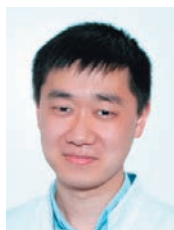


Аберрации высшего порядка — выбор оптимальной интраокулярной коррекции при хирургическом лечении катаракты. Обзор литературы

Д.А. Хван^{1,2}Г.А. Федяшев^{1,2}

¹ ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный медицинский университет»
Министерства здравоохранения Российской Федерации
пр-т Острякова, 2, Владивосток, 690002, Российская Федерация

² ООО «Приморский центр микрохирургии глаза»
ул. Борисенко, 100е, Владивосток, 690088, Российская Федерация

РЕЗЮМЕ

Офтальмология. 2024;21(1):51–57

Роговица является самым мощным преломляющим элементом глаза и играет фундаментальную роль в качестве зрения. Несовершенство формы роговицы приводит к формированию ошибок фокусировки, известных как оптические аберрации, именно они несут ответственность за ухудшение зрительных характеристик. Понимание и оценка ошибок волнового фронта при выборе и расчете ИОЛ имеет большое значение для достижения максимального оптического результата в послеоперационном периоде.

В статье приводятся литературные данные о влиянии аберраций высшего порядка на качество зрения в неоперированных глазах, об изменениях волнового фронта в глазах после проведенных хирургических вмешательств на роговице, влиянии различного типа ИОЛ (сферических, асферических, мультифокальных и EDOF) на общую ошибку волнового фронта глаза, рекомендациях по их выбору при различных степенях выраженности оптических аберраций, а также о перспективных направлениях исследований в сфере данной проблематики.

Ключевые слова: оптические аберрации, мультифокальные ИОЛ, ИОЛ с увеличенной глубиной фокуса, контрастная чувствительность, негативные оптические явления

Для цитирования: Хван Д.А., Федяшев Г.А. Аберрации высшего порядка — выбор оптимальной интраокулярной коррекции при хирургическом лечении катаракты. Обзор литературы. *Офтальмология*. 2024;21(1):51–57. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2024-1-51-57>

Прозрачность финансовой деятельности: работа выполнена в рамках научной темы рег. № НИОКТР 122101000017-1.

Конфликт интересов отсутствует.



Higher-order Aberrations — the Choice of Optimal Intraocular Correction in the Surgical Treatment of Cataracts.

Review of the Literature

D.A. Khvan^{1,2}, G.A. Fedyashev^{1,2}

¹ Pacific State Medical University

Ostryakova ave., 2, Vladivostok, 690002, Russian Federation

² Primorskii center of Eye Microsurgery

Borisenko str., 100e, Vladivostok, 690088, Russian Federation

ABSTRACT

Ophthalmology in Russia. 2024;21(1):51–57

The cornea is the most powerful refractive element of the eye and plays a fundamental role in the quality of vision. Imperfection of corneas shape leads to the focusing errors formation, known as optical aberrations, which are responsible for visual performance deterioration. Understanding and assessing wavefront errors in IOL selection and calculation is great importance to achieve maximum optical outcome in the postoperative period.

The article presents literature data of the effect of higher-order aberrations on the vision quality in unoperated eyes, changes of the wavefront in the eyes after cornea surgical interventions, the effect of various types of IOLs (spherical, aspherical, multifocal and EDOF) on the total error of the eye wavefront, recommendations at their choice with different severity levels of optical aberrations, as well as promising areas of research on this issue.

Keywords: optical aberrations, multifocal IOLs, extended depth of focus IOLs, contrast sensitivity, negative optical phenomena

For citation: Khvan D.A., Fedyashev G.A. Higher-order Aberrations — the Choice of Optimal Intraocular Correction in the Surgical Treatment of Cataracts. Review of the Literature. *Ophthalmology in Russia*. 2024;21(1):51–57. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2024-1-51-57>

Financial Disclosure: The work was carried out within the framework of the scientific topic reg. № НИОКТР 122101000017-1.

There is no conflict of interests.

Волновой фронт — это концептуальная поверхность, которая соединяет все световые лучи, выходящие из точечного источника, с одной и той же временной фазой, с одинаковой длинной оптического пути. В идеальной оптической системе, например в идеальном глазу, все лучи, формирующие изображение, будут совпадать по фазе, в результате этого получится сферический волновой фронт с центром в этой точке изображения. Однако в реальности глаз не является идеальной системой, поскольку в ней присутствует масса оптических дефектов (аббераций) [1].

F. Zernike для описания аббераций (оптических дефектов) волнового фронта, применив математический формализм, ввел понятие полиномов. Данный метод позволяет представить волновой фронт как серию полиномов, подробно описывающих все входящие в его состав оптические абберации. Каждый полином связан с конкретным типом абберации и выражается в виде моды: Z_{mn} , где m — положительное или отрицательное число, описывающее меридиональную частоту моды полинома, а n — целое число, отражающее синусоидальную частоту моды полинома.

