

DOI: <https://doi.org/10.17816/OV643384>

EDN: HZPTXQ



Морфологическое исследование дренажной системы глазного яблока после выполнения механического трабекулопилинга *ab interno*

О.Г. Макарова¹, Д.С. Островский², Т.З. Керимов², С.А. Борзенко^{2,3}, А.В. Шацких²,
Н.Ю. Горбунова^{1,4}, Н.А. Поздеева^{1,4}

¹ Чебоксарский филиал Национального медицинского исследовательского центра «Межотраслевой научно-технический комплекс „Микрохирургия глаза“ им. акад. С.Н. Фёдорова», Чебоксары, Россия;

² Национальный медицинский исследовательский центр «Межотраслевой научно-технический комплекс „Микрохирургия глаза“ им. акад. С.Н. Фёдорова», Москва, Россия;

³ Российский университет медицины, Москва, Россия;

⁴ Институт усовершенствования врачей, Чебоксары, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Изучение морфологических изменений трабекулярного аппарата, возникающих после выполнения механического трабекулопилинга, представляет собой интерес с целью обоснования гипотензивного эффекта данной процедуры.

Цель исследования. Оценка изменений трабекулярного аппарата угла передней камеры после экспериментального моделирования механического трабекулопилинга *ex vivo*.

Методы. После экспериментального моделирования *ex vivo* механического трабекулопилинга 4 кадаверных глаза были использованы для изучения морфологии трабекулярного аппарата с помощью сканирующей электронной микроскопии, 4 кадаверных глаза — для визуализации путей оттока внутриглазной жидкости с использованием инъекционной методики.

Результаты. Анализ результатов сканирующей электронной микроскопии показал, что механический трабекулопинг приводит к частичному слущиванию увеальной части трабекулы с полной сохранностью эндотелия роговицы. В результате инъекционной методики выявлено, что в зоне воздействия трабекулоскреппером дисперсный краситель обнаруживается на всех уровнях трабекулярного пути оттока внутриглазной жидкости в отличие от интактной зоны, где распространение туши ограничивается трабекулой и шлеммовым каналом.

Заключение. Результаты экспериментального исследования трабекулярного аппарата глазного яблока после выполнения механического трабекулопилинга позволяют нам сделать вывод о возможном улучшении проходимости путей оттока внутриглазной жидкости.

Ключевые слова: трабекулярная сеть; механический трабекулопинг; трабекулоскреппер.

Как цитировать

Макарова О.Г., Островский Д.С., Керимов Т.З., Борзенко С.А., Шацких А.В., Горбунова Н.Ю., Поздеева Н.А. Морфологическое исследование дренажной системы глазного яблока после выполнения механического трабекулопилинга *ab interno* // Офтальмологические ведомости. 2025. Т. 18. № 3. С. 33–42. DOI: 10.17816/OV643384 EDN: HZPTXQ

DOI: <https://doi.org/10.17816/OV643384>

EDN: HZPTXQ

Morphological Examination of the Eye's Drainage System After Manual Trabeculotomy *Ab Interno*

Olga G. Makarova¹, Dmitry S. Ostrovsky², Timur Z. Kerimov², Sergey A. Borzenok^{2,3}, Anna V. Shatskikh², Nadezhda Yu. Gorbunova^{1,4}, Nadezhda A. Pozdeyeva^{1,4}

¹ S. Fyodorov Eye Microsurgery Federal State Institution, Cheboksary Branch, Cheboksary, Russia;

² S. Fyodorov Eye Microsurgery Federal State Institution, Moscow, Russia;

³ Russian University of Medicine, Moscow, Russia;

⁴ Postgraduate Doctors Training Institute, Cheboksary, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Investigation of morphological changes in the trabecular meshwork after manual trabeculotomy may support the hypotensive effect of this procedure.

AIM: The study aimed to assess changes in the trabecular meshwork of the anterior chamber angle after experimental modeling of *ex vivo* manual trabeculotomy.

METHODS: After experimental modeling of *ex vivo* manual trabeculotomy, morphology of the trabecular meshwork of 4 cadaver eyes was studied using scanning electron microscopy, and aqueous outflow was visualized in 4 cadaver eyes using an injection technique.

RESULTS: Analysis of scanning electron microscopy results showed that manual trabeculotomy leads to partial shedding of the uveal meshwork, leaving corneal endothelium completely intact. The injection technique demonstrated that the dispersed dye is found at all levels of trabecular outflow in the area of trabecular meshwork scraping compared with the intact area, where the dye spread is limited by the trabecular meshwork and Schlemm canal.

CONCLUSION: This experimental study of the trabecular meshwork after manual trabeculotomy suggests a possible improvement in aqueous outflow.

Keywords: trabecular meshwork; manual trabeculotomy; trabecular meshwork scraper.

