальмологии предоставляют клиницисту дополнительную информацию посредством цифрового анализа структур глаза, это делает область офтальмологии идеально подходящей для использования алгоритмов DL.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование параметров и морфометрических свойств решетчатой мембраны склеры предоставляет большой объем информации в диагностике и прогнозировании течения глаукомы. Дальнейшее развитие методов визуализации данной структуры позволит наиболее подробно оценивать степень поражения глаза пациента, а также эффективность гипотензивной терапии. Перспективы в этом плане связаны с проведением больших исследований в различных этнических группах с применением искусственного интеллекта.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Allison K, Patel D, Alabi O. Epidemiology of Glaucoma: The Past, Present, and Predictions for the Future. *Cureus*. 2020;12(11): e11686. doi: 10.7759/cureus.11686
- Kharmyssov C, Abdildin YG, Kostas KV. Optic nerve head damage relation to intracranial pressure and corneal properties of eye in glaucoma risk assessment. *Med Biol Eng Comput*. 2019;57(7): 1591–1603. doi: 10.1007/s11517-019-01983-2
- Quigley HA, Earl M, Richard G, Maumenee AE. Optic Nerve Damage in Human Glaucoma. *Arch Ophthalmol*. 1981;99(4): 635-649. doi: 10.1001/archoph.1981.03930010635009
- Luo H, Yang H, Gardiner SK, et al. Factors Influencing Central Lamina Cribrosa Depth: A Multicenter Study. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2018;59(6): 2357–2370. doi: 10.1167/iovs.17-23456
- Арутюнян Л.Л., Анисимова С.Ю., Морозова Ю.С., Анисимов С.И. Биометрические и морфометрические параметры решетчатой пластинки у пациентов с разными стадиями первичной открытоугольной глаукомы. *Национальный журнал глаукома*. 2021;20(3):11–19. [Arutyunyan LL, Anisimova SYu, Morozova YuS, Anisimov SI. Biometric and morphometric parameters of the lamina cribrosa in patients with different stages of primary open-angle glaucoma. *National Journal of Glaucoma*. 2021;20(3): 11–19. (In Russ.)] doi: 10.25700/2078-4104-2021-20-3-11-19
- Xiao H, Xu X-Y, Zhong Y-M, Liu X. Age related changes of the central lamina cribrosa thickness, depth and prelaminar tissue in healthy Chinese subjects. *Int J Ophthalmol*. 2018;11(11): 1842–1847. doi: 10.18240/ijo.2018.11.17
- Курышева Н.И. Роль нарушений ретинальной микроциркуляции в прогрессировании глаукомной оптиконейропатии. *Вестник офтальмологии*. 2020;136(4): 57–65. [Kuryshva NI. The role of retinal microcirculation disorders in the progression of glaucomatous optic neuropathy. *Vestnik Oftalmologii*. 2020;136(4): 57–65. (In Russ.)] doi: 10.17116/oftalma202013604157
- Курышева Н.И. Монография. Гемоперфузия глаза и глаукома. Авторский тираж. 2014. [Kuryshva NI. Monography. Hemoperfusion of eye and glaucoma. Author's edition. 2014. (In Russ.)]
- Park H-YL, Shin DY, Jeon SJ, et al. Predicting the development of normal tension glaucoma and related risk factors in normal