Оптические абберации подразделяют на абберации низшего (1-го и 2-го, или low order aberrations, LOA) и высшего (3-го и 4-го, или high order aberrations, HOA) порядка. Абберации 1-го порядка, или Tilt, характеризуют действие призмы, т.е. наклон относительно вертикальной (Z_1^{-1}) или горизонтальной (Z_1^1) оси. Как и нулевой

полином (Z_0^0), Tilt обычно не учитывается при измерении абберационного волнового фронта. Абберации 2-го порядка включают в себя дефокус или аметропию (Z_2^0) и астигматизм (Z_2^{-2} , Z_2^2). К наиболее значимым абберациям 3-го и 4-го порядка относятся кома (Z_3^{-1} , Z_3^1), сферическая абберация (Z_4^0) и трейфол (Z_3^{-3} , Z_3^3) [2].

Световые лучи, проходящие через абберационную систему, придут к точке изображения с разными фазами, так как они прошли разные оптические пути. Эти лучи создают абберационный волновой фронт, форма которого отклоняется от идеальной. Отклонение этого фактического волнового фронта от его идеальной сферической формы является оптической разницей пути (OPD — optical path difference), также называемой ошибкой волнового фронта [1].

В отличие от аббераций более низкого порядка (расфокусировка и астигматизм), абберации более высокого порядка не могут быть исправлены очковыми линзами, но влияют на зрение настолько, насколько их порядок низок, а их положение близко к высоте пирамиды Цернике.

В стандарты Американского оптического общества включены абберации вплоть до 7-го порядка. Однако в ходе проведения клинических исследований было доказано, что при остроте зрения 1.0 оптические абберации выше 4-го порядка не влияют на остроту зрения и контрастную чувствительность. Одновременно с этим

ранее проведенные исследования показали, что в нормальном глазу с эмметропической рефракцией преобладают aberrации не выше 2-го порядка, а более высокие полиномы стремятся к нулевому значению. Исследования E.A. Villegas и P. Artal также подтверждают, что более 90 % всех aberrаций волнового фронта приходится на aberrации низшего порядка, 80 % из них относится к дефокусу или аметропии. Это достигается за счет симметрии расположения оптических центров и прозрачности структур преломляющих сред глаза.

Чем сложнее поверхность роговицы, тем большее количество полиномов Цернике требуется для анализа ее формы в частности и волнового фронта глаза в целом [3].

ОПТИЧЕСКИЕ АБЕРРАЦИИ В НЕОПЕРИРОВАННЫХ ГЛАЗАХ

В нормальных неоперированных глазах aberrации более высокого порядка незначительны, и при этом преобладает сферическая aberrация, Z_4^0 в экспансии Цернике. Эта aberrация обычно положительна на поверхности роговицы, но у молодых она компенсируется внутренней оптикой глаза. С возрастом этот баланс нарушается, aberrации высшего порядка удваиваются, сферическая aberrация становится положительной. Рефракционным последствием сферической aberrации является сдвиг субъективной рефракции в сторону миопии с положительной и в сторону дальнозоркости с отрицательной сферической aberrацией. В любом случае сферическая aberrация, по мнению многих исследователей, оказывает значительное влияние на остроту зрения, контрастную чувствительность и приводит к увеличению глубины фокуса [4, 5].

Как положительные, так и отрицательные aberrации снижают качество изображения; поэтому при оценке оптических характеристик нас в первую очередь должна интересовать их величина без учета знака. Таким образом, при описании aberrаций исследователю необходимо ссылаться на среднее значение абсолютных, а не знаковых коэффициентов Цернике [6].

Второй по значимости aberrацией является кома, которая также снижает контрастную чувствительность и остроту зрения и может влиять на форму воспринимаемого изображения. Уровень комы, а также количество других aberrаций более высокого порядка, за исключением сферической aberrации, не меняются в человеческом глазу с возрастом [7].

Хотя отрицательное влияние aberrаций более высокого порядка на зрительные функции хорошо продемонстрировано во многих литературных источниках, в двух опубликованных исследованиях не удалось показать корреляцию между отсутствием aberrаций и сверхнормальным зрением. Общеизвестным фактом, подтвержденным исследованием Cheng и соавт., является то, что влияние aberrаций на зрительные функции ослабевает соответственно степени расширения зрачка.

Волновые aberrации не являются независимыми и имеют возможность наслаиваться друг на друга, соз-

давая при этом более плоские фронтальные волны по направлению к центру зрачка.

Согласно основной массе исследований главным источником aberrаций является роговица глаза, а хрусталик — структурой, нивелирующей данные оптические дефекты. Повышение высоты и интенсивности роговичных aberrаций с возрастом многими авторами объясняются снижением эластичности хрусталикового вещества. Схожий механизм наблюдается в глазах после проведенного хирургического вмешательства на хрусталике. Вследствие этого возникла идея формирования интраокулярной линзы (ИОЛ) со свойствами, нивелирующими НОА роговицы.

ОПТИЧЕСКИЕ АБЕРРАЦИИ ПОСЛЕ ХИРУРГИЧЕСКИХ ВМЕШАТЕЛЬСТВ НА РОГОВИЦЕ

A. Yagci и соавт. в исследовании, касающемся качества зрения после сквозной кератопластики, определили, что статистически значимой разницы, касающейся контрастной чувствительности, средней светочувствительности центральной сетчатки, среднеквадратичного значения aberrаций низшего порядