

МЕТОДЫ ИНТРАОПЕРАЦИОННОЙ КОРРЕКЦИИ РОГОВИЧНОГО АСТИГМАТИЗМА В ХОДЕ ХИРУРГИИ КАТАРАКТЫ

^{1,2}Трифаненкова И.Г., ¹Иванов А.М., ¹Булатова Ю.Д., ¹Булатов А.Р.

¹Федеральное государственное автономное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр Межотраслевой научно-технический комплекс „Микрохирургия глаза“ имени академика С.Н. Федорова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Калужский филиал, Калуга, Российская Федерация, e-mail: nauka@eye-kaluga.com;

²Медицинский институт федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Калужский государственный университет имени К.Э. Циолковского», Калуга, Российская Федерация

Хирургия катаракты является одной из наиболее распространенных и отработанных офтальмологических операций. Не диагностированный на дооперационном этапе астигматизм может существенно повлиять на послеоперационную остроту зрения и дальнейшую удовлетворенность пациента. Цель работы – представить способы хирургической коррекции роговичного астигматизма. Исследование основано на результатах поиска источников литературы по реферативным базам PubMed, Scopus и eLibrary за период с 2003 до 2024 г. Было проанализировано 120 источников литературы, 28 из которых были использованы и указаны в библиографии. Обзор литературы был выполнен в соответствии с актуальными методологическими стандартами подготовки систематических обзоров и руководством Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses. Торические интраокулярные линзы стали широко распространенным вариантом в хирургии катаракты, предлагая эффективное и надежное решение для пациентов с регулярным роговичным астигматизмом. Однако в некоторых случаях альтернативные методы могут оказаться более подходящими. Астигматическая кератотомия остается актуальным способом коррекции роговичного астигматизма и может быть представлена лимбальными послабляющими разрезами и периферическими роговичными послабляющими разрезами для уплощения крутого меридиана, тем самым уменьшая астигматизм. Сочетание послабляющих разрезов с торическими интраокулярными линзами может значительно улучшить общую коррекцию астигматизма, особенно у пациентов с более высокими степенями уже существующего астигматизма. Зачастую хирурги избегали применения астигматической кератотомии совместно с хирургией катаракты. Однако появление современного фемтосекундного лазера повысило точность и воспроизводимость хирургических вмешательств при хирургии катаракты, позволило снизить вероятность человеческой ошибки и улучшить общие результаты хирургического вмешательства. Астигматизм является значимым фактором, ограничивающим достижение оптимальных рефракционных результатов после удаления катаракты, и требует качественной предоперационной диагностики, индивидуализированного хирургического подхода и использования современных вспомогательных технологий.

Ключевые слова: астигматизм, хирургия катаракты, остаточный астигматизм, торические интраокулярные линзы, астигматическая кератотомия, фемтосекундный лазер.

METHODS OF INTRAOPERATIVE CORRECTION OF CORNEAL ASTIGMATISM DURING CATARACT SURGERY

^{1,2}Trifanenkova I.G., ¹Ivanov A.M., ¹Bulatova Yu.D., ¹Bulatov A.R.

¹Federal State Autonomous Institution National Medical Research Center Interdisciplinary Scientific and Technical Complex Eye Microsurgery named after Academician S.N. Fedorov, Ministry of Health of the Russian Federation, Kaluga Branch, Kaluga, Russian Federation, e-mail: nauka@eye-kaluga.com;

²Medical Institute of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Kaluga State University named after K.E. Tsiolkovsky”, Kaluga, Russian Federation

Cataract surgery is one of the most common and well-established ophthalmological procedures. Undiagnosed astigmatism at the preoperative stage can significantly affect postoperative visual acuity and the patient's subsequent satisfaction. Objective: To present methods for the surgical correction of corneal astigmatism. The study is based on the results of a literature search conducted in the PubMed, Scopus, and eLibrary databases for the period from 2003 to 2024. A total of 120 literature sources were analyzed, 28 of which were utilized and cited in the bibliography. The literature review was performed in accordance with current methodological

