

Возможности лазерно-аспирационного подхода к рефракционной хирургии хрусталика

Д.Э. Аракелян¹С.Ю. Кобаев²
В. В. Поминова²И. А. Ильинская²

¹ НМИЦ МНТК «Микрохирургия глаза» им. академика С.Н. Федорова
Министерства здравоохранения Российской Федерации
Бескудниковский бульвар, 59а, Москва, 127486, Российская Федерация

² ФГАОУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н. И. Пирогова»
Министерства здравоохранения Российской Федерации
ул. Островитянова, 1, Москва, 117997, Российская Федерация

РЕЗЮМЕ

Офтальмология. 2024;21(3):471–480

Введение. В обзоре представлены современные данные о способах хирургии хрусталика с целью коррекции рефракционных нарушений у пациентов с пресбиопией и другими аномалиями рефракции, а также о возможных методах минимизации ультразвуковой нагрузки в ходе операции. **Цель:** представить современные данные литературы о рефракционной хирургии хрусталика, возможных способах снижения ультразвуковой нагрузки и современных моделях ИОЛ. **Материал и методы.** Для выполнения обзора был осуществлен поиск источников литературы по реферативным базам PubMed и Scopus за период до 2023 г. включительно с использованием ключевых слов «zero phaco», «refractive lens exchange», «presbyopia», «femtosecond laser», «U/S phaco», «premium IOL», «refractive error surgery», «endothelial dystrophy». Всего было отобрано 76 статей, относящихся к теме обзора. **Результаты.** Многочисленными исследованиями подтверждена эффективность, безопасность и быстрая зрительная реабилитация после хирургии хрусталика с максимальным снижением ультразвуковой нагрузки, в частности у пациентов с обменными нарушениями и предрасположенностью к дистрофии роговицы. **Заключение.** Проведенный анализ литературы позволяет утверждать, что с ростом ожиданий пациентов и использованием ИОЛ премиум-класса в эпоху рефракционной хирургии катаракты предсказуемость и точность приобрели первостепенное значение. Таким образом, технология безопасной фемтохирургии хрусталика значительно улучшила хирургические методы и произвела революцию в офтальмологической хирургии за последние десятилетия.

Ключевые слова: фемтолазер, пресбиопия, катаракта, zero phaco, денситометрия, EDOF, медиаторы воспаления, ЭЗД

Для цитирования: Аракелян Д.Э., Кобаев С.Ю., Ильинская И.А., Поминова В.В. Возможности лазерно-аспирационного подхода к рефракционной хирургии хрусталика. *Офтальмология*. 2024;21(3):471–480. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2024-3-471-480>

Прозрачность финансовой деятельности: никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Конфликт интересов отсутствует.



The Potential of a Laser-Aspiration Solution for Refractive Lens Exchange

D.E. Arakelyan¹, S.Yu. Kopaev¹, I.A. Il'inskaya², V.V. Pominova²

¹ The S. Fyodorov Eye Microsurgery Federal State Institution
Beskudnikovskiy blvd., 59A, Moscow, 127486, Russian Federation

² Pirogov Russian National Research Medical University
Ostrovityanov str., 1, Moscow, 117437, Russian Federation

ABSTRACT

Ophthalmology in Russia. 2024;21(3):471–480

Introduction. This review presents the current knowledge about the methods of lens surgery for the correction of refractive errors in patients with presbyopia and other refractive errors. And also about possible methods of minimization of ultrasound load during the surgery. **Purpose.** To present current relevant literature scientific knowledge on refractive lens surgery, possible ways of minimization of ultrasound load and new IOL models. **Material and methods.** To perform the review the literature references were searched through the abstract databases PubMed and Scopus for the period up to and including 2023 using the keywords “zero phaco”, “refractive lens exchange”, “presbyopia”, “femtosecond laser”, “U/S phaco”, “premium IOL”, “refractive error surgery”, “endothelial dystrophy”. A total of 76 articles related to the review topic were selected. **Results.** Multiple studies confirmed efficacy, safety and fast visual rehabilitation after lens surgery with maximal ultrasound load reduction, in particular in patients with metabolic disorders and predisposition to corneal dystrophies. **Conclusion.** The literature review suggests that with increasing patient expectations and the use of premium IOLs in the era of refractive lens surgery, predictability and accuracy have become essential. Thus, the technology of safe lens femtosurgery has greatly improved surgical techniques and has revolutionized ophthalmic surgery in recent decades.

Keywords: femtolaser, presbyopia, cataract, zero phaco, densitometry, inflammatory mediators, EED

For citation: Arakelyan D.E., Kopaev S.Yu., Il'inskaya I.A., Pominova V.V. The Potential of a Laser-Aspiration Solution for Refractive Lens Exchange. *Ophthalmology in Russia*. 2024;21(3):471–480. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2024-3-471-480>

Financial Disclosure: no author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

There is no conflict of interests.

ВВЕДЕНИЕ

Популярность рефракционной хирургии с годами растет. 5,5 % — это ежегодный прирост количества операций, производящихся по всему миру.

Степень близорукости в различных странах мира демонстрирует устойчивую тенденцию к росту [1]. По оценкам Всемирной организации здравоохранения к 2030 году каждый третий человек на планете будет носителем данного типа аномалии рефракции. Близорукостью страдают от 28,4 до 35 % населения мира, при этом на близорукость высокой степени приходится 4–9 %. Профилактика и лечение близорукости являются важными медико-социальными проблемами.

Среди хирургических методов коррекции миопии следует выделить два основных направления: интраокулярная коррекция и кераторефракционная хирургия. При интраокулярной коррекции изменение осуществляется путем имплантации искусственного хрусталика нужной преломляющей силы, при этом естественный хрусталик можно оставлять интактным или извлечь его. В рефракционной хирургии роговицы преломляющая сила оптической системы глаза изменяется путем формирования нового профиля роговицы. Каждый из вышеперечисленных видов коррекции имеет свои ограничения, показания и противопоказания. Выбор вида рефракционной операции наиболее сложен у пациентов с близорукостью очень высокой степени (–10,0 D и выше).

LASIK (Laser Assisted in Situ Keratomileusis) является наиболее распространенной формой кераторефракционной операции, которая показана при миопии до –12,00 диоптрии (сферический эквивалент), дальнозоркости до +3,00 диоптрии, астигматизме до 3,00 диоптрии.

Для хирургической коррекции высокой степени дальнозоркости в сочетании с астигматизмом используются следующие виды вмешательства [2]: LASIK, имплантация факичной линзы, биооптика (экстракция прозрачного хрусталика в сочетании с имплантацией мультифокальной торической интраокулярной линзы (ИОЛ) и LASIK для коррекции остаточной аномалии рефракции), экстракция прозрачного хрусталика с имплантацией двух ИОЛ в соответствии с техникой «piggyback», экстракция прозрачного хрусталика с имплантацией и индивидуальной мультифокальной торической ИОЛ.

Интраокулярные методы коррекции гиперметропии высокой степени приобрели наибольшую популярность [3–5].

У пациентов старше 45 лет операция по замене естественного хрусталика на интраокулярную линзу является приоритетным методом выбора хирургической тактики, учитывая значительное снижение аккомодации.

По данным ВОЗ, около 2,2 млрд человек в мире имеют нарушения зрения вблизи или вдаль. Из них 826 млн человек имеют нарушения зрения вблизи из-за некорригированной пресбиопии [6].

Д. Э. Аракелян, С. Ю. Копеев, И. А. Ильинская, В. В. Поминова

Контактная информация: Аракелян Давид Эдуардович dr.arakelian@icloud.com

Возможности лазерно-аспирационного подхода к рефракционной хирургии хрусталика

Согласно другим статистическим исследованиям, в 2000 году пресбиопией страдало около 1,4 млрд человек во всем мире (23 % населения планеты), к 2015 году этот показатель достиг 1,8 млрд (25 %), а к 2030 году, по научным прогнозам, этот показатель достигнет 2,1 млрд [7].