To cite this article

Makarova OG, Ostrovsky DS, Kerimov TZ, Borzenok SA, Shatskikh AV, Gorbunova NYu, Pozdeyeva NA. Morphological Examination of the Eye's Drainage System After Manual Trabeculotomy *Ab Interno*. *Ophthalmology Reports*. 2025;18(3):33–42. DOI: 10.17816/OV643384 EDN: HZPTXQ

ОБОСНОВАНИЕ

На сегодняшний день лечение глаукомы продолжает оставаться одной из ключевых задач в области офтальмологии. Основная причина развития первичной глаукомы — затруднённый отток внутриглазной жидкости (ВГЖ) из передней камеры глазного яблока, который связан с изменениями в его дренажной системе. Существенное влияние на проницаемость трабекулы оказывают дистрофические изменения в трабекулярном аппарате, проявляющиеся в разрушении волокнистых структур, утолщении трабекулярных пластин и накоплении различных отложений в межтрабекулярных пространствах и в юкстаканаликулярном слое [1]. При псевдоэксфолиативном синдроме основным фактором, вызывающим нарушения гидродинамики глаза, является нарастающее накопление псевдоэксфолиаций в толще трабекулы. Кроме того, возникающее при псевдоэксфолиативном синдроме нарушение адгезии пигмента к задней поверхности радужки приводит к постоянному выделению пигмента в переднюю камеру и к его накоплению в дренажной зоне с последующей облитерацией шлеммова канала [2–5].

Осознание значимости морфологических изменений в развитии первичной открытоугольной глаукомы способствовало созданию так называемых патогенетически ориентированных гипотензивных операций. Данные операции основаны на микрохирургическом изменении структуры ключевых компонентов дренажной зоны глазного яблока.

В последние годы в комбинированном лечении глаукомы и осложнённой катаракты активно применяются методики минимально инвазивной хирургии глаукомы — MIGS (minimally invasive glaucoma surgery) в сочетании с факэмульсификацией и имплантацией интраокулярной линзы [6–12]. Безопасность и техническая простота методик MIGS обеспечили популярность данных вмешательств среди офтальмохирургов. Однако в большинстве случаев широкому распространению их в современной практике препятствовало наличие характерных для этой группы осложнений. Д.И. Иванов и соавт. [13] отмечают высокий риск геморрагических осложнений разной степени выраженности у всех пациентов исследуемой группы после выполнения непрерывной трабекулотомии *ab interno*. Осложнениями вакуумной трабекулопластики *ab interno* также являются микрогифемы (3,4%) и феномен Тиндаля (3,4%) в раннем послеоперационном периоде [14]. Среди недостатков каналоластики *ab interno* следует отметить длительность и трудоёмкость выполнения процедуры. Исходя из существующих недостатков ранее предложенных методов, нами был разработан способ механического трабекулопилинга в качестве антиглаукомного компонента в комбинированном лечении глаукомы и осложнённой катаракты.

Структура и функциональные изменения ткани угла передней камеры, приводящие к нарушению оттока

водянистой влаги, были предметом исследования как отечественных, так и зарубежных учёных. Ультразвуковую дренажную зону анализировали с использованием различных методов электронной микроскопии [15].

Одна из таких работ — изучение трабекулярного аппарата глазного яблока — опубликована в 1977 г. R. Sampaolesi и C. Argento [16]. Авторы сравнили трабекулярный аппарат при глаукоме, полученный во время операции, с энуклеированными глазами, не страдающими глаукомой. После обработки образцов с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) были выявлены два типа патологического материала, заполняющего пространство трабекулярной сети глазных яблок с глаукомой. Первый тип представлял собой псевдоэксфолиативный материал, образующий сетчатый слой на поверхности трабекулярного аппарата, а второй — гранулы пигмента. У пациентов с псевдоэксфолиативной глаукомой наблюдалось слипание гранул пигмента с псевдоэксфолиативным материалом, что приводило к образованию гроздевидных депозитов на задней поверхности радужки [16].

По данным СЭМ трабекулярной ткани, полученной интраоперационно, Н.А. Chaudhry и соавт. [17] установили, что внутренняя стенка шлеммова канала глаза при первичной глаукоме покрыта слоем гомогенной субстанции, способной приводить к нарушению оттока ВГЖ. Сходные изменения в трабекулярной сети глаукомных глаз в 1980 г. были описаны D.K. Dueker [18].

Н.А. Quigley и E.M. Addicks [19] в исследовании, проведённом на 13 глазах с первичной открытоугольной глаукомой, не обнаружили ранее описываемой гомогенной субстанции. Полученные результаты они объясняли возможными различиями в техническом оборудовании, разной выборкой пациентов или потерей части материала в процессе агрессивной пробоподготовки. Подобные результаты, подтверждающие отсутствие упомянутой гомогенной субстанции, были получены в 1981 г. D.K. Gieser и соавт. [20] в исследовании, охватывающем 19 глаз с первичной открытоугольной глаукомой.

М. Maglio и соавт. [21] предположили, что гомогенная субстанция, приводящая к закупорке пор внутренней стенки шлеммова канала, является следствием загрязнения поверхности микропрепаратов металлическим напылением, применяемым при проведении СЭМ для улучшения контрастности микрорельефа. С.М. Potau и соавт. [22] лишь в 50% исследованных глаз с первичной глаукомой выявили наличие плотной, однородной непрерывной субстанции, которая стала причиной частичной или полной облитерации трабекулярной сети.

Исследование структуры трабекулярного аппарата глаза у пациентов с пигментной глаукомой было проведено С.Г. Murphy и соавт. в 1992 г. [23]. В юкстаканаликулярной ткани они обнаружили всего 3,5% от общего количества пигмента, выявленного с помощью

трансмиссионной электронной микроскопии, в то время как оставшиеся 96,5% находились в корнеосклеральной и увеосклеральной частях трабекулы.

Таким образом, остаётся не до конца понятным, какие именно изменения ткани угла передней камеры являются преобладающими в ретенции ВГЖ и играют ведущую роль в патогенетическом механизме повышения внутриглазного давления. Один из таких механизмов — сопротивление оттоку ВГЖ через дренажные структуры глаза, возникающие, в том числе, вследствие утолщения трабекулярных пластин и скопления межтрабекулярного дебриса. Следует предположить, что чем больше роль обструкционного компонента в генезе повышения внутриглазного давления, тем более выраженным будет гипотензивный эффект от предлагаемого вмешательства. В своей работе мы решили обосновать возможность безопасного и эффективного механического удаления дебриса (в виде пигмента и/или псевдоэксфолиативного материала) и части изменённой трабекулы с поверхности трабекулярного аппарата при помощи трабекулоскреппера с последующей оценкой результатов применения данной технологии в клинической практике.

Цель исследования

Оценка изменений трабекулярной сети угла передней камеры после экспериментального моделирования механического трабекулопилинга *ex vivo*.

МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Проведено доклиническое экспериментальное исследование на базе Чебоксарского филиала ФГАУ «НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Фёдорова» Минздрава России (МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Фёдорова), Центра фундаментальных и прикладных медико-биологических проблем МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Фёдорова (Москва) и патологоанатомической лаборатории МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Фёдорова (Москва).

Критерии соответствия

В работе использовали кадаверные глаза, представленные глазным банком Чебоксарского филиала ФГАУ «НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Фёдорова» Минздрава России. Средний возраст доноров составлял 45 лет. Период от момента смерти до энуклеации не превышал 6 ч, а время от смерти до проведения эксперимента — не более 11 ч, так как именно в этот срок наблюдаются минимальные морфологические изменения в тканях переднего отрезка глаза.

Продолжительность исследования

Экспериментальное исследование проводилось с 27.05.2025 по 20.06.2025.

Описание экспериментального исследования

Методика механического трабекулопилинга была смоделирована на 8 трупных глазах. В условиях операционной Чебоксарского филиала МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Фёдорова на кадаверных глазах, зафиксированных в держателе (экспериментально-техническое производство «Микрохирургия глаза», Россия), под гониоскопическим контролем (гониолинза «Магна») был выполнен механический трабекулопилинг с использованием трабекулоскреппера (Патент на полезную модель № 221450) [24]. Трабекулоскреппер представляет собой инструмент, состоящий из рукоятки, переходной и рабочей частей. Рабочая часть трабекулоскреппера выполнена в виде тупого округлого наконечника с алмазным напылением. Воздействие инструментом проводилось на протяжении 180° окружности угла передней камеры. Контролем служила оставшаяся дуга окружности нативной трабекулы в 180°, которая маркировалась путём наложения непрерывного шва на склеру. Трабекулоскреппер вводили в переднюю камеру кадаверного глаза через парацентез, после чего совершали лёгкое «скребущее» движение по внутренней стенке шлеммова канала по дугообразной траектории. Четыре кадаверных глаза были использованы для изучения морфологии трабекулярного аппарата с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) в условиях Центра фундаментальных и прикладных медико-биологических проблем МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Фёдорова (Москва) и ещё 4 кадаверных глаза — для оценки проходимости дренажных путей оттока ВГЖ с использованием инъекционной методики в патологоанатомической лаборатории МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Фёдорова (Москва).

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)

Для ультраструктурного анализа препаратов использовали растровый электронно-сканирующий микроскоп JSM-6000 Plus (JEOL, Япония). В процессе подготовки материала к дальнейшему исследованию из 4 кадаверных глаз было получено 16 образцов иридоцилиарной зоны глазного яблока и сформированы основная и контрольная группы по 8 образцов в каждой. Для визуализации структур угла передней камеры радужку фиксировали хирургическими иглами к склере. Для первичной фиксации препараты помещали на 24 ч в 1% раствор формальдегида, затем образцы перемещали в 10% раствор формальдегида на тот же период времени. После фиксации проводилось обезвоживание биологического материала в растворе ацетона в восходящей концентрации, за которым следовала сушка в критической точке. После пробоподготовки образцы всех групп устанавливали на алюминиевые столики так, чтобы поверхность трабекулы была обращена вверх, после чего проводили напыление золотом (проба 999, толщина 5 нм) для создания электронно-проводящего слоя на поверхности образцов. Затем образцы исследовали с помощью микроскопа

JCM-6000 Plus в условиях высокого вакуума при ускоряющем напряжении 15 кВ.

Инъекционная методика

После экспериментального моделирования трабекулопилинга и герметизации глазного яблока осуществляли инъекцию водного раствора дисперсной чёрной туши в переднюю камеру через парацентез до гипертоноуса, после чего глазное яблоко помещали в фиксирующий раствор (10% раствор нейтрального формалина). Для гистологического анализа вырезали секторальные образцы из передней части глазного яблока в области моделирования трабекулопилинга, а также из противоположной (интактной) стороны в качестве контрольного образца. После вырезки образцы подвергали процессу обезвоживания и обезжиривания в спиртах восходящей концентрации, затем заливали в парафин и изготавливали серийные

срезы. Часть смонтированных срезов на предметных стеклах окрашивали гематоксилином и эозином, а другую часть подвергали депарафинизации с последующим просветлением без окраски. Исследование выполняли под микроскопом фирмы Leica DM LB2 при 50-, 100-, 200-, 400-кратном увеличении с последующей фоторегистрацией на слайд-сканере Leica Aperio CS2.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сканирующая электронная микроскопия

При СЭМ опытных образцов трабекулярная сеть угла передней камеры была представлена уменьшением количества увеальных трабекул (рис. 1) с выраженным расширением межтрабекулярных щелей (рис. 2). Эндотелий роговицы был представлен клетками гексагональной формы с чёткими границами (рис. 3).