standards for systematic reviews and the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses guidelines. Toric intraocular lenses have become a widespread option in cataract surgery, offering an effective and reliable solution for patients with regular corneal astigmatism. However, in some cases, alternative methods may be more suitable. Astigmatic keratotomy remains a relevant method for correcting corneal astigmatism. It can be performed using limbal relaxing incisions and peripheral corneal relaxing incisions to flatten the steep meridian, thereby reducing astigmatism. Combining relaxing incisions with toric intraocular lenses can significantly enhance the overall astigmatic correction, particularly in patients with higher degrees of pre-existing astigmatism. Historically, surgeons often avoided combining astigmatic keratotomy with cataract surgery. However, the introduction of the modern femtosecond laser has enhanced the precision and reproducibility of these surgical procedures, reduced the potential for human error, and improved overall surgical outcomes. Astigmatism is a significant factor that limits the achievement of optimal refractive outcomes following cataract removal. It requires high-quality preoperative diagnostics, an individualized surgical approach, and the use of modern assistive technologies.

Keywords: astigmatism, cataract surgery, residual astigmatism, toric intraocular lenses, astigmatic keratotomy, femtosecond laser.

Введение

Астигматизм – нарушение в рефракции, характеризующееся неравномерной кривизной роговицы или хрусталика, приводящее к снижению зрения и являющееся одной из наиболее частых причин низкой остроты зрения. Астигматизм более 1,0 дптр встречается примерно у 40 % пациентов, а 1,5 дптр и более – у 22 % пациентов [1].

Роговичный астигматизм может быть правильным (регулярным) и неправильным (нерегулярным). Правильный роговичный астигматизм характеризуется неизменной оптической силой в пределах одного меридиана, а переход рефракции от одного меридиана к другому происходит плавно. Напротив, нерегулярный роговичный астигматизм характеризуется разной преломляющей силой в пределах одного меридиана и неплавным переходом от одного меридиана к другому. В этих случаях главные меридианы не находятся под прямым углом, что приводит к более сложным зрительным искажениям.

Наиболее сильное влияние на ожидаемую послеоперационную остроту зрения оказывает нерегулярный астигматизм, диагностика и хирургия которого может сопровождаться рядом сложностей. Нерегулярный астигматизм может быть связан с кератэктазиями (кератоконус, кератоглобус, пеллюцидная маргинальная дегенерация, состояние после кератопластики и кераторефракционных операций), а также быть следствием травм и возникать в исходе тяжелых роговичных инфекций [2].

Таким образом, астигматизм является одной из частых причин снижения зрения и клинически значим у значительной доли пациентов. Наибольшее влияние на прогноз послеоперационного зрения оказывает нерегулярный роговичный астигматизм.

Цель исследования – представить способы хирургической коррекции роговичного астигматизма.

Материал и методы исследования

Данное исследование было основано на результатах поиска источников литературы по реферативным базам PubMed, Scopus и eLibrary за период с 2003 до 2024 г. включительно с

использованием ключевых слов: «иррегулярный астигматизм», «коррекция астигматизма», «аркуатная кератотомия», «торические ИОЛ» и те же фразы на английском, а также “LRI”, “OSCI”. В ходе поиска авторами было проанализировано 120 источников литературы, 28 из которых были использованы и указаны в библиографии. Обзор литературы был выполнен в соответствии с актуальными методологическими стандартами подготовки систематических обзоров и руководством Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA), что обеспечило воспроизводимость процедур отбора исследований и стандартизированный подход к их оценке [3].

Результаты исследования и их обсуждение

Хирургия катаракты является одной из наиболее распространенных и отработанных офтальмологических операций. По данным исследований у 35–40 % пациентов катаракта сопровождается астигматизмом $\geq 1,0$ D и 19–22 % имеют астигматизм $\geq 1,5$ D [4–6]. Не диагностированный на дооперационном этапе астигматизм может существенно повлиять на послеоперационную остроту зрения и дальнейшую удовлетворенность пациента [1]. Остаточный астигматизм роговицы также может приводить к возникновению монокулярной диплопии, появлению гало-эффектов и развитию астенопического синдрома. Эффективная коррекция астигматизма во время операции по удалению катаракты необходима для достижения оптимальных результатов зрения и повышения общего качества жизни пациентов.

В XIX в. Snellen, Schiötz, Bates и Lans описали различные методы уменьшения астигматизма. В 1953 г. Сато и коллеги предположили, что, делая радиальные разрезы как в задней, так и в передней части роговицы, можно лечить астигматизм и миопию. В 1970-е гг. С.Н. Федоров предложил методику передней дозированной кератотомии, которая получила широкое распространение. В рамках данной технологии радиальная кератотомия могла дополняться тангенциальными разрезами. В дальнейшем было установлено, что дугообразные разрезы обладают большей эффективностью по сравнению с прямыми поперечными [7, с. 39].

На сегодняшний день существуют различные способы коррекции роговичного астигматизма во время операции по удалению катаракты: основной разрез, выполненный по сильной оси роговицы (CCI), добавление противоположного разреза роговицы (OSCI), одиночные или парные лимбальные послабляющие разрезы (LRI), аркуатные разрезы и использование торических ИОЛ, имплантация интрастромальных роговичных сегментов и колец, метод биоптики и др. [1; 8]. Существуют различные опубликованные исследования, сравнивающие торические ИОЛ с LRI, показывающие сопоставимые результаты [9], в то время как другие показывают, что торические ИОЛ превосходят в результате послабляющие разрезы.

Торические интраокулярные линзы (ИОЛ) стали широко распространенным вариантом в хирургии катаракты, предлагая эффективное и надежное решение для пациентов с регулярным роговичным астигматизмом [10] и снижая потребность в очковой коррекции после операции. По данным Chen с соавт., торические ИОЛ показали значительное улучшение остроты зрения и снижение астигматизма у пациентов с определенными типами нерегулярного астигматизма, такими как «асимметричный галстук-бабочка» и «угловой галстук-бабочка». Острота зрения без коррекции расстояния улучшилась с $0,86 \pm 0,40$ LogMar до $0,22 \pm 0,15$ LogMar, а предоперационный астигматизм роговицы снизился с $2,05 \pm 0,90$ D до $0,78 \pm 0,57$ D после операции [11]. В случаях нерегулярного астигматизма с регулярным центральным компонентом торические ИОЛ также показали свою эффективность [12]. Стоит отметить, что расчет ИОЛ при сопутствующем иррегулярном астигматизме сопряжен с рядом сложностей и может привести к послеоперационным рефракционным ошибкам. Так, по данным Sua и соавт. [13], у пациентов с нерегулярным астигматизмом и центральными рубцами возможно развитие гиперметропического сдвига, связанного с уплощением роговицы в зоне рубца. Кроме того, Park и соавт. сообщили, что гиперметропический сдвиг может наблюдаться у пациентов с задним кератоконусом, при котором локализованная элевация задней поверхности роговицы не учитывается стандартными формулами расчета силы ИОЛ [14].

Конфигурация роговицы более точно оценивается с помощью кератотопографа Pentacam. В отличие от кератометрии, IOLMaster и стандартной роговичной топографии, где соотношение между передней и задней кривизной роговицы воспринимается равным, использование Pentacam позволяет измерять непосредственно задний роговичный астигматизм. В литературе [14] описали случай, в котором эквивалентные значения кератометрии (EKR) в зонах 2 и 3 мм оказались наиболее близкими к исходным данным кератометрии, тогда как прибор IOLMaster переоценил оптическую силу. На основании этого они пришли к выводу, что использование системы Pentacam может служить альтернативой традиционной кератометрии при прогнозировании действительной оптической силы роговицы. По данным A. Achiron с соавт. [15], IOLMaster 500 обеспечивает точные измерения роговицы только у 74,1 % пациентов с нерегулярным астигматизмом. В то время как использование данных 2-миллиметрового EKR позволяет получить более высокую остроту зрения у пациентов с нерегулярным астигматизмом после операции по удалению катаракты.

Таким образом, торические интраокулярные линзы эффективно применяются при хирургии катаракты у пациентов с регулярным астигматизмом и могут обеспечивать значимое улучшение зрения и снижение астигматизма. Однако расчет силы ИОЛ при иррегулярном

астигматизме сопряжен с риском рефракционных ошибок. В некоторых случаях альтернативные методы коррекции астигматизма могут оказаться более подходящими.