Существуют две теории происхождения пресбиопии: хрусталиковая теория Гесса — Гульстранда и внехрусталиковая теория А. Duane, которые сходятся в том, что в основе пресбиопии лежит феномен старения. Среди офтальмологов преобладают сторонники первой теории, в соответствии с которой хирургическое лечение с установкой интраокулярной линзы занимает важное место в коррекции пресбиопии [8, 9].

Экономическое бремя нарушений зрения в мире огромно, потери производительности труда оцениваются в 411 млрд долларов США в год [10].

Проблема снижения зрительных функций у пациентов молодого и среднего возраста в настоящее время актуальна, как никогда ранее. По демографическим данным Финляндии, вероятно, применимым к большинству других стран, можно сделать вывод, что количество операций по замене хрусталика у пациентов молодого и среднего возраста растет с каждым годом [11].

Польский офтальмолог Винсенти Фукала был пионером в области хирургии прозрачного хрусталика и провел первую экстракцию прозрачного хрусталика в 1887 году у пациентов с высокой степенью миопии. Его техника извлечения прозрачного хрусталика стала использоваться во всем мире при высокой степени миопии [12].

В последние годы достижения в области факоэмульсификации и производства интраокулярных линз дали вторую жизнь рефракционной замене хрусталика для лечения пациентов с высокой степенью миопии, дальнозоркости и астигматизма, которым не показана лазерная рефракционная хирургия. Кроме того, лечение пресбиопии с помощью рефракционной замены хрусталика в сочетании с имплантацией мультифокальной или аккомодирующей ИОЛ дает двойное преимущество: коррекция аномалий рефракции и в дальнейшем отсутствие необходимости в проведении операции по удалению катаракты [13].

В 2008 году Zoltan Nagy впервые применил фемтосекундный лазер в хирургии катаракты для проведения начальных этапов операции [14]. С тех пор фемтосекундный лазер используется в катарактальной хирургии для выполнения подготовительных этапов хирургии и с целью снижения ультразвуковой нагрузки.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для написания научного обзора были использованы ресурсы PubMed и Scopus за период до 2023 г. включительно с использованием ключевых слов «zero phaco», «refractive lens exchange», «presbyopia», «femtosecond laser», «U/S phaco», «premium IOL», «refractive error surgery», «endothelial dystrophy». Всего было отобрано 108 статей, относящихся к теме обзора.

В данном обзоре обсуждаются две диаметрально противоположные точки зрения, касающиеся подходов к рефракционной замене хрусталика на основе актуальных данных, с целью предложить максимально современный, безопасный и эффективный метод хирургии.

Единого мнения на этот счет не существует: одни авторы предпочитают стандартный метод хирургии хрусталика с использованием минимальных доз ультразвуковой энергии, а другие — полный отказ от ультразвукового воздействия и замещение этой формы энергии на альтернативную, лазерную.

На сегодняшний день хирургия хрусталика может выполняться с помощью фемтосекундного лазера. Отличительной особенностью данной техники является этап предварительной фрагментации фемтосекундным лазером плотной части ядра хрусталика с учетом данных денситометрии для использования лишь необходимой, дозированной энергии ионизированной плазмы с последующей аспирацией содержимого капсульного мешка и имплантацией мультифокальной или EDOF ИОЛ для исключения зависимости пациента от очковой или контактной коррекции и максимальной зрительной реабилитации после хирургического вмешательства.

В связи с этим появляется возможность полного отказа от ультразвуковой энергии в рамках рефракционной хирургии хрусталика. Учитывая то, что основной контингент пациентов является представителями молодого (25–44) и среднего возраста (45–59), переход с ультразвуковой энергии на более безопасную лазерную остается приоритетным направлением в современной офтальмохирургии.

В общей сложности ультразвуковая факоэмульсификация является золотым стандартом для разрушения ядра хрусталика, обладает достаточно высокой эффективностью и безопасностью. Тем не менее первые данные, указывающие на осложнения после факоэмульсификации, были прежде всего связаны с использованием ультразвуковой энергии в глазу. Один из ранних отчетов по этой теме был опубликован в 1967 году доктором Чарльзом Кельманом, которому приписывают первенство в отношении факоэмульсификации. В своем исследовании он сообщил о ряде осложнений, включая ожог роговицы, турбулентность и воспаление в передней камере глаза, повреждение радужной оболочки и гифему [15].

Факоэмульсификация получила широкое распространение, а ее техника усовершенствовалась, что привело к снижению частоты осложнений. Этапом в эволюции хирургического лечения стала целенаправленная минимизация воздействия энергетического фактора путем снижения повреждающего действия ультразвука за счет повышения вакуума, модуляции ультразвука, добавления функции холодного фако и т.д. В результате этого значительно снизилась энергия потребляемого ультразвука с уменьшением отека роговицы, депигментации радужки и стойкой офтальмогипертензии,

возникающей в результате воздействия ультразвука на цилиарные отростки [16].

Появились различные технические приемы, позволяющие снижать травматичность, энергетическую нагрузку и риск осложнений в ходе операции: началась эра ассистирования вторым инструментом для разламывания и фрагментации, благодаря использованию второго прокола стало возможным выполнение предварительного разделения хрусталика на фрагменты (пречоп), эволюционировала методика чопа, а проведение капсулорексиса обеспечило сохранение физиологической анатомии глаза, в частности, связочного аппарата хрусталика, и обеспечило возможность внутрикапсульной имплантации ИОЛ. Появление вискоэластиков сыграло ключевую роль в протекции роговицы, что позволило сохранять архитектуру роговицы с более быстрым восстановлением зрительных функций. Внедрение фемтосекундного лазера позволило достичь предсказуемый и максимально стандартизированный капсулорексис, что невозможно даже при совершенной мануальной технике [17]. Неравномерность и/или эксцентриситет переднего капсулорексиса увеличивают наклон, децентрацию, ротацию ИОЛ [18]. Было показано, что фемторексис не влияет на величину наклона ИОЛ, хотя влияет на стабильность ее ориентации [19].

При использовании ультразвуковой иглы в полости глаза практически 100 % механической энергии колебаний трансформируется в тепловую, и даже краткосрочная пауза подачи ирригационного раствора может вызвать ожог роговицы [20].

Некоторые авторы утверждают, что переход на более щадящий, торсионный режим ультразвука позволяет снизить количество осложнений, связанных с использованием УЗ-энергии в ходе операции [21, 22]. В то время как другие авторы описывают методы преобразования гидродинамической составляющей офтальмохирургической системы с целью снижения кумулятивной рассеянной энергии ультразвука посредством «активной» ирригации. Эти же авторы описали безопасность и эффективность технологии в сравнительном исследовании по влиянию ультразвуковой и гидромониторной факоэмульсификации на величину потери эндотелиальных клеток и толщину сетчатки в макулярной области [23–25]. Этот метод был затем реализован в технологии Aqualase в системе Infiniti Vision System, разработанной Alcon Inc. [26]. Тем временем ученые из Китая разработали новый инструмент для хирургии катаракты, преобразующий ультразвуковые колебания в режущие колебания пластин наконечника [25]. В литературе также имеются данные о существовании еще одной технологии, предназначенной для замены ультразвука с помощью установки Catapult Med-Logics (США), создающей колебания вакуума при аспирации [27, 28].

Другие авторы предлагают пойти по пути безопасного ультразвука и разработали систему удаления

хрусталика с возможностью использования дозированной ультразвуковой энергии малой мощности [29].

Идея использования ИАГ- или гелий-неоновой лазерной энергии в качестве разрушающего источника при экстракции катаракты, позволяющей полностью отказаться от ультразвука, была реализована в 1995 году отечественными учеными под руководством академика С.Н. Федорова и В.Г. Копаевой. Преимущества этой методики связаны с отсутствием нагрева роговицы и безопасностью лазерного излучения для интраокулярных структур [30]. Была предложена универсальная рукоятка с интегрированным ИАГ-лазерным излучателем, который может быть присоединен к системе ирригации-аспирации факоэмульсификаторов [31]. К преимуществам методики можно отнести отсутствие нагрева и низкое повреждающее действие на эндотелий. Однако недостатком является более высокое потребление ирригационного раствора.