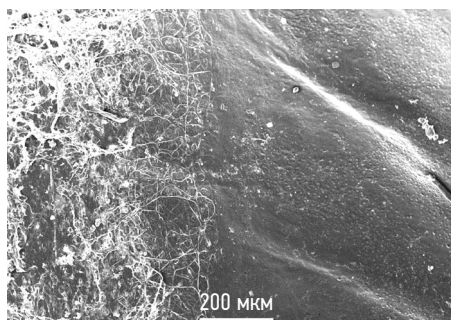


Рис. 1. Сканирующая электронная микроскопия. Трабекулярная сеть и эндотелий роговицы. Основная группа. Увел. $\times 100$.

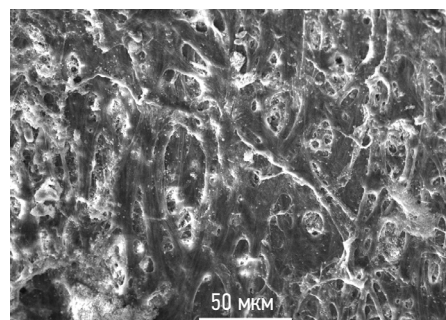


Рис. 2. Сканирующая электронная микроскопия. Корнеосклеральный отдел трабекулярной сети. Основная группа. Увел. $\times 500$.

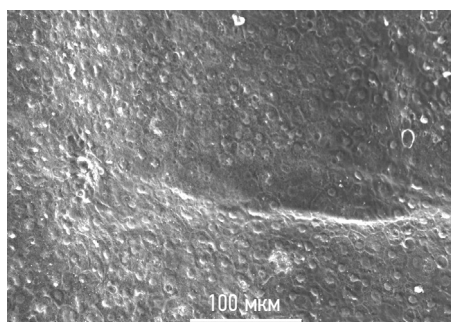


Рис. 3. Сканирующая электронная микроскопия. Эндотелий роговицы. Основная группа. Увел. $\times 300$.

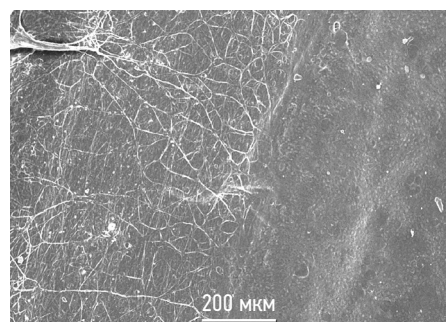


Рис. 4. Сканирующая электронная микроскопия. Трабекулярная сеть и эндотелий роговицы. Контрольная группа. Увел. $\times 100$.

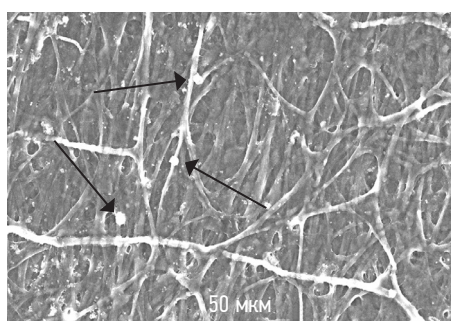


Рис. 5. Сканирующая электронная микроскопия. Увеальная часть трабекулярной сети. Контрольная группа. Стрелками указаны гранулы пигмента. Увел. $\times 500$.

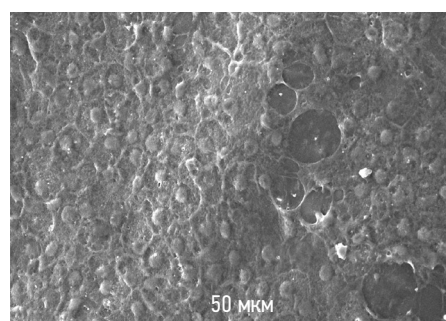


Рис. 6. Сканирующая электронная микроскопия. Эндотелий роговицы. Контрольная группа. Увел. $\times 500$.

В контрольных образцах архитектура трабекулярной сети угла передней камеры была представлена двумя-тремя перекрещивающимися, преимущественно радиально ориентированными округлыми в сечении тяжами увеальных трабекул, перекрывающих более плоские экваториально ориентированные соединительнотканые пластины корнеосклеральных трабекул (рис. 4). Увеальные трабекулы имели гладкую поверхность с чёткими ячейками между ними и с гранулами пигмента (рис. 5). Эндотелиальные клетки роговицы имели сохранную структуру (рис. 6).