Кератотомия остается актуальным способом коррекции роговичного астигматизма. Для проведения кератотомии применяются различные виды номограмм. К широко известным относятся номограммы Nordan [16], Hanna, Donnenfeld, Nichamin, Lindstrom [1; 17] и его модифицированные версии. Сочетание послабляющих разрезов с торическими ИОЛ может значительно улучшить общую коррекцию астигматизма, особенно у пациентов с более высокими степенями уже существующего астигматизма. Современные подходы используют передовые методы визуализации для более точного позиционирования этих разрезов, что повышает предсказуемость результатов [18; 19]. Разрезы роговицы приводят к уплощению более крутого меридиана и одновременному увеличению кривизны более пологого меридиана, расположенного под углом 90° к линии разреза. Были разработаны различные методики выполнения разрезов роговицы: одиночный роговичный разрез (CCI), противоположные роговичные разрезы (OCCI), аркуатная кератотомия (АК) и лимбальные послабляющие разрезы (LRI). В хирургии катаракты одиночный роговичный разрез (CCI) оказывает небольшое уплощающее действие на кривизну роговицы, что может быть использовано для уменьшения ранее существовавшего астигматизма. Добавление идентичного проникающего CCI напротив первого может усилить уплощающий эффект. Парные противоположные CCI (OCCI) размещаются по сильной оси для ее уплощения. Один CCI используется для выполнения операции по удалению катаракты, а противоположный CCI делается для усиления уплощающего эффекта. Метод OCCI потенциально применим для коррекции астигматизма в общей рефракционной хирургии, однако необходимы соответствующие номограммы. В случае OCCI существует большой риск серьезных осложнений, таких как фильтрация разреза и эндофтальмит, поскольку операция включает два парных проникающих разреза. Лимбальные послабляющие разрезы (LRI) могут быть выполнены во время факоэмульсификации для коррекции роговичного астигматизма от 0,75 до 3,75 дптр, хотя на практике они чаще применяются для коррекции до 2 дптр. Радиальные разрезы выполняются на лимбе на глубину 600 мкм, длиной от 30 до 90° в зависимости от возраста, оси астигматизма и степени астигматизма. Второй парный лимбальный расслабляющий разрез выполняется на противоположной стороне. LRI считается одним из самых безопасных хирургических методов лечения роговичного астигматизма при операции по удалению катаракты, сопряженный с низким риском интра- и послеоперационных осложнений. Основные осложнения, связанные с данной технологией: послеоперационный кератит, легкая эпителиопатия, синдром сухого глаза, перфорация роговицы, блики. Исследования продемонстрировали значительное уменьшение топографического

астигматизма после выполнения LRI, которое сохранялось в течение шести месяцев послеоперационного наблюдения. Аркуатная кератотомия (АК) – это аналогичный тип послабляющего разреза роговицы, который выполняется более центрально (в пределах 7–9 мм от оптической зоны), обеспечивая более выраженное изменение астигматизма роговицы. АК может привести к неблагоприятному рефракционному результату из-за близости разрезов к зрительной оси. Были описаны и другие осложнения, такие как микробный кератит, эндофтальмит, врастание эпителия и эктазия роговицы [18; 19]. Таким образом, кератотомия остается актуальным методом коррекции роговичного астигматизма и включает различные техники, выбор и эффективность которых зависят от степени астигматизма и используемых номограмм.

Однако, несмотря на то, что кератотомия была хорошо зарекомендовавшей себя технологией лечения астигматизма, зачастую хирурги избегают ее применения совместно с хирургией катаракты [20]. Однако появление современного фемтосекундного лазера повысило точность и воспроизводимость хирургических вмешательств при хирургии катаракты, что позволило снизить вероятность человеческой ошибки и улучшить общие результаты хирургического вмешательства [9; 21].

С внедрением технологии стало возможным проведение фемтосекундной лазерной аркуатной кератотомии (FLAK или FSAK) для создания непроникающих интрастромальных разрезов роговицы в соответствии с номограммой в рамках фемтосекундной лазерной хирургии катаракты (FLACS). Это обеспечило формирование более точных разрезов, принимая во внимание глубину, форму и угол наклона аркуатных разрезов. Использование фемтосекундного лазера позволило получать более предсказуемые рефракционные результаты. В проведенном сравнительном исследовании I. Bahar и соавт. аркуатная кератотомия, выполненная с использованием фемтолазерной установки IntraLaseFS, показала преимущество над мануальной технологией, что подтверждалось более высокими показателями некорригированной остроты зрения (НКОЗ) и максимальной корригированной остроты зрения (МКОЗ), а также отсутствием осложнений [1].