- tension glaucoma suspects. *Sci Rep.* 2021;17(1): 16697. doi: 10.1038/s41598-021-95984-7
10. Lee SH, Kim T-W, 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. doi: 10.1038/s41598-020-63681-6
 11. Куренков В.В., Клюганов В.С., Кузнецова Н.В. и др. Визуализация решетчатой пластинки склеры с помощью оптической когерентной томографии. Возможности и перспективы диагностики. *Обзор. Офтальмология.* 2019;16(2): 159–162. [Kurenkov VV, Klyuganov VS, Kuznetsova NV, et al. Visualization of the Lamina Cribrosa of Sclera Using Optical Coherence Tomography. The Opportunities and Prospects for Diagnostics (Review). *Ophthalmology in Russia.* 2019;16(2): 159–162. (In Russ.)] doi: 10.18008/1816-5095-2019-2-159-162
 12. Hernandez MR, Pena JDO, Selvidge JA, et al. Hydrostatic pressure stimulates synthesis of elastin in cultured optic nerve head astrocytes. *Glia.* 2000;32(2): 122–136. doi: 10.1002/1098-1136(200011)32:2<122::aid-glia20>3.0.co;2-j
 13. Lee SH, Han JW, Lee EJ, et al. Cognitive Impairment and Lamina Cribrosa Thickness in Primary Open-Angle Glaucoma. *Translational Vision Science & Technology.* 2020;9: 17. doi: 10.1167/tvst.9.7.17
 14. Jonas JB, Berenshtein E, Holbach L. Lamina Cribrosa Thickness and Spatial Relationships between Intraocular Space and Cerebrospinal Fluid Space in Highly Myopic Eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2004;45(8): 2660–2665. doi: 10.1167/iovs.03-1363
 15. Karimi A, Rahmati SM, Grytz RG, et al. Modeling the biomechanics of the lamina cribrosa microstructure in the human eye. *Acta Biom.* 2021;15(134): 357–378. doi: 10.1016/j.actbio.2021.07.010
 16. Midgett D, Liu B, Ling YTT, et al. The Effects of Glaucoma on the Pressure-Induced Strain Response of the Human Lamina Cribrosa. *Investigative Ophthalmology & Visual Science.* 2020;61: 41. doi: 10.1167/iovs.61.4.41
 17. Kim YW, Jeoung JW, Kim YK, Park KH. Clinical Implications of In Vivo Lamina Cribrosa Imaging in Glaucoma. *J Glaucoma.* 2017;26(9): 753–761. doi: 10.1097/IJG.0000000000000728
 18. Киселева О.А., Иомдина Е.Н., Якубова Л.В., Хозиев Д.Д., Решетчатая пластинка склеры при глаукоме: биомеханические особенности и возможности их клинического контроля. *Российский офтальмологический журнал.* 2018;3: 76–83. [Kiseleva OA, Iomdina EN, Yakubova LV, Khoziev DD. Lamina cribrosa in glaucoma: biomechanical properties and possibilities of their clinical control. *Russian ophthalmological journal.* 2018;11(3): 76–83. (In Russ.)] doi: 10.21516/2072-0076-2018-11-3-76-83
 19. Liang Q, Wang L, Liu X. Mechanism study of trans-lamina cribrosa pressure difference correlated to optic neuropathy in individuals with glaucoma. *Sci China Life Sci.* 2020;63(1): 148–151. doi: 10.1007/s11427-018-9553-7
 20. Moghimi S, Nekoozadeh S, Motamed-Gorji N, et al. Lamina cribrosa and choroid features and their relationship to stage of pseudoexfoliation glaucoma. *Investigative Ophthalmology & Visual Science.* 2018;59: 5355–5365. doi: 10.1167/iovs.18-25035
 21. Won HJ, Sung KR, Shin JW, et al. Comparison of Lamina Cribrosa Curvature in Pseudoexfoliation and Primary Open-Angle Glaucoma. *Am J Ophthalmol.* 2021;223: 1–8. doi: 10.1016/j.ajo.2020.09.028
 22. Lee SH, Kim T-W, Lee EJ, et al. Lamina Cribrosa Curvature in Healthy Korean Eyes *Sci Rep.* 2019; 9: 1756. doi: 10.1038/s41598-018-38331-7
 23. Lee SH, Kim TW, Lee EJ, et al. Diagnostic power of lamina cribrosa depth and curvature in glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2017; 58(2): 755–762. doi: 10.1167/iovs.16-20802
 24. Ha A, Kim TJ, Girard MJA, et al. Baseline Lamina Cribrosa Curvature and Subsequent Visual Field Progression Rate in Primary Open-Angle Glaucoma. *Ophthalmology.* 2018;125(12): 1898–1906. doi: 10.1016/j.ophtha.2018.05.017
 25. Kim GN, Kim JA, Kim MJ, et al. Comparison of lamina cribrosa morphology in normal tension glaucoma and autosomal-dominant optic atrophy. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2020;61(5): 9. doi: 10.1167/iovs.61.5.9
 26. Kim JA, Kim TW, Lee EJ, et al. Comparison of lamina cribrosa morphology in eyes with ocular hypertension and normal-tension glaucoma. *Investigative Ophthalmology & Visual Science.* April 2020;61: 4. doi: 10.1167/iovs.61.4.4
 27. Moghimi S, Zangwill LM, Manalastas PIC, et al. Association between Lamina Cribrosa Defects and Progressive Retinal Nerve Fiber Layer Loss in Glaucoma. *JAMA Ophthalmol.* 2019;137(4): 425–433. doi: 10.1001/jamaophthalmol.2018.6941
 28. Krzyżanowska-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
 29. Lee EJ, Kim TW, Kim H, et al. Comparison between Lamina Cribrosa Depth and Curvature as a Predictor of Progressive Retinal Nerve Fiber Layer Thinning in Primary Open-Angle Glaucoma. *Ophthalmol. Glaucoma.* 2018;1(1): 44–51. doi: 10.1016/j.ogla.2018.05.007
 30. Mirra S, Marfany G, Garcia-Fernández J. Under pressure: Cerebrospinal fluid contribution to the physiological homeostasis of the eye. *Seminars in Cell & Developmental Biology.* *Semin Cell Dev Biol.* 2020;102: 40–47. doi: 10.1016/j.semcdb.2019.11.003
 31. Kishi Shoji. Impact of Swept Source Optical Coherence Tomography on Ophthalmology. *December Taiwan Journal of Ophthalmology.* 2015;6(2). doi: 10.1016/j.tjo.2015.09.002
 32. Han JC, Cho SH, Sohn DY, Kee C. The characteristics of lamina cribrosa defects in myopic eyes with and without open-angle glaucoma. *Investigative Ophthalmology & Visual Science.* February 2016;57: 486–494. doi: 10.1167/iovs.15-17722
 33. Lee SH, Lee EJ, Kim JM, et al. Lamina Cribrosa Moves Anteriorly After Trabeculectomy in Myopic Eyes. *Investigative Ophthalmology & Visual Science.* June 2020;61: 36. doi: 10.1167/iovs.61.6.36
 34. Min HS, 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. doi: 10.1016/j.ophtha.2016.07.023
 35. Ghahari E, Bowd C, Zangwill LM, et al. Macular Vessel Density in Glaucomatous Eyes with Focal Lamina Cribrosa Defects. *J Glaucoma.* 2018;27(4): 342–349. doi: 10.1097/