Инъекционная методика

Уже на этапе вырезки при макроскопическом исследовании было отмечено прокрашивание склеры и конъюнктивы в зоне воздействия трабекулоскрепером. В дальнейшем при световой микроскопии неокрашенных срезов выявлено, что гранулы туши оседали на всех структурах трабекулярного пути оттока ВГЖ. Частицы красителя перемещались в виде непрерывной дорожки из передней камеры через щелевидные пространства трабекулярной сети, далее интенсивно прокрашивался шлеммов канал с оседанием туши по обеим стенкам. Единичные гранулы

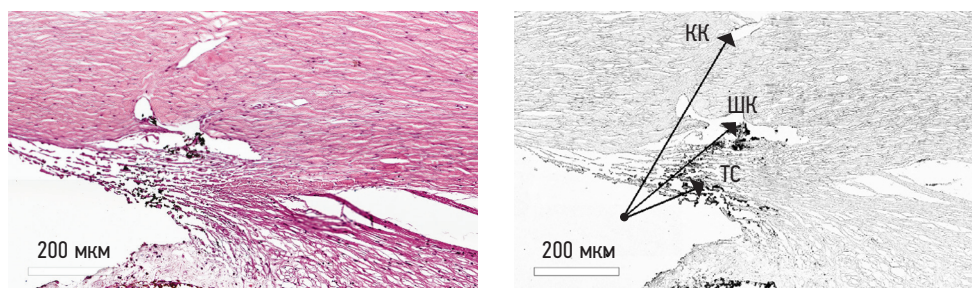


Рис. 7. Гистологический препарат дренажных путей глазного яблока. Основная группа. КК — коллекторные канальцы; ШК — шлеммов канал; ТС — трабекулярная сеть. Стрелкой указаны чёрные гранулы красителя. Окраска гематоксилином и эозином. Увел. $\times 200$.

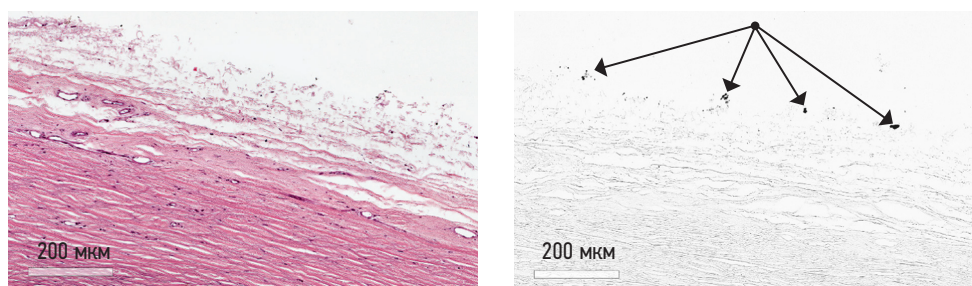


Рис. 8. Гистологический препарат эписклеры глазного яблока. Основная группа. Стрелками указаны чёрные гранулы красителя. Окраска гематоксилином и эозином. Увел. $\times 200$.

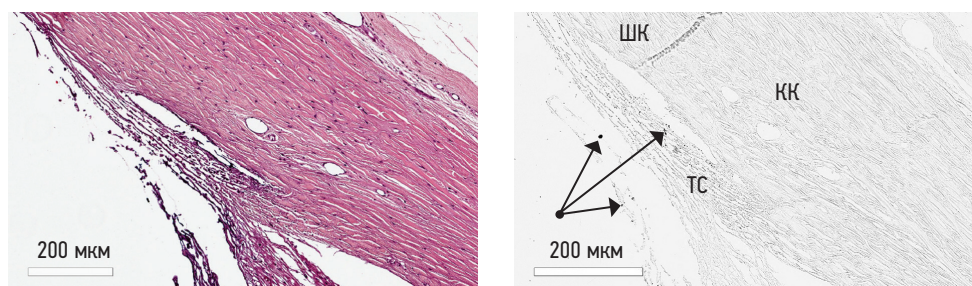


Рис. 9. Гистологический препарат дренажных путей глазного яблока. Контрольная группа. КК — коллекторные канальцы; ШК — шлеммов канал; ТС — трабекулярная сеть. Стрелками указаны чёрные гранулы красителя. Окраска гематоксилином и эозином. Увел. $\times 200$.

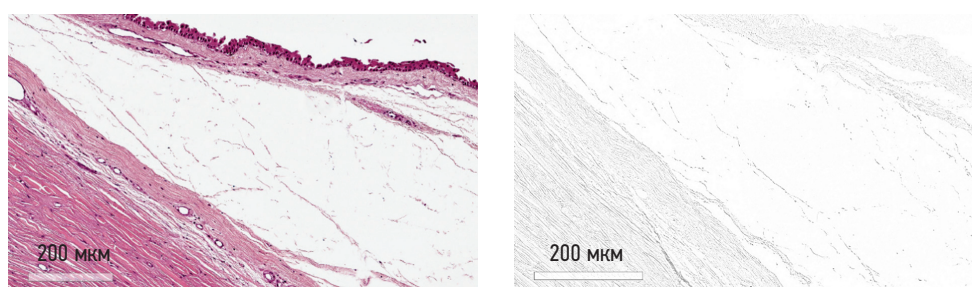


Рис. 10. Гистологический препарат эписклеры глазного яблока. Контрольная группа. Окраска гематоксилином и эозином. Увел. $\times 200$.

были выявлены в коллекторных канальцах и строге бульбарной конъюнктивы в эписклере (рис. 7, 8).

В отличие от этого в интактной зоне отмечена задержка гранул красителя в трабекулярной сети и в просвете шлеммова канала, преимущественно по внутренней его стенке. Далее по ходу путей оттока ВГЖ и эписклере элементы туши не обнаруживались (рис. 9, 10).

Окраска гематоксилином и эозином гистослайдов того же уровня позволила визуализировать структуры, на которых оседали гранулы дисперсного красителя. Кроме того, достоверно выявленных признаков деструкции трабекулярной сети не было обнаружено.