Эффективность FLAK зависит от длины и глубины разреза, возраста пациента, предоперационной силы и оси астигматизма, биометрических параметров роговицы и расстояния от разреза до лимба. По данным F. Zhang et al. расстояние от разреза до лимба является предиктором хирургически индуцированного астигматизма – большее расстояние от разреза до лимба приводило к более выраженному уменьшению астигматизма, даже если расстояние от разреза до оптической зоны было одинаковым [21]. Schwarzenbacher et al. [22] доказали, что уменьшение переднего роговичного астигматизма и общего роговичного астигматизма после FLAK сохранялось стабильным через год после операции. Общие

роговичные aberrации высокого порядка также значительно снизились. FLAK зарекомендовала себя как эффективный и безопасный метод снижения астигматизма роговицы в глазах с высоким астигматизмом после сквозной кератопластики и эндотелиальной кератопластики (DSEK) [23]. Чаще всего целью данной процедуры является уменьшение послеоперационного астигматизма до уровня, при котором коррекция очками или контактными линзами будет переносимой. Альтернативные процедуры коррекции астигматизма включают LASIK, PRK и топографически-ориентируемую эксимерлазерную абляцию. Компрессионные швы, клиновидная резекция и трапециевидная кератотомия также могут использоваться для лечения астигматизма после кератопластики, однако FSAK потенциально менее инвазивна и может быть более эффективным инструментом после кератопластики, поскольку создает минимальное повреждение поверхности. FSAK после СКП требует применения отдельной номограммы, поскольку рубец на соединении трансплантата и хозяина имеет иное натяжение, чем естественный лимб. Как правило, FSAK после СКП выполняется на глубину 75, а не 90 % толщины роговицы, а разрезы производятся на расстоянии 1 мм от рубца [24]. Также было доказано, что FLAK безопасны, стабильны и эффективны в устранении астигматизма легкой и средней степени [24]. Они обеспечивают хирургическую «гибкость», поскольку хирург может выбрать, раскрывать ли их за щелевой лампой в послеоперационный период для большего корректирующего эффекта [23]. FLAK может быть выполнена на тонких роговицах и при выраженном синдроме сухого глаза, когда стандартная лазерная коррекция противопоказана [25, с. 159]. Процедура связана с низкой частотой осложнений, таких как симптомы сухого глаза и перфорация роговицы [26]. Однако, поскольку роговица является биомеханической структурой, возможна регрессия корректирующего эффекта вследствие процесса заживления. В отличие от мануальной кератотомии, корректирующий эффект фемтолазерной кератотомии более стабильный, что связано с минимальным повреждением и сниженной воспалительной реакцией тканей [22]. Также развитие эктазии роговицы и врастания эпителия менее вероятно при фемтолазерной кератотомии.

По данным А. Yoo с соавт. [27], отсутствует статистически значимая разница между FLAC в комбинации с FSAK и стандартной хирургией катаракты с имплантацией торической ИОЛ. Более поздняя работа Н.Ж. Known с соавт. [28] также не продемонстрировала статистически значимой разницы. Однако существует тенденция к более низкому послеоперационному астигматизму после хирургии катаракты с имплантацией торической ИОЛ. При этом имплантация торической ИОЛ – менее сложная хирургическая процедура, не требующая специальной аппаратуры и не увеличивающая продолжительность операции

факоэмульсификации. Однако, если имплантация торической ИОЛ невозможна, фемтосекундная кератотомия может быть альтернативным способом коррекции астигматизма.

Несмотря на активное изучение и разработку номограмм для проведения фемтолазерной аркуатной кератотомии, больший пласт публикаций посвящен проведению одномоментной хирургии катаракты с лечением правильного астигматизма, в то время как коррекция неправильного астигматизма, как правило, проводится отдельным этапом. Также стоит отметить финансовую и временную составляющую использования торических ИОЛ, которые в ряде случаев оказываются недоступны пациентам. Проведение одномоментной хирургии катаракты и FLAK может стать перспективным методом лечения пациентов с катарактой и стабильным неправильным астигматизмом. Разработка номограмм для данной категории пациентов может повысить послеоперационный результат и, как следствие, качество жизни пациента в дальнейшем.

Таким образом, внедрение фемтосекундной лазерной аркуатной кератотомии в рамках FLACS позволило выполнять высокоточные разрезы роговицы и повысить предсказуемость рефракционных результатов по сравнению с мануальной техникой. FLAK зарекомендовала себя как безопасный, малоинвазивный и эффективный метод коррекции астигматизма, в том числе после кератопластики и у пациентов с ограничениями к стандартной лазерной коррекции.