Спустя более 14 лет с момента внедрения в клиническую практику катарактальной хирургии фемтолазерных технологий накопился большой объем информации, демонстрирующей преимущества фемтолазерного компонента в хирургии хрусталика. За последние десять лет фемтофакоэмульсификация стала, возможно, главной и самой обсуждаемой инновацией в области хирургии катаракты малого разреза.

Исследователи на основе метаанализа рандомизированных контролируемых исследований выявили, что использование ФЛАЭК по сравнению с ФЭК позволяет значительно уменьшить энергию ультразвука и эффективное время факоэмульсификации [32]. Другие авторы также сообщают о стабилизации гидродинамических показателей, значительном сокращении общего времени ультразвука на 43 % и уменьшении кумулятивной рассеянной энергии на 28 % при использовании фемтосекундного сопровождения при хирургии катаракты [33]. Работы третьей группы авторов также подтверждают результаты вышеперечисленных исследований, доказывающих достоверное снижение эффективного времени ультразвука при фемтолазерном сопровождении хирургии катаракты [34–37]. R.G. Abell и соавт. полагают, что ФЛАЭК является наиболее современным технологическим решением с точки зрения качества выполнения роговичных разрезов, капсулорексиса и фрагментации хрусталика [38]. Предложенная в НИИГБ им. Краснова технология гибридной факоэмульсификации обеспечивает возможность удаления хрусталика на качественно новом уровне со значительным снижением травматичности и значимости «человеческого фактора» [17].

Первое применение ультразвука было зафиксировано во время Первой мировой войны для обнаружения подводных лодок (гидролокатор). С тех пор УЗ успешно используется для широкого спектра немедицинских и медицинских применений. С середины XX века ультразвук начинает активно внедряться в офтальмологическую

практику. Первое применение ультразвука имело место при консервативном лечении патологии роговицы, зрительного нерва и стекловидного тела [39].

Ультразвук обладает эффектом фонофореза: увеличивает проницаемость клеточных мембран и способствует проникновению лекарственных веществ в клетку [40]. Повышение температуры в результате воздействия ультразвуковых волн вызывает расширение сосудов, что приводит к увеличению метаболической активности и оксигенации тканей. Кроме того, сообщалось об увеличении проницаемости и эластичности клеточных мембран соединительной ткани [41]. Терапевтическое применение ультразвука для повышения проникновения лекарственных средств в клетки и ткани является положительным явлением. Однако усиление проникновения продуктов распада белков хрусталика в окружающие ткани под воздействием энергии ультразвука представляет собой негативный фактор.

На сегодняшний день в мировой офтальмологической практике отсутствуют исследования, доказывающие непосредственную взаимосвязь ультразвукового воздействия с образованием эпиретинальных мембран, прогрессированием хориоретинальной неоваскуляризации, зональным стрессом и, как следствие, формированием дефектов связочного аппарата и децентрацией ИОЛ в отдаленном периоде.

Однако любое использование ультразвукового воздействия в хирургии хрусталика может быть потенциально опасно в долгосрочной перспективе и способно привести к ряду неблагоприятных последствий для связочного аппарата хрусталика, цилиарных отростков и послужить пусковым механизмом для прогрессивного снижения количества эндотелиальных клеток роговицы. Возможным негативным последствием является развитие псевдоэкзофолиативного синдрома, одного из основных факторов риска развития глаукомы и дестабилизации связочного аппарата хрусталика.

Известно, что с возрастом доля шестиугольных клеток уменьшается (плеоморфизм), а коэффициент вариации площади клеток увеличивается. Известно, что плотность эндотелиальных клеток роговицы (ПЭК) меняется на протяжении жизни. С возрастом количество эндотелиальных клеток уменьшается, а коэффициент вариации площади клеток увеличивается, достигая к 60 годам 1400–2500 клеток/мм². Имеет место физиологическая потеря клеток эндотелия (при отсутствии негативных факторов) — 30–40 клеток в день или 0,5–2 % в год [42].

Самыми частыми причинами декомпенсации эндотелиальных клеток являются эндотелиальная дистрофия роговицы Фукса и буллезная кератопатия, возникающие в результате осложненного течения хирургического вмешательства [43].

Дистрофия Фукса представляет собой заболевание с поздним началом и характеризуется медленной прогрессирующей дегенерацией эндотелия роговицы,

что приводит к отеку роговицы и потере зрения [44]. Манифестация заболевания приходится на пятую декаду жизни, что совпадает с началом развития возрастных изменений в хрусталике [22].

Эндотелиальные клетки роговицы человека отвечают за поддержание прозрачности роговицы, регулируя гидратацию стромы роговицы. Воздействие энергии УЗ во время фактоэмульсификации обуславливает механическую травму эндотелия роговицы, что способствует более длительному послеоперационному восстановлению [45].

Повреждение слоя эндотелиальных клеток роговицы является причиной нарушения плотных контактов между эндотелиоцитами, приводит к их стремительной потере и является основной причиной развития буллезной кератопатии [46].

Известные механизмы травматизации эндотелия роговицы включают деформацию роговицы, контакт с интраокулярной линзой, с ядерным фрагментом, образование свободных радикалов, скорость и длительность ирригации-аспирации, турбулентные потоки жидкости, турбулентцию фрагментов хрусталика в передней камере, однако наибольшим повреждающим эффектом на роговицу обладает ультразвуковая энергия [17, 47, 48].

Исследования показывают, что повреждение эндотелия в ходе фактоэмульсификации, связанное с наличием свободных радикалов, обусловлено следующими факторами: высокая скорость циркуляции ирригационного раствора (от 20 до 30 мл/мин), направленная на снижение температуры в переднем отрезке глаза, вымывает физиологические антиоксиданты, которые обычно защищают ткани глаза от повреждения свободными радикалами; тепло от взрыва кавитационных пузырьков вызывает разложение воды, образуются отрицательно заряженные ионы ОН, которые, как известно, являются наиболее активными из различных активных форм кислорода [49].

Независимо от значительных успехов в хирургии переднего отрезка глаза оперативные вмешательства могут привести к повреждению слоя эндотелиальных клеток, следовательно, к хроническому отеку роговицы. В этих случаях повреждение эндотелия может не ограничиваться только центральной зоной роговицы.

Скорость уменьшения числа эндотелиальных клеток в этих случаях обычно выше, чем при эндотелиальной дистрофии Фукса. Тем не менее в разных литературных источниках содержатся данные, в соответствии с которыми ускоренная потеря эндотелиальных клеток продолжается даже спустя 10 лет с момента операции и может привести к декомпенсации через многие годы [50].

О негативном побочном воздействии ультразвука на роговицу в ходе фактоэмульсификации свидетельствует большая потеря клеток эндотелиального слоя роговицы [45, 51]. Было доказано, что уменьшение количества ультразвука, используемого для дробления хрусталика, влияет на реакцию со стороны роговицы. На 1-е сутки после операции отмечается достоверно меньший

отек при использовании фемтосекундной ассистенции при хирургии хрусталика [45, 52].

Группой офтальмохирургов был сделан вывод, что экстракция катаракты с использованием фемтосекундного лазера является операцией выбора при хирургии хрусталика у пациентов с эндотелиальной дистрофией Фукса и делает ее более безопасной и прецизионной [53].

По данным других авторов, пациенты получили максимально высокие зрительные результаты при применении фемтосекундного лазера для префрагментации ядра хрусталика с целью снижения УЗ-травмы эндотелия у пациентов с эндотелиальной дистрофией роговицы Фукса [22, 42, 48]. Это подтверждает концепцию использования фемтосекундного лазера в рамках хирургии хрусталика с целью сохранения морфометрических свойств роговицы у пациентов с дистрофией роговицы Фукса.

Ультразвуковая энергия, вызывающая разрушение хрусталика, также оказывает воздействие на все ткани глаза и выходит за его пределы. В волновой фронт вовлекаются высокочувствительные структуры как переднего, так и заднего отрезка глаза. После проведения ультразвуковой факоэмульсификации в стекловидном теле регистрируются неоднородные перемежающиеся участки уплотнения волокон.

Акустическая волна, достигающая увеального тракта, провоцирует повышение внутриглазного давления и катализирует развитие воспаления в раннем послеоперационном периоде [54, 55]. После ультразвуковой факофрагментации, проведенной на крысах, авторами наблюдалась дезорганизация микроворсинок и микровыступов эпителия цилиарного тела, что может приводить к нарушению его функции [56]. Более ранние изменения в реактивных структурах глаза после факоэмульсификации были описаны в 1998 году в работах С.А. Лившица по разработке оптимальных параметров ультразвукового воздействия при проведении факоэмульсификации катаракты с имплантацией ИОЛ. Были обнаружены выраженные изменения в сосудах микроциркуляторного русла: увеличение количества капилляров, их расширение, стаз крови, увеличение проницаемости сосудов радужной оболочки и ее отростков и, как следствие, отек стромы указанных структур.

Теми же авторами впервые была исследована ультраструктура стекловидного тела при воздействии ультразвука малой мощности и длительности во время факоэмульсификации. Было выявлено утолщение коллагеновых фибрилл, разрежение упаковки фибрилл в зоне базиса стекловидного тела, при наращивании мощности УЗ отмечалось склеивание фибрилл и появление зернистых включений. Механизм деструктивного воздействия на структуры стекловидного тела связывали с деполимеризирующим действием УЗ на гиалуроновую кислоту и непосредственным воздействием УЗ на коллаген матрикса. Было также выявлено слущивание эндотелиальных клеток корнеосклеральной трабекулы,

появление фрагментов эндотелиальных клеток в фонтановых пространствах.

В ходе анализа литературных данных была найдена информация о возможном повреждении сетчатки и других чувствительных структур ультразвуковыми волнами высокой интенсивности, используемыми для лечения глаукомы, если УЗ волны не сфокусированы должным образом [57]. Были также обнаружены сведения о том, что косметические процедуры по омоложению, в основе которых лежит использование интенсивно сфокусированного ультразвука (HIFU), могут вызывать тепловую травму, приводящую к резкому повышению ВГД, а также спазму аккомодации и близорукости в результате теплового повреждения волокон связочного аппарата хрусталика [58].

Одним из предоперационных факторов риска быстрой потери эндотелиальных клеток, снижения гексагональности, увеличения коэффициента дисперсии в молодом возрасте после факоэмульсификации является наличие сахарного диабета (СД) [59, 60]. Воспалительные процессы в сосудистом тракте являются отражением нарушенного иммунного статуса у пациентов с СД [61]. Эпиретинальная мембрана (ERM) может образовываться не только в результате операций, воспаления, травм или опухолей заднего сегмента глаза, но также и при сахарном диабете. Было изучено влияние факоэмульсификации на прогрессирование ERM: толщина фовеальной области постепенно увеличилась на 7,0 % через 12 месяцев после операции в группе пациентов, перенесших стандартную хирургию хрусталика [61]. Высокая эффективность и безопасность лазерной экстракции хрусталика у больных сахарным диабетом позволяют рекомендовать данную технологию для раннего удаления хрусталика при наличии в нем помутнений [62]. В 2003 году David Chang и Steven D. Vargas впервые описали кистозный макулярный отек (КМО) после факоэмульсификации. По современным данным University of Michigan Kellogg Eye Center, в течение одного года после операции по замене хрусталика частота регистрации КМО составляет 1–3 %, наиболее часто она встречается между 2 и 4 месяцами. Макулярный отек является отдаленным следствием высвобождения таких медиаторов воспаления, как интерлейкин-1 β (IL-1 β), интерлейкин-6 (IL-6), фактор некроза опухоли- α (TNF- α), VEGF и другие.

При применении низкоэнергетической лазерной платформы, используемой в исследовании, уровни простагландинов и других цитокинов и медиаторов воспаления во влаге передней камеры оставались низкими, тогда как при стандартной факоэмульсификации при использовании импульсов сравнительно высокой энергии было показано, что уровни цитокинов многократно увеличиваются, также значительно уменьшается толщина макулы во внутреннем слое сетчатки через неделю [63].

Хирургическая коррекция нарушений рефракции остается важной задачей современной офтальмохирургии. Одни считают, что хирургия хрусталика с рефракционной целью менее предпочтительна для молодых пациентов, так как лишает их аккомодации. Однако для коррекции аметропий с учетом высоких требований данной когорты пациентов к качеству зрения и срокам реабилитации разработаны различные модели персонализированных заднекамерных ИОЛ [64, 65]. Исследования других авторов указывают, что менее 1 % пациентов могут быть нетолерантными к мультифокальным ИОЛ [66].

Работы третьей группы авторов подчеркивают высокую эффективность, предсказуемость и стабильность метода коррекции афакии при рефракционной хирургии хрусталика, обеспечивая пациентам хорошие функциональные результаты. [67, 68]. Комбинированный метод с использованием фемтофрагментации позволил исключить зависимость от очков при наличии сопоставимой контрастной чувствительности и высокой удовлетворенности пациентов [69, 70]. Одним из важных моментов является также эффективная зрительная реабилитация, тенденция к получению более широкого диапазона функционального фокуса при использовании EDOF линз у пациентов с пресбиопией. Исследователи отметили меньшее число аберраций в группе пациентов, которым была проведена рефракционная хирургия хрусталика с целью коррекции астигматизма с помощью фемтосекундного лазера и имплантацией торических мультифокальных линз [71]. Было доказано, что имплантация трифокальной ИОЛ в глаза, подвергшиеся фоторефракционной хирургии, достигла превосходной точности и обеспечила хорошие визуальные результаты.

Таким образом, с внедрением метода факоэмульсификации началось и изучение травматических последствий хирургии, параллельно разрабатывались методы их снижения. Благодаря постоянному улучшению технологий и развитию новых методик эволюция хирургии хрусталика никогда не прекращалась. С внедрением в офтальмохирургию фемтосекундных лазеров и мультифокальных и EDOF линз хирургия хрусталика поднялась на новую ступень эволюции.

Несомненно, факоэмульсификация считается одним из самых безопасных и эффективных методов хирургии хрусталика. На сегодняшний день не существует определенной категории пациентов, для которых применение ультразвука в малых дозах являлось бы критичным. Любое хирургическое вмешательство является травматичным: ирригация, турбулентия в передней камере, контакт фрагментов ядра хрусталика или инструментов с эндотелием роговицы, избыточные манипуляции, приводящие к перерастяжению и дестабилизации связочного аппарата, введение красителя, образование свободных радикалов, высвобождение медиаторов воспаления. Основным повреждающим фактором является ультразвуковая энергия. Любое использование

ультразвукового воздействия может быть потенциально опасно для связочного аппарата, цилиарных отростков радужной оболочки, стекловидного тела, сетчатки, способно запустить реакцию прогрессивного снижения количества эндотелиальных клеток роговицы и спровоцировать развитие дистрофии роговицы Фукса. Следует также учитывать, что есть потенциальная опасность для категорий пациентов с дистрофией Фукса, с гормональными и обменными нарушениями, с патологией связочного аппарата и заднего отрезка глаза. Тем самым вводится дополнительная система безопасности для особых групп пациентов с целью минимизации даже малейших рисков хирургического вмешательства.

Несмотря на то что новая методика включает больше этапов, увеличивает общее время операции и не каждая клиника может себе позволить дорогостоящую установку, можно с уверенностью сказать, что эволюция офтальмохирургии продолжается и в настоящее время. Следует уделять пристальное внимание всем факторам, приводящим к операционной травме, среди которых основным является использование ультразвуковой энергии в процессе хирургического лечения. Предлагается переход на новый стандарт безопасной хирургии хрусталика с обеспечением максимальной зрительной реабилитации пациентов в короткий срок, что обеспечивает более безопасную и эффективную хирургию.