ОБСУЖДЕНИЕ

В основе изучаемой методики механического трабекулопилинга лежит очищение трабекулы от пигмента и/или псевдоэксфолиативного материала с частичным sluшиванием увеальной части трабекулярной сети угла передней камеры глаза с последующим удалением трабекулярного дебриса из влаги передней камеры с помощью ирригационно-аспирационной системы. Результаты наших морфологических исследований на основе СЭМ свидетельствуют, что механический трабекулопилинг не приводит к выраженным деструктивным изменениям в трабекулярной сети угла передней камеры. В месте воздействия трабекулокреппером обнаруживается частичное sluшивание увеальной части трабекулы с трабекулярным дебрисом и умеренное разволокнение её корнеосклеральной части, что, в свою очередь, также приводит к расширению межтрабекулярных щелей и тем самым может способствовать улучшению гидродинамики глаза. Выявлена полная сохранность структуры эндотелия роговицы в зоне воздействия трабекулокреппером, что подтверждает безопасность данной процедуры для эндотелиального слоя роговицы.

К сожалению, в настоящее время в литературе не представлены данные по изучению морфологических изменений трабекулярной сети угла передней камеры глаза в результате выполнения схожих методов воздействия на дренажные пути оттока ВГЖ, что не позволяет нам провести сравнительную оценку полученных результатов. Однако стоит отметить работы по очищению трабекулы путём лазерных воздействий. Одним из таких лазерных вмешательств является селективная лазерная активация трабекулы в лечении первичной открытоугольной глаукомы, клиническая эффективность и безопасность которой была показана в работе Н.Р. Туманян и соавт. [25], в том числе в ходе проведения морфологических исследований трабекулярной сети угла передней камеры на основе СЭМ. В зоне лазерного воздействия была выявлена сглаженность рельефа трабекулы с минимальной деструкцией её поверхностного гомогенного вещества, что, в свою очередь, привело к значительному увеличению межтрабекулярных щелей и, соответственно, доказало увеличение оттока ВГЖ [25].

Как селективная лазерная активация трабекулы, так и механический трабекулопилинг направлены на эвакуацию трабекулярного дебриса и улучшение оттока ВГЖ.

Учитывая характер изменений, наблюдаемый по данным СЭМ, которая демонстрирует не только удаление трабекулярного дебриса в виде пигмента и/или псевдоэксфолиативного материала с поверхности трабекулярной сети, но и выявляет частичное удаление увеальной части трабекулы, логичным кажется изменение названия способа воздействия с ранее звучавшего механического трабекулоклининга на механический трабекулопилинг. Выполнение данной методики по данным СЭМ не сопровождается выраженными деструктивными изменениями трабекулярного аппарата, не затрагивает целостность эндотелиального слоя роговицы, открывает доступ к расширенным межтрабекулярным щелям, что указывает на безопасность и патогенетическую направленность механического трабекулопилинга, лежащего в основе предполагаемого гипотензивного эффекта данной процедуры.

В экспериментальной офтальмологии, учитывая особенности строения дренажной системы и угла передней камеры у лабораторных животных, возникли трудности в подборе адекватной модели глаз для изучения характера и выраженности изменений трабекулы в ходе выполнения механического трабекулопилинга. На кадаверных глазах из-за невозможности моделирования глаукомных изменений дренажных путей глазного яблока не представилось возможным полноценно оценить гипотензивный эффект изучаемой методики. В работе А.В. Золотарёва и соавт. [26] по изучению роли трабекулярной сети в осуществлении увеосклерального оттока представлена методика изучения проходимости дренажных путей глазного яблока путём перфузии передней камеры 5% суспензией туши. Гистологический анализ материала показал возможность миграции элементов туши из передней камеры через трабекулярную сеть в интрацилиарные полости и далее в супрахориоидальное пространство. В то же время увеосклеральный путь движения туши был ограничен склеральной шпорой, тогда как в увеальном слое краситель свободно распространялся между волокнами цилиарной мышцы.

Таким образом, представленная методика позволила авторам установить, что весь отток ВГЖ из передней камеры происходит через трабекулу. Однако в зависимости от направления отток водянистой влаги может разделяться на два типа: транстрабекулярный (синусный), который осуществляется через трабекулу по интратрабекулярным пространствам, и паратрабекулярный (увеальный).

Именно подобная инъекционная методика позволила нам оценить проходимость путей оттока ВГЖ после механического трабекулопилинга. Результаты инъекционной методики суспензией туши продемонстрировали большую податливость трабекулярной сети для прохождения дисперсного красителя и, как следствие, возможно более эффективный отток красящего вещества по дренажным путям глазного яблока после механического трабекулопилинга. В ходе

экспериментального исследования также не выявлено очагов выраженных деструктивных изменений трабекулярной сети угла передней камеры глазного яблока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённого морфологического исследования, основанного на данных СЭМ, не выявлено выраженного деструктивного воздействия механического трабекулопилинга на архитектуру трабекулярной сети глаза и повреждающего действия на эндотелий роговицы.

Удаление увеальной части трабекулы с формированием расширенного доступа к межтрабекулярным пространствам после воздействия трабекулоскрепером отражает патогенетическую направленность данного вида хирургического вмешательства.