Заключение

Астигматизм – распространенное препятствие для достижения оптимальных рефракционных результатов после операции по удалению катаракты. Остаточный астигматизм способен значительно снизить остроту зрения и удовлетворенность пациента, что особенно важно при высоких ожиданиях пациентов от современной операции по удалению катаракты. Качественная предоперационная диагностика и индивидуально разработанное хирургическое ведение, все более широкий доступ к вспомогательным технологиям позволяют получить наилучший рефракционный результат.

Список литературы

1. Куликова И.Л., Тимофеева Н.С. Фемтолазерная аркуатная кератотомия в коррекции роговичного астигматизма в ходе хирургии катаракты // Саратовский научно-медицинский журнал. 2021. № 2. С. 342–347. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/femtolazernaya-arkuatnaya-keratotomiya-v-korreksii-rogovichnogo-astigmatizma-v-hode-hirurgii-katarakty> (дата обращения: 26.11.2025). EDN: INTJLX.

2. Слонимский А.Ю., Слонимский Ю.Б., Ситник Г.В., Мягков А.В., Милаш С.В. Пеллюцидная маргинальная дегенерация роговицы и кератоконус: дифференциальный диагноз и тактика ведения больных // Офтальмология. 2019. Т. 16 (4). С. 433–442. URL: <https://www.ophtalmojournal.com/opht/article/view/1073/642?ysclid=mi49rhfdqy910743097> (дата обращения: 17.09.2025). DOI: 10.18008/1816-5095-2019-4-433-441. EDN: AIIZTE.
3. Page M.J., McKenzie J.E., Bossuyt P.M., Boutron I., Hoffmann T.C., Mulrow C.D., Shamseer L., Tetzlaff J.M., Akl E.A., Brennan S.E., Chou R., Glanville J., Grimshaw J.M., Hróbjartsson A., Lalu M.M., Li T., Loder E.W., Mayo-Wilson E., McDonald S., McGuinness L.A., Stewart L.A., Thomas J., Tricco A.C., Welch V.A., Whiting P., Moher D. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews // BMJ. 2021. Vol. 372. P. n71. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8005924/> (дата обращения: 17.09.2025). DOI: 10.1136/bmj.n71.
4. Ferrer-Blasco T., Montés-Micó R., Peixoto-de-Matos S.C., González Méijome J.M., Cerviño A. Prevalence of corneal astigmatism before cataract surgery // J. Cataract Refract Surg. 2009. № 35 (1). P. 70–75. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19101427/> (дата обращения: 13.09.2025). DOI: 10.1016/j.jcrs.2008.09.027.
5. Khan M.I., Muhtaseb M. Prevalence of corneal astigmatism in patients having routine cataract surgery at a teaching hospital in the United Kingdom // J Cataract Refract Surg. 2011. Vol. 37. Is. 10. P. 1751–1755. URL: https://journals.lww.com/jcrs/abstract/2011/10000/prevalence_of_corneal_astigmatism_in_patients.4.aspx (дата обращения: 15.09.2025). DOI: 10.1016/j.jcrs.2011.04.026.
6. Michelitsch M., Ardjomand N., Vidic B., Wedrich A., Steinwender G. Prävalenz und Altersabhängigkeit von kornealem Astigmatismus bei Patienten vor Kataraktchirurgie // Der Ophthalmologe. 2017. Vol. 114. Is. 3. P. 247–251. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00347-016-0323-8> (дата обращения: 14.09.2025). DOI: 10.1007/s00347-016-0323-8.
7. Куликова И.Л., Тимофеева Н.С., Поздеева Н.А. Коррекция астигматизма в ходе хирургии катаракты. Чебоксары: ГАУ ДПО «ИУВ», 2023. 68 с. [Электронный ресурс]. URL: [https://mntkcheb.ru/specialistam/НБ/2023_Тимофеева %20Коррекция %20астигматизма.pdf](https://mntkcheb.ru/specialistam/НБ/2023_Тимофеева%20Коррекция%20астигматизма.pdf) (дата обращения: 15.09.2025). ISBN 978-5-6048027-9-3.
8. Núñez M.X., Henriquez M.A., Escaf L.J., Ventura B.V., Srur M., Newball L., Espallat A., Centurion V.A. Consensus on the management of astigmatism in cataract surgery // Clin Ophthalmol. 2019. Vol. 11. Is. 13. P. 311–324. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30809088/> (дата обращения: 15.09.2025). DOI: 10.2147/OPTH.S178277. PMID: 30809088.