Качество зрения и ранняя реабилитация являются двумя клиническими параметрами, определяющими успех операции по замене хрусталика. Достижения в области хирургических методов, инструментов и фармакологических средств внесли свой вклад в революцию в этой области, сделав хирургию хрусталика в значительной степени лишенной рисков. Значительным нововведением в катарактальной хирургии в XX веке явился метод факоэмульсификации, представленный Чарльзом Кельманом в 1967 году с внедрением хирургии с самогерметизацией роговицы.

Между разработкой и внедрением метода прошло много лет, за это время способ был доработан и усовершенствован: система ирригационно-аспирационной факоэмульсификации Cavitron/Kelman предшествовала использованию современного оборудования для факоэмульсификации и была запатентована только в 1971 году.

Был ряд причин, по которым в то время новый метод хирургии катаракты не пользовался большой популярностью. В первую очередь, в семидесятых годах традиционным методом экстракции катаракты считалась интракапсулярная криоэкстракция с последующей очковой коррекцией афакии. Возросший интерес к экстракапсулярной экстракции обусловлен тем, что переход от интракапсулярной экстракции к «классической» экстракапсулярной не требовал серьезной замены инструментария хирурга, специальной технической и хирургической подготовки, освоения новой методики факоэмульсификации.

В свою очередь, появление заднекамерных ИОЛ было событием, которое в наибольшей степени определило быстрое изменение привычек хирургов.

Экстракапсулярная экстракция в итоге выделилась как самостоятельная техника, которую стали использовать для сохранения задней капсулы при имплантации заднекамерных ИОЛ, надеясь избежать трудностей, связанных с изучением методов факоэмульсификации и использованием сложного оборудования, такого как факоэмульсификатор.

Факоэмульсификация внесла изменения в хирургию катаракты. Так, было введено понятие микрохирургического вмешательства. Большое количество осложнений, возникавших изначально, были связаны с отсутствием вископротекторов, непониманием важности защиты эндотелия роговицы и уровнем подготовки хирургов. Интерес к факоэмульсификации обусловил заинтересованность в гибких интраокулярных линзах, позволяющих проводить имплантацию через небольшой разрез с использованием капсулорексиса, обеспечивающего возможность оперировать в пределах капсульного мешка, что делает вмешательство более безопасным. Бесшовная технология обеспечивает получение анатомических и функциональных результатов в кратчайшие сроки и уменьшение индуцированного астигматизма. Появление техники факоэмульсификации — большой шаг в эволюции хирургии хрусталика, который привлек большое внимание хирургов.

Итак, современные методы ФЭК включают использование микроинвазивных техник и инструментов, что максимально уменьшает травматизацию тканей глаза во время операции, способствует снижению количества медиаторов воспаления в передней камере и уменьшает риск развития осложнений после операции.

При отказе от использования ультразвука в пользу только факоаспирации, как это делается при лечении детей, мы наблюдаем отличные результаты благодаря применению вакуумного режима. В данном случае мы предпочли использовать только лазерную энергию и аспирацию, определив градиент плотности ядра по данным денситометрии и другим параметрам, и получаем возможность работать не только с ядром нулевой плотности, но и с ядром определенной консистенции и размера, что влияет на дальнейший объем и распространенность лазерной фрагментации. При более плотной консистенции ядра мы можем переформатировать ультразвуковую систему на единичные, отдельные вспышки в количестве 1–3 ед., прочищающие иголку, что позволит работать со второй степенью плотности ядра.

УЧАСТИЕ АВТОРОВ:

Копяев С.Ю. — научное руководство, концепция исследования, научное редактирование текста, итоговые выводы;
Аракелян Д.Э. — сбор данных, анализ и интерпретация данных, написание текста, подготовка и научное редактирование статьи;
Ильинская И.А. — анализ и интерпретация данных, подготовка и научное редактирование статьи;
Поминаева В.В. — сбор материала, оформление библиографии.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Mushkova IA, Maychuk NV, Karimova AN, Shamsedinova LT. Выявление факторов риска развития послеоперационного астенопического синдрома у пациентов с рефракционными нарушениями. Офтальмология. 2018;15(2S):205–210. Mushkova IA, Maychuk NV, Karimova AN, Shamsedinova LT. Detection of the Risk Factors for Postoperative Asthenopia in Patients with Refractive Disorders. Ophthalmology in Russia. 2018;15(2S):205–210 (In Russ.). doi: 10.18008/1816-5095-2018-2S-205-210.
- Федорова ИС, Копяев СЮ, Кузнецова ТС, Узунян ДГ. Интраокулярная коррекция аметропии крайней степени с применением индивидуальных мультифокальных ИОЛ LentiSMPPlus. Офтальмохирургия. 2013;3:46. Fedorova IS, Kopayev SYu, Kuznetsova TS, Uzunyan DG. Intraocular correction of high-degree ametropia using individual multifocal LentiSMPPlus IOL. Fyodorov Journal of Ophthalmic Surgery. 2013;3:46 (In Russ.).
- Vicary D, Sun XY, Montgomery P. Refractive lensectomy to correct ametropia. J Cataract Refract Surg. 1999 Jul;25(7):943–948. doi: 10.1016/s0886-3350(99)00089-9.
- Ивашина АИ, Пантелеев ЕН, Бессарабов АН, Гахраманова КА. Острога зрения вблизи и клиническая рефракция артифактного глаза при высокой степени гиперметропии. Офтальмохирургия. 2004;2:14–18. Ivashina AI, Pantelev EN, Bessarabov AN, Gakhramanova KA. Near visual acuity and clinical refraction of a pseudophakic eye with a high degree of hypermetropia. Fyodorov Journal of Ophthalmic Surgery. 2004;2:14–18 (In Russ.).
- Davidorf JM, Zaldivar R, Oscherow S. Posterior chamber phakic intraocular lens for hyperopia of +4 to +11 diopters. J Refract Surg. 1998 May-Jun;14(3):306–311. doi: 10.3928/1081-597X-19980501-14.
- Fricke TR, Tahhan N, Resnikoff S, Papas E, Burnett A, Ho SM, Naduvilath T, Naidoo KS. Global Prevalence of Presbyopia and Vision Impairment from Uncorrected Presbyopia: Systematic Review, Meta-analysis, and Modelling. Ophthalmology. 2018 Oct;125(10):1492–1499. doi: 10.1016/j.ophtha.2018.04.013.
- Timothy R, Fricke MS, Nina Tahhan PhD, Serge Resnikoff MD, Eric Papas PhD, Anthea Burnett PhD, Suit May Ho PhD, Thomas Naduvilath PhD, Kavin S. Naidoo PhD. Global Prevalence of Presbyopia and Vision Impairment from Uncorrected Presbyopia: Systematic Review, Meta-analysis, and Modelling. Ophthalmology. 2018 Oct;125(10):1492–1499.
- Малюгин БЭ, Антонян СА. Механизмы аккомодации: исторические аспекты и современные представления. Новое в офтальмологии. 2005;4:45. Malyugin BE, Antonyan SA. Mechanisms of accommodation: historical aspects and modern conception. New in ophthalmology. 2005;4:45 (In Russ.).
- Duane A. Normal values of the accommodation at all ages. JAMA. 1912;59:1010–1013.
- Burton MJ, Ramke J, Marques AP, Bourne RR, Congdon N, Jones I, et al. The Lancet Global Health commission on Global Eye Health: vision beyond 2020. Lancet Glob Health. 2021;9(4):e489–e551.
- Purola PKM, Nättinen JE, Ojamo MUI, Rissanen HA, Gissler M, Koskinen SVP, Uusitalo HMT. Prevalence and 11-Year Incidence of Cataract and Cataract Surgery and the Effects of Socio-Demographic and Lifestyle Factors. Clin Ophthalmol. 2022 Apr 20;16:1183–1195. doi: 10.2147/OPTH.S355191.
- Schmidt D, Grzybowski A, Vincenz Fukala (1847–1911) and the early history of clear-lens operations in high myopia. Saudi J Ophthalmol. 2013 Jan;27(1):41–46. doi: 10.1016/j.sjopt.2012.11.002.
- Kaweri L, Wavikar C, James E, Pandit P, Bhuta N. Review of current status of refractive lens exchange and role of dysfunctional lens index as its new indication. Indian J Ophthalmol. 2020 Dec;68(12):2797–2803. doi: 10.4103/ijo.IJO_2259_20.
- Nagy ZZ, McAlinden C. Femtosecond laser cataract surgery. Eye Vis (Lond). 2015 Jun 30;2:11. doi: 10.1186/s40662-015-0021-7.
- Kelman CD. Phaco-Emulsification and Aspiration: A New Technique of Cataract Removal: A Preliminary Report. Am J Ophthalmol. 2018 Jul;191:xxx–xl. doi: 10.1016/j.ajo.2018.04.014. PMID: 29929630
- Анисимова СЮ, Анисимов СИ, Трубилин ВН, Новак ИВ. Факоэмульсификация катаракты с фемтолазерным сопровождением. Первый отечественный опыт. Катарактальная и рефракционная хирургия. 2012;12(3):7–10. Anisimova SYu, Anisimov SI, Trubilin VN, Novak IV. Femtolasers-assisted phacoemulsification. The first domestic experience. Cataract and Refractive Surgery. 2012;12(3):7–10 (In Russ.).
- Аветисов СЭ, Юсеф ЮН, Юсеф СН, Аветисов КС, Иванов МН, Фокина НД, Асламова АЭ, Алхарики Л. Современные возможности хирургии старческой катаракты. Клиническая геронтология. 2017;11–12:84–90. Avetisov SE, Yusef YuN, Yusef SN, Avetisov KS, Ivanov MN, Fokina ND, Aslamazova AE, Alkharki L. Modern possibilities of senile cataract surgery. Klinicheskaya gerontologiya. 2017;11–12:84–90 (In Russ.).
- Rossi T, Ceccacci A, Testa G, Ruggiero A, Bonora N, D'Agostino I, Telani S, Ripandelli G. Influence of anterior capsulorhexis shape, centration, size, and location on intraocular lens position: finite element model. J Cataract Refract Surg. 2022 Feb 1;48(2):222–229. doi: 10.1097/j.jcrs.0000000000000711.
- Mursch-Edlmayr AS, Pomberger LJ, Hermann P, Wagner H, Beka S, Waser K, Wendelstein J, Podkowinski D, Laubichler P, Siska R, Bolz M. Prospective comparison