IJG.0000000000000922

36. Devalla SK, Chin KS, Mari JM, et al. A Deep Learning Approach to Digitally Stain Optical Coherence Tomography Images of the Optic Nerve Head. *Inves Ophthalmol Vis Sci*. 2018;59(1):63–74. doi: 10.1167/iovs.17-22617

Информация об авторах

Наталья Ивановна Курышева – д.м.н., профессор, зав. кафедрой глазных болезней МБУ ИНО ФМБА России, зав. консультативно-диагностическим отделением Центра офтальмологии ФМБА России, e-natalia@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2265-6671>

Виталий Юрьевич Ким – ассистент кафедры глазных болезней, врач-офтальмолог консультативно-диагностического отделения Центра офтальмологии ФМБА России, kim_vitality@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7861-5863>

Information about the authors

Natalia I. Kuryшева – doctor of medical sciences, head of the Department of Eye Diseases of Medical Biological University of Innovations and Continuing Education head of the Consultative and Diagnostic Department of the Ophthalmological Center, Federal Medical and Biological Agency, Russia, e-natalia@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2265-6671>

Vitaly Yu. Kim – Assistant of the Department of Eye Diseases, Ophthalmologist of the Consultative and Diagnostic Department of the Ophthalmological Center, Federal Medical and Biological Agency, Russia, kim_vitality@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7861-5863>

Вклад авторов в работу:

Н.И. Курышева: существенный вклад в концепцию и дизайн работы, написание текста, редактирование, окончательное утверждение версии, подлежащей публикации.

В.Ю. Ким: сбор и обработка материала, написание текста, редактирование.

Authors' contribution:

N.I. Kuryшева: significant contribution to the concept and design of the work, writing the text, editing, final approval of the version to be published

V.Yu. Kim: collecting and processing material, writing text, editing

Финансирование: Авторы не получали конкретный грант на это исследование от какого-либо финансирующего агентства в государственном, коммерческом и некоммерческом секторах.

Конфликт интересов: Отсутствует.

Financial transparency: Authors have no financial interest in the submitted materials or methods.

Conflict of interest: None.

Поступила: 01.03.2022

Переработана: 30.03.2022

Принята к печати: 01.04.2022

Originally received: 01.03.2022

Final revision: 30.03.2022

Accepted: 01.04.2022