9. Lake J.C., Victor G., Clare G., Porfirio G.J., Kernohan A., Evans J.R. Toric intraocular lens versus limbal relaxing incisions for corneal astigmatism after phacoemulsification // *Cochrane Database Syst Rev.* 2019. Vol. 12. Is. 12. P. CD012801. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6916141/> (дата обращения: 15.09.2025). DOI: 10.1002/14651858.CD012801.pub2.
10. Tomas B.C., Khoramnia R., Aufarth G.U., Holzer M.P. Clinical outcomes after implantation of a toric intraocular lens with a transitional conic toric surface // *Br. J. Ophthalmol.* 2018. Vol. 102. P. 313–316. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28774937/> (дата обращения: 15.09.2025). DOI: 10.1136/bjophthalmol-2017-310386.
11. Chen X., Jiang Y., Gao N., Gao Y., Yang J., Bu S., Tian F. Effectiveness of toric intraocular lens implantation for correcting irregular corneal astigmatism in cataract eyes // *Scientific Reports.* 2024. Vol. 14. Is. 1. P. 8868. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38632326/> (дата обращения: 15.09.2025). DOI: 10.1038/s41598-024-59303-0.
12. Gao Y., Ye Z., Chen W., Li J., Yan X., Li Z. Management of cataracts in patients with irregular astigmatism with regular central component by phacoemulsification combined with toric intraocular lens implantation // *Journal of Ophthalmology.* 2020. Vol. 2020. P. 3520856. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7210554/> (дата обращения: 17.09.2025). DOI: 10.1155/2020/3520856.
13. Cua I.Y., Qazi M.A., Lee S.F., Pepose J.S. Intraocular lens calculations in patients with corneal scarring and irregular astigmatism. // *J Cataract Refract Surg.* 2003. Vol. 29. P. 1352–1357. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12900244/> (дата обращения: 17.09.2025). DOI: 10.1016/S0886-3350(03)00227-X.
14. Park D.Y., Lim D.H., Chung T-Y., Chung E-S. Intraocular lens power calculations in a patient with posterior keratoconus // *Cornea.* 2013. Vol. 32. P. 708–711. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23449479/> (дата обращения: 17.09.2025). DOI: 10.1097/ICO.0b013e3182797900.
15. Achiron A., Elhaddad O., Leadbetter D., Levinger E., Voytsekhivskyy O., Smith K., Avadhanam V., Darcy K., Tole D. Intraocular lens power calculation in patients with irregular astigmatism // *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol.* 2022. Vol. 260. Is. 12. P. 3889–3895. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35776172/> (дата обращения: 17.09.2025). DOI: 10.1007/s00417-022-05729-z.
16. Al Sabaani N., Al Malki S., Al Jindan M., Al Assiri A., Al Swailem S. Femtosecond astigmatic keratotomy for postkeratoplasty astigmatism // *Saudi J Ophthalmol.* 2016. Vol. 30. P. 163–8. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28210176/> (дата обращения: 15.09.2025). DOI: 10.1016/j.sjopt.2016.04.003.

17. Chan T.C., Cheng G.P., Wang Z., Tham C.C., Woo V.C., Jhanji V. Vector Analysis of Corneal Astigmatism After Combined Femtosecond-Assisted Phacoemulsification and Arcuate Keratotomy // *Am J Ophthalmol.* 2015. Vol. 160. Is. 2. P. 250–255.e2. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25982969/> (дата обращения: 15.09.2025). DOI: 10.1016/j.ajo.2015.05.004.
18. Carvalho M.J., Suzuki S.H., Freitas L.L., Branco B.C., Schor P., Lima A.L.H. Limbal Relaxing Incisions to Correct Corneal Astigmatism During Phacoemulsification // *J. Refract. Surg.* 2007. Vol. 23. P. 499–504. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17523513/> (дата обращения: 15.09.2025). DOI: 10.3928/1081-597X-20070501-14.
19. Gu Z.Y., Ye M.J., Ji K.K., Liao R.F. Effects of astigmatic keratotomy combined with scleral tunnel incisions for the treatment of high astigmatism after penetrating keratoplasty // *Exp Ther Med.* 2019. Vol. 17. P. 495–501. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30651827/> (дата обращения: 15.09.2025). DOI: 10.3892/etm.2018.6968.
20. Yeu E., Reeves S.W., Wang L., Randleman J.B. Resident surgical experience with lens and corneal refractive surgery: Survey of the ASCRS young physicians and residents membership // *J. Cataract. Refract. Surg.* 2013. Vol. 39. Is. 2. P. 279–284. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23332254/> (дата обращения: 15.09.2025). DOI: 10.1016/j.jcrs.2012.09.029.
21. Zhang F., Li S., Huo D., Li Q. Predictors of Femtosecond Laser-Assisted Arcuate Keratotomy Efficacy for Astigmatism Correction in Cataract Surgery // *J. Refract. Surg.* 2022. Vol. 38. P. 480–486. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35947005/> (дата обращения: 17.09.2025). DOI: 10.3928/1081597X-20220609-01.
22. Schwarzenbacher L., Schartmüller D., Röggla V., Meyer E., Leydolt C., Menapace R. One-Year Results of Arcuate Keratotomy in Patients with Low to Moderate Corneal Astigmatism Using a Low-Pulse-Energy Femtosecond Laser // *Am. J. Ophthalmol.* 2021. Vol. 224. P. 53–65. URL: https://www.researchgate.net/publication/347527201_One-Year_Results_of_Arcuate_Keratotomy_in_Patients_With_Low_to_Moderate_Corneal_Astigmatism_Using_a_Low-Pulse-Energy_Femtosecond_Laser (дата обращения: 17.09.2025). DOI: 10.1016/j.ajo.2020.11.018.
23. Kecik M., Schweitzer C. Femtosecond laser-assisted cataract surgery: Update and perspectives // *Front Med (Lausanne).* 2023. Vol. 10. P. 1131314. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10017866/> (дата обращения: 17.09.2025). DOI: 10.3389/fmed.2023.1131314.

24. Vickers L.A., Gupta P.K. Femtosecond laser-assisted keratotomy // *Curr Opin Ophthalmol.* 2016. Vol. 27. P. 277–84. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27035074/> (дата обращения: 17.09.2025) DOI: 10.1097/ICU.0000000000000267.
25. Стройко М.С. Фемтосекундная астигматическая кератотомия в сочетании с топографически ориентированной фоторефрактивной кератэктомией для коррекции роговичного астигматизма у пациентов с тонкой роговицей: дис. ... канд. мед. наук. М., 2018. 188 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://eyepress.ru/sbornik.aspx?807> (дата обращения: 15.09.2025).
26. Bang C.W., Choi J.W., Han S.Y. Long-term Results of Arcuate Keratotomy in Femtosecond Laser-assisted Cataract Surgery. *Journal of The Korean Ophthalmological Society.* 2019. Vol. 60. Is. 10. P. 946–952. URL: <https://jkos.org/journal/view.php?doi=10.3341/jkos.2019.60.10.946> (дата обращения: 17.09.2025). DOI: 10.3341/JKOS.2019.60.10.946.
27. Yoo A., Yun S., Kim J.Y., Kim M.J., Tchah H. Femtosecond Laser-Assisted Arcuate Keratotomy Versus Toric IOL Implantation for Correcting Astigmatism // *J. Refract. Surg.* 2015. Vol. 31. P. 574–578. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26352561/> (дата обращения: 17.09.2025). DOI: 10.3928/1081597X-20150820-01.
28. Kwon H.J., Lee H., Lee J.A., Kim J.Y., Tchah H. Astigmatic Correction of Simultaneous Femtosecond Laser-Assisted Cataract Surgery (FLACS) with Intrastromal Arcuate Keratotomy (ISAK) versus Toric Intraocular Lens Implantation with Conventional Phacoemulsification // *BMC Ophthalmol.* 2021. Vol. 21. P. 298. URL: https://www.researchgate.net/publication/353908379_Astigmatic_correction_of_simultaneous_femtosecond_laser-assisted_cataract_surgery_FLACS_with_intrastromal_arcuate_keratotomy_ISAK_versus_Toric_intraocular_Lens_Implantation_with_conventional_phacoemuls (дата обращения: 17.09.2025). DOI: 10.1186/s12886-021-02059-2.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.