Д.Э. Аракелян, С.Ю. Копяев, И. А. Ильинская, В. В. Поминаева

Контактная информация: Аракелян Давид Эдуардович dr.arakelian@icloud.com

- of apex-centered vs standard pupil-centered femtosecond laser-assisted capsulotomy in cataract surgery. *J Cataract Refract Surg.* 2021 May 1;47(5):606–611. doi: 10.1097/j.jcrs.0000000000000496.
20. Шухаев СВ, Науменко ВВ, Бойко ЭВ. Факоэмульсификация катаракты с фемтолазерным сопровождением на глазах с эндотелиальной дистрофией Фукса. Вестник Оренбургского государственного университета. 2015;12:187. Shukhaev SV, Naumenko VV, Boiko EH. Phacoemulsification of cataracts with femtolaser assisted in eyes with Fuchs endothelial dystrophy. *Annals of Orenburg State University* 2015;12:187.
 21. Mehra R., Gupta M., Shakeel T., Dasgupta S. Linear versus Torsional Phacoemulsification: A Comparative Study. *DJO.* 2019;29:48–52. doi: 10.7869/djo.442.
 22. Малюгин БЭ, Антонова ОП, Малутина ЕА. Результаты факоэмульсификации с имплантацией ИОЛ у пациентов с эндотелиальной дистрофией роговицы Фукса. *Офтальмохирургия* 2018;3:19–25. Malugin BE, Antonova OP, Malutina EA. Results of phacoemulsification with IOL implantation in patients with Fuchs endothelial corneal dystrophy. *Fyodorov Journal of Ophthalmic Surgery* 2018;3:19–25 (In Russ.). doi: 10.25276/0235-4160-2018-3-19-25
 23. Азнабаев БМ, Дибаяв ТИ, Мухаметов РГ, Мухамадеев ТР, Идрисова ГМ, Вафиев АС, Исмагилов Т.Н. Медико-технические подходы к энергетической хирургии катаракты: современное состояние вопроса. *Офтальмология.* 2022;19(2):280–285. Aznabaev BM, Dibaev TI, Mukhametov RG, Mukhamadeev TR, Idrisova GM, Vafiev AS, Ismagilov TN. Medical and Technical Approaches to Cataract Energy Surgery: Current Status of the Issue. *Ophthalmology in Russia.* 2022;19(2):280–285 (In Russ.). doi: 10.18008/1816-5095-2022-2-280-285.
 24. Lin J. Apparatus, system, and method of gas infusion to allow for pressure control of irrigation in a surgical system. U.S. patent 2018/0228962 A1.
 25. Азнабаев МТ, Хисматуллин РР. Сравнительная оценка влияния гидромониторной и ультразвуковой факоэмульсификации катаракт на эндотелиальный слой роговицы. *Медицинский вестник Башкортостана.* 2011;6:20–22. Aznabaev MT, Hismatullin RR. Comparative analysis of the effect of hydromonitoring and ultrasonic phacoemulsification of cataracts on the corneal endothelial layer// *Bashkortostan Medical Journal.* 2011;6:20–22 (In Russ.).
 26. Копаев С.Ю., Борзенко С.А., Копаева В.Г., Алборова В.У. Состояние заднего эпителия роговицы после лазерной и ультразвуковой факофрагментации. Электронно-микроскопическое исследование в эксперименте. Сообщение 3. *Офтальмохирургия.* 2015;2:6–9. Kopyaev SYu, Borzenok SA, Kopyaeva VG, Alborova VU. Corneal Endothelium Cells Response after laser and ultrasound phacofragmentation. Electron microscopy in experiment. Report 3. *Fyodorov Journal of Ophthalmic Surgery* 2015;2:6–9.
 27. Mendez A, Manriquez AO. Comparison of Effective Phacoemulsification and Pulsed Vacuum Time for Femtosecond Laser-Assisted Cataract Surgery. *ASCRS Cornea Congress.* SanDiego, 2015.
 28. Юсеф С.Н. Модифицированная технология гибридной факоэмульсификации. Вестник офтальмологии. 2015;3:56–60. Yusef SN. Modified technique of hybrid phacoemulsification. *Annals of Ophthalmology.* 2015;131(3):56–60. doi: 10.17116/oftalma2015131356-60.
 29. Азнабаев БМ, Дибаяв ТИ, Мухамадеев ТР, Вафиев АС, Идрисова ГМ. Modern aspects of using of ultrasonic energy in cataract and vitreoretinal surgery. *Journal of Ophthalmology (Ukraine).* 2021;3:500.
 30. Копаев С.Ю., Малюгин БЭ, Копаева В.Г. Лазерная энергия в хирургии катаракты Точка зрения Восток – Запад. 2016;1:59–61. Kopyaev SYu, Malugin BE, Kopyaeva VG. Laser Cataract Surgery. POINT OF VIEW. EAST – WEST. 2016;1:59–61.
 31. Modl S, Ruf E, Sauder G. Nano-laser photophagmentation. *J. Cutting Edge of Ophthalmic Surgery.* 2017:89–91.
 32. Малюгин БЭ, Паштаев НП, Куликов ИВ, Пикусова СМ, Крестова ИМ, Крестов ДС. Сравнительный анализ клинико-функциональных результатов традиционной и фемтолазерассистированной факоэмульсификации. Вестник офтальмологии. 2019;135(5):54–60. Malugin BE, Pashtaev NP, Kulikov IV, Pikusova SM, Krestova IM, Krestov DM. Comparison of clinical and functional results of conventional and femtosecond laser-assisted cataract phacoemulsification. *Vestnik Oftalmologii.* 2019;135(5):54–60 (In Russ.). doi: 10.17116/oftalma201913505154.
 33. Тепловодская ВВ, Хусанбаев HSH, Морина НА, Судаква ЕП. Технологическое оснащение хирургии катаракты фемтолазерным сопровождением. Вестник офтальмологии. 2019;135(3):128–136. Teplovodskaya VV, Husanbaev HSH, Morina NA, Sudakova EP. Femtosecond laser-assisted cataract surgery. *Vestnik Oftalmologii.* 2019;135(3):128–136 (In Russ.). doi: 10.17116/oftalma2019135031128.
 34. Reddy KP, Kandulla J, Auffarth GU. Effectiveness and safety of femtosecond laser-assisted lens fragmentation and anterior capsulotomy versus the manual technique in cataract surgery. *J Cataract Refract Surg.* 2013 Sep;39(9):1297–1306. doi: 10.1016/j.jcrs.2013.05.035.
 35. Abell RG, Kerr NM, Vote BJ. Toward zero effective phacoemulsification time using femtosecond laser pretreatment. *Ophthalmology.* 2013;120(5):942–948. doi: 10.1016/j.ophtha.2012.11.045.
 36. Hatch KM, Schultz T, Talamo JH, Dick HB. Femtosecond laser-assisted compared with standard cataract surgery for removal of advanced cataracts. *J Cataract Refract Surg.* 2015;41(9):1833–1838. doi: 10.1016/j.jcrs.2015.10.040.
 37. Abell RG, Allen PL, Vote BJ. Anterior chamber flare after femtosecond laser-assisted cataract surgery. *J Cataract Refract Surg.* 2013;39:1321–1326. doi: 10.1016/j.jcrs.2013.06.009.