Результаты инъекционной методики с последующим гистологическим исследованием образцов показали отсутствие признаков выраженного деструктивного процесса в тканях в зоне воздействия трабекулоскрепером с признаками увеличения податливости трабекулярной сети для прохождения дисперсного красителя.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. О.Г. Макарова — сбор и обработка материала, проведение эксперимента, написание текста; Д.С. Островский — анализ данных световой электронной микроскопии, редактирование текста; Т.З. Керимов — выполнение световой электронной микроскопии; С.А. Борзенко — разработка методологии проведения световой электронной микроскопии образцов, анализ полученных данных; А.В. Шацких — проведение гистологических исследований образцов, анализ полученных данных, редакция текста; Н.Ю. Горбунова — концепция и дизайн исследования, сбор и обработка материалов; Н.А. Поздеева — руководство проектом, внесение окончательных правок. Авторы одобрили версию для публикации, а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Проведение исследования одобрено Локальным этическим комитетом, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова» (протокол № 1 от 26 мая 2025 г.).

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими

лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Все данные, полученные в настоящем исследовании, доступны в статье.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFO

Author contributions: O.G. Makarova, collecting and processing material, conducting an experiment, writing the main part of the text; D.S. Ostrovsky, analysis of light electron microscopy data, text revision; T.Z. Kerimov, performing light electron microscopy; S.A. Borzenok, experimental design of light electron microscopy of samples, analysis of the obtained data; A.V. Shatskikh, conducting histological studies of specimens, analyzing the obtained data, text revision; N.Yu. Gorbunova, study concept and design, collection and processing of materials; N.A. Pozdeyeva, project management, making final edits. All the authors approved the version of the draft to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: The conduct of the study was approved by the local ethical committee of the Chuvash State University (protocol No. 1 of May 26, 2025).

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities or interests for the last three years related with for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: The authors did not use previously published information (text, illustrations, data) to create this paper.

Data availability statement: All data generated during this study are available in this article.

Generative AI: Generative AI technologies were not used for this article creation.

Provenance and peer-review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Nesterov AP. Primary open-angle glaucoma: pathogenesis and principles of treatment. *Russian journal of clinical ophthalmology*. 2000;1(1):4–5. (In Russ.)
2. Agafonova VV, Barinov EF, Frankowska-Gerlak MZ, et al. Pathogenesis of open-angle glaucoma in pseudoexfoliation syndrome (literature review). *Oftalmologiya*. 2010;(3):106–114. (In Russ.)
3. Konstas AGP, Tsironi S, Ritch R. Current concepts in the pathogenesis and management of exfoliation syndrome and exfoliative glaucoma. *Comp Ophthalmol Update*. 2006;7(3):131–141.
4. Schlotzer-Schrehardt U, Kuchle M, Junemann A, Naumann G. Relevance of the pseudoexfoliation syndrome for the glaucomas. *Der Ophthalmologe*. 2002;99(9):683–690. doi: 10.1007/s00347-002-0702-1
5. Koshits IN, Svetlova OV, Kotlyar KE, et al. Biomechanical analysis of traditional modern concepts of the pathogenesis of primary open-angle glaucoma. *Glaucoma*. 2005;(1):41–59. (In Russ.)
6. Fea AM. Phacoemulsification versus phacoemulsification with microbypass stent implantation in primary open-angle glaucoma: randomized