 38. Abell RG, Kerr NM, Vote BJ. Femtosecond laser-assisted cataract surgery compared with conventional cataract surgery. *Clin. Experiment. Ophthalmol.* 2013;41:455–462. doi: 10.1111/ceo.12025/.
 39. Quarato CMI, Lacedonia D, Salvemini M, Tuccari G, Mastrodonato G, Villani R, Fiore LA, Scioscia G, Mirijello A, Saponara A, Sperandeo M. A Review on Biological Effects of Ultrasounds: Key Messages for Clinicians. *Diagnostics (Basel).* 2023 Feb 23;13(5):855. doi: 10.3390/diagnostics13050855.
 40. Содиков НО, Содиков МН. Ультразвук в медицине. Наука, техника и образование. 2020;8:72. Sodikov NO, Sodikov MN. Ultrasound in medicine. *Science, Technology and Education.* 2020;8:72.
 41. Ortanca B, Armağan O, Baklan F, Özgen M, Berkan F, Öner S. A randomized-controlled clinical trial comparing the effects of sther phonophoresis and therapeutic ultrasound in carpal tunnel syndrome. *Arch Rheumatol.* 2022 Jun 18;37(4):517–526. doi: 10.46497/ArchRheumatol.2022.9095.
 42. Schroeter A, Kropp M, Cvejic Z, Thumann G, Pajic B. Comparison of Femtosecond Laser-Assisted and Ultrasound-Assisted Cataract Surgery with Focus on Endothelial Analysis. *Sensors.* 2021;21:996. doi: 10.3390/s21030996.
 43. Труфанов СВ, Саловарова ЕП. Дисфункция эндотелиального слоя роговицы: этиопатогенез и современные подходы к лечению Российский медицинский журнал. Клиническая офтальмология. 2019;19(2):116–119. Trufanov SV, Salovarova EP. Corneal endothelial dysfunction: etiology, pathogenesis, and current treatment approaches. *Russian Medical Journal. Clinical Ophthalmology.* 2019;19(2):116–119.
 44. Price MO, Mehta JS, Jurkunas UV, Price FW. Corneal endothelial dysfunction: Evolving understanding and treatment options, *Progress in Retinal and Eye Research.* 2021;82:100904.
 45. Abell RG, Kerr NM, Howie AR, Mustafa Kamal MA, Allen PL, Vote BJ. Effect of femtosecond laser-assisted cataract surgery on the corneal endothelium. *J Cataract Refract Surg.* 2014;40(11):1777–1783. doi: 10.1016/j.jcrs.2014.05.031.
 46. Дроздова ЕА, Зурочка АВ, Давыдова ЕВ, Кузнецов АА. Эффективность и безопасность комбинированного лечения катаракты и неоваскулярной возрастной макулярной дегенерации. *Медицинский вестник Башкортостана.* 2021;4:94. Drozdova EA, Zurochka AV, Davydova EV, Kuznetsov AA. Efficacy and safety of combined treatment of cataract and neovascular age-related macular degeneration. *Bashkortostan medical journal.* 2021;4:94.
 47. Hayashi K, Yoshida M, Manabe S-I, Hirata A. Cataract surgery in eyes with low corneal endothelial cell density. *J. Cataract Refract. Surg.* 2011;37:1419–1425. doi: 10.1016/j.jcrs.2011.02.025.
 48. Chen HC, Huang CW, Yeh LK, Hsiao FC, Hsueh YJ, Meir YJ, Chen KJ, Cheng CM, Wu WC. Accelerated Corneal Endothelial Cell Loss after Phacoemulsification in Patients with Mildly Low Endothelial Cell Density. *J Clin Med.* 2021 May 24;10(11):2270. doi: 10.3390/jcm10112270. PMID: 34073857. PMCID: PMC8197237.
 49. Benitez Martinez M, Baeza Moyano D, González-Lezcano RA. Phacoemulsification: Problems for Improvement in Its Application. *Healthcare (Basel).* 2021 Nov 22;9(11):1603. doi: 10.3390/healthcare9111603.
 50. Аветисов СЭ, Мамиконян ВР, Труфанов СВ, Осипян ГА. Селективный принцип современных подходов в кератопластике. Вестник офтальмологии. 2013;129(5):97–103. Avetisov SE, Mamikonian VR, Trufanov SV, Osipyan GA. Selective principle of modern approaches in keratoplasty. *Vestnik Oftalmologii.* 2013;129(5):97–103 (In Russ.).
 51. Zhu DC, Shah P, Feuer WJ, Shi W, Koo EH. Outcomes of conventional phacoemulsification versus femtosecond laser-assisted cataract surgery in eyes with Fuchs endothelial corneal dystrophy. *J Cataract Refract Surg.* 2018 May;44(5):534–540. doi: 10.1016/j.jcrs.2018.03.023.
 52. Ty Ang RE, Salcedo Quinto MM, Marquez Cruz E, Reyes MC. Rivera and Gladness Henna Austria Martinez Comparison of clinical outcomes between femtosecond laser-assisted versus conventional phacoemulsification. *Eye and Vision.* 2018;5:8. doi: 10.1186/s40662-018-0102-5.
 53. Kolb CM, Shajari M, Mathys L, Herrmann E, Petermann K, Mayer WJ, Priglinger S, Kohnen T. Comparison of femtosecond laser-assisted cataract surgery and conventional cataract surgery: a meta-analysis and systematic review. *J Cataract Refract Surg.* 2020 Aug;46(8):1075–1085. doi: 10.1097/j.jcrs.0000000000000228.
 54. Копаева ВГ, Копаев С.Ю. Обобщение 15-летнего опыта лазерной хирургии катаракты. *Практическая медицина.* 2013;1–3:70. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obobshchenie-15-letnego-opyta-lazernoy-hirurgii-katarakty> (дата обращения: 17.07.2023). Kopyaeva VG, Kopyaev SYu. 15 years' experience of cataract laser surgery// *Practical medicine.* 2013;1–3:70.
 55. Ekström C. Elevated intraocular pressure and pseudoexfoliation of the lens capsule as risk factors for chronic open-angle glaucoma. *Acta Ophthalmologica.* 1993;71:189–195.
 56. Копаев С.Ю., Копаева ВГ, Борзенко СА, Алборова ВУ. Состояние эпителия цилиарного тела после лазерной и ультразвуковой факофрагментации. Электронно-микроскопическое исследование в эксперименте. Сообщение 2. *Офтальмохирургия.* 2014;1:238. Kopyaev SYu, Kopyaeva VG, Borzenok SA, Alborova VU. Corneal Endothelium Cells Response after laser and ultrasound phacofragmentation. Electron microscopy in experiment. Report 2. *Fyodorov Journal of Ophthalmic Surgery* 2014;1:238.
 57. Fink F, Schmitz-Valckenberg C. *Ultrasound Med Biol.* 2018 May;44(5):904–912. doi: 10.1016/j.ultrasmedbio.2017.12.018.
 58. Chen Y, Shi Z, Shen Y. Eye damage due to cosmetic ultrasound treatment: a case report. *BMC Ophthalmol.* 2018 Aug 29;18(1):214. doi: 10.1186/s12886-018-0891-2.