- double-masked clinical trial. *J Cataract Refract Surg.* 2010;36(3):407–412. doi: 10.1016/j.jcrs.2009.10.031
7. Petrov SYu, Vostrukhin SV, Aslamazova AE, Sherstneva LV. Modern methods of minimally invasive glaucoma surgery. *Russian annals of ophthalmology.* 2016;132(3):96–102. doi: 10.17116/oftalma2016132396-102 EDN: WCZGMR
8. Francis B. Trabectome combined with phacoemulsification versus phacoemulsification alone: a prospective, non-randomized controlled surgical trial. *Clin Surg J Ophthalmol.* 2010;28(10):1–7.
9. Grieshaber MC, Grieshaber HR, Stegmann R. A new expander for Schlemm canal surgery in primary open-angle glaucoma-interim clinical results. *J Glaucoma.* 2016;25(8):657–662. doi: 10.1097/IJG.0000000000000397
10. Kaplowitz K, Schuman JS, Loewen NA. Techniques and outcomes of minimally invasive trabecular ablation and bypass surgery. *Br J Ophthalmol.* 2014;98(5):579–585. doi: 10.1136/bjophthalmol2013-304256
11. Kaplowitz K, Bussell II, Honkanen R, et al. Review and meta-analysis of *ab-interno* trabeculectomy outcomes. *Br J Ophthalmol.* 2016;100(5):594–600. doi: 10.1136/bjophthalmol-2015-307131
12. Habash A, Alrushoud M, Al Abdulsalam O, et al. Combined gonioscopy-assisted transluminal trabeculectomy (GATT) with *Ab interno* canaloplasty (ABiC) in conjunction with phacoemulsification: 12-month outcomes. *Clin Ophthalmol.* 2020;14:2491–2496. doi: 10.2147/OPHT.S267303
13. Ivanov DI, Nikulin ME. Trabeculectomy *ab interno* as a hypotensive component in a combined surgery of a cataract with a glaucoma. *National Journal Glaucoma.* 2011;(3):34–38. EDN: RUHKZZ
14. Trubilin VN, Haira NA. A novel method of combined phacoemulsification and vacuum trabeculectomy *ab interno*. *Ophthalmology in Russia.* 2014;11(1):28–36. doi: 10.18008/1816-5095-2014-1-28-37 EDN: SAYHYL
15. Avetisov SE, Petrov SYu, Kravchik MV. Electron microscopy of human trabecular meshwork in normal and glaucomatous eyes. *National Journal Glaucoma.* 2018;17(2):84–89. doi: 10.25700/NJG.2018.02.08 EDN: XSNQXJ
16. Sampaioles R, Argento C. Scanning electron microscopy of the trabecular meshwork in normal and glaucomatous eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 1977;16(4):302–314.
17. Chaudhry HA, Dueker DK, Simmons RJ, et al. Scanning electron microscopy of trabeculectomy specimens in open-angle glaucoma. *Am J Ophthalmol.* 1979;88(1):78–92. doi: 10.1016/0002-9394(79)90759-1
18. Dueker DK. Surgical specimens in open-angle glaucoma. *Ann Ophthalmol.* 1980;12(9):1070–1072.
19. Quigley HA, Addicks EM. Scanning electron microscopy of trabeculectomy specimens from eyes with open-angle glaucoma. *Am J Ophthalmol.* 1980;90(6):854–857. doi: 10.1016/s0002-9394(14)75200-6
20. Gieser DK, Tanenbaum M, Smith ME, et al. Amorphous coating in open-angle glaucoma. *Am J Ophthalmol.* 1981;92(1):130–133. doi: 10.1016/s0002-9394(14)75924-0
21. Maglio M, McMahon C, Hoskins D, Alvarado J. Potential artifacts in scanning electron microscopy of the trabecular meshwork in glaucoma. *Am J Ophthalmol.* 1980;90(5):645–653. doi: 10.1016/s0002-9394(14)75131-1
22. Patau CM, Canals M, Costa J, et al. Obstruction of trabecular orifices in primary open-angle glaucoma. *Eur J Anat.* 2002;6(2):75–81.
23. Murphy CG, Johnson M, Alvarado JA. Juxtacanalicular tissue in pigmentary and primary open-angle glaucoma. The hydrodynamic role of pigment and other constituents. *Arch Ophthalmol.* 1992;110(12):1779–1785. doi: 10.1001/archophth.1992.01080240119043
24. Patent RU No. 221450/19.04.2023. Byul. No. 31. Gorbunova NA, Markarova OG, Pozdeeva NA. *Instrument for mechanical trabeculectomy in combined treatment of glaucoma and complicated cataract.* Available from: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet (In Russ.)
25. Tumanyan NR, Ivanova ES, Luybimova TS, et al. Morphologic changes in trabecular meshwork after selective laser trabeculectomy (M.A. Latina) and selective laser activation of the trabecular. *Fyodorov Journal of Ophthalmic Surgery.* 2010;(3):39–42. EDN: PXQZYV
26. Zolotarev AV, Karlova EV, Nikolaeva GA. The role of the trabecular meshwork in the implementation of uveoscleral outflow. *Russian journal of clinical ophthalmology.* 2006;7(2):67–70. (In Russ.)

ОБ АВТОРАХ

***Макарова Ольга Геннадьевна;** адрес: Россия, 428028, Чебоксары, пр. Тракторостроителей, д. 10;
ORCID: 0000-0002-6659-3318; eLibrary SPIN: 2987-0608;
e-mail: olgamol86@mail.ru

Островский Дмитрий Сергеевич, канд. биол. наук;
ORCID: 0000-0002-2817-7102; eLibrary SPIN: 9947-6481;
e-mail: ostrovskiyds@mntk.ru

Керимов Тимур Захарович, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0001-8967-6370; eLibrary SPIN: 1297-9373;
e-mail: timkerimov2014@yandex.ru

Борзенко Сергей Анатольевич, д-р мед. наук, профессор, академик РАН;
ORCID: 0000-0001-9160-6240;
eLibrary SPIN: 1054-0164; e-mail: Borzenok@mntk.ru

AUTHORS' INFO

***Olga G. Makarova,** MD; address: 10 Traktorstroitelei st, Cheboksary, 428028, Russia;
ORCID: 0000-0002-6659-3318; eLibrary SPIN: 2987-0608;
e-mail: olgamol86@mail.ru

Dmitry S. Ostrovsky, Cand. Sci. (Biology);
ORCID: 0000-0002-2817-7102; eLibrary SPIN: 9947-6481;
e-mail: ostrovskiyds@mntk.ru

Timur Z. Kerimov, MD, Cand. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0001-8967-6370; eLibrary SPIN: 1297-9373;
e-mail: timkerimov2014@yandex.ru

Sergey A. Borzenok, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences;
ORCID: 0000-0001-9160-6240;
eLibrary SPIN: 1054-0164; e-mail: Borzenok@mntk.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Шацких Анна Викторовна, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0002-3437-8162; eLibrary SPIN: 1751-9815;
e-mail: avsatik07@yandex.ru

Горбунова Надежда Юрьевна, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0002-7388-5634; eLibrary SPIN: 5553-5263;
e-mail: ngorbunova_21@mail.ru

Поздеева Надежда Александровна, д-р мед. наук;
ORCID: 0000-0003-3637-3645; eLibrary SPIN: 2878-7280;
e-mail: npozdeeva@mail.ru

Anna V. Shatskikh, MD, Cand. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0002-3437-8162; eLibrary SPIN: 1751-9815;
e-mail: avsatik07@yandex.ru

Nadezhda Yu. Gorbunova, MD, Cand. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0002-7388-5634; eLibrary SPIN: 5553-5263;
e-mail: ngorbunova_21@mail.ru

Nadezhda A. Pozdeyeva, MD, Dr. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0003-3637-3645; eLibrary SPIN: 2878-7280;
e-mail: npozdeeva@mail.ru