59. Lee JS, Oum BS, Choi HY, Lee JE, Cho BM. Differences in corneal thickness and corneal endothelium related to duration in Diabetes. *Eye*. 2006;20:315–318. doi: 10.1038/sj.eye.6701868.
60. Luttly GA. Effects of Diabetes on the Eye. *Investig. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2013;54:ORSF81–ORSF87. doi: 10.1167/iows.13-12979.
61. Копаев СЮ, Пыцкая НВ, Копаева ВГ, Меньшиков АЮ. Хирургия катаракты при сахарном диабете. Практическая медицина. 2017;9:110. Кораев SYu, Пускава NV, Копаева VG, Men'shikov AYU. Cataract surgery for diabetes mellitus. *Practical medicine*. 2017;9:110.
62. Юсеф Наим Юсеф, Воробьева МВ, Казарян ЭЭ, Школяренко НЮ. Особенности фактоэмульсификации при макулярной патологии. Часть 1. Диагностические аспекты. *Офтальмология*. 2021;18(3S):623–629. Yusef NYu, Vorobyeva MV, Kazaryan EE, Shkolyarenko NYu. Features of Phacoemulsification in Macular Pathology. Part 1. Diagnostic Aspects. *Ophthalmology in Russia*. 2021;18(3S):623–629 (In Russ.). doi: 10.18008/1816-5095-2021-3S-623-629.
63. Menapace R, Schartmüller D, Röggl V, Reiter GS, Leydolt C, Schwarzenbacher L. Ultrasound energy consumption and macular changes with manual and femtosecond-assisted high-fluidics cataract surgery: a prospective randomized comparison. *Acta Ophthalmol*, 2022;100:e414–e422. doi: 10.1111/aos.14983.
64. Бойко ЭВ, Титов АВ, Мирсаитова ДР. Возможности коррекции миопии высокой степени, в том числе с астигматическим компонентом персонифицированными заднекамерными хрусталиковыми контактными линзами. Современные технологии в офтальмологии. 2019;5:178–183. Boiko EV, Titov AV, Mirsaitova DR. Possibilities of high myopia and astigmatism correction using implantation of posterior chamber Implantable Phakic Contact Lens (IPCL). *Sovremennye tekhnologii v oftal'mologii zhurnal*. 2019;5:178–183. doi: 10.25276/2312-4911-2019-5-178-183.
65. Leyland M, Zinicola E. Multifocal versus monofocal intraocular lenses in cataract surgery: a systematic review. *Ophthalmology*. 2003 Sep;110(9):1789–1798. doi: 10.1016/S0161-6420(03)00722-X.
66. Venter JA, Pelouskova M, Collins BM, Schallhorn SC, Hannan SJ. Visual outcomes and patient satisfaction in 9366 eyes using a refractive segmented multifocal intraocular lens. *J Cataract Refract Surg*. 2013 Oct;39(10):1477–1484. doi: 10.1016/j.jcrs.2013.03.035.
67. Bilgehan Sezgin Asena. Рефракционные результаты, острота зрения, независимость от очков и оптические феномены после удаления катаракты или рефракционной замены прозрачного хрусталика: сравнение двух моделей трифокальных интраокулярных линз. Новое в офтальмологии, 2020;1: Bilgehan Sezgin Asena. Refractive outcomes, visual acuity, spectacle independence and optical phenomena after cataract extraction or refractive clear lens exchange: a comparison of two models of trifocal intraocular lenses. *New in ophthalmology* 2020;1:
68. Cobo-Soriano R, Ortega-Usobiaga J, Rodríguez-Gutiérrez B, Tejerina V, Llovet F, Casco B, Baviera J. Trifocal intraocular lens implantation in eyes with previous corneal refractive surgery for myopia and hyperopia. *J Cataract Refract Surg*. 2021 Oct 1;47(10):1265–1272. doi: 10.1097/j.jcrs.0000000000000637.
69. Böhm M, Hemkepler E, Herzog M, Schönbrunn S, deLorenz N, Petermann K MSc, Kohnen T. Comparison of a panfocal and trifocal diffractive intraocular lens after femtosecond laser-assisted lens surgery. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*. 2018 Dec;44(12):1454–1462. doi: 10.1016/j.jcrs.2018.07.060.
70. Салиев ИФ, Юсупов АФ, Мухамедова НИ, Захидов АБ. Рефракционная замена хрусталика с имплантацией трифокальных интраокулярных линз при миопии высокой степени. Журнал теоретической и клинической медицины, 2022;3:134–138. Saliev IF, Yusupov AF, Mukhamedova NI, Zakhidov AB. Refractive lens exchange with implantation of trifocal intraocular lenses in high degree myopia. // *Zhurnal teoreticheskoi i klinicheskoi meditsiny*, 2022;3:134–138.
71. Lee JA, Song WK, Kim JY, Kim MJ, Tchah H. Femtosecond laser-assisted cataract surgery versus conventional phacoemulsification: Refractive and aberrometric outcomes with a diffractive multifocal intraocular lens. *J Cataract Refract Surg*. 2019 Jan;45(1):21–27. doi: 10.1016/j.jcrs.2018.08.032.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

НИИЦ МНТК «Микрохирургия глаза» им. академика С.Н. Федорова
Министерства здравоохранения Российской Федерации
Аракелян Давид Эдуардович
врач-офтальмолог, аспирант отдела хирургии хрусталика
и интраокулярной коррекции
Бескудниковский бульвар, 59а, Москва, 127486, Российская Федерация
<https://orcid.org/0009-0003-2181-2358>

НИИЦ МНТК «Микрохирургия глаза» им. академика С.Н. Федорова
Министерства здравоохранения Российской Федерации
Сергей Юрьевич Копаев
доктор медицинских наук, заведующий отделом хирургии хрусталика
и интраокулярной коррекции
Бескудниковский бульвар, 59а, Москва, 127486, Российская Федерация
<https://orcid.org/0000-0001-5085-6788>

ФГАУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н. И. Пирогова» Министерства здравоохранения Российской Федерации
Ирина Анатольевна Ильинская
кандидат медицинских наук, доцент
ул. Островитянова, 1, Москва, 117997, Российская Федерация
<https://orcid.org/0000-0002-2921-9781>

ФГАУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н. И. Пирогова» Министерства здравоохранения Российской Федерации
Вероника Владиславовна Поминова
клинический ординатор
ул. Островитянова, 1, Москва, 117997, Российская Федерация

ABOUT THE AUTHORS

The S. Fyodorov Eye Microsurgery Federal State Institution
Arakelyan David E.
postgraduate of the Lens Surgery and Intraocular Correction department
Beskudnikovskiy blvd., 59A, Moscow, 127486,
Russian Federation
<https://orcid.org/0009-0003-2181-2358>

The S. Fyodorov Eye Microsurgery Federal State Institution
Kopaev Sergei Yu.
MD, head of the Lens Surgery and Intraocular Correction department
Beskudnikovskiy blvd., 59A, Moscow, 127486,
Russian Federation
<https://orcid.org/0000-0001-5085-6788>

Pirogov Russian National Research Medical University
Il'inskaya Irina A.
PhD, ophthalmologist, Associate Professor
Ostrovityanov str., 1, Moscow, 117437,
Russian Federation
<https://orcid.org/0000-0002-2921-9781>

Pirogov Russian National Research Medical University
Pominova Veronika V.
resident
Ostrovityanov str., 1, Moscow, 117437,
Russian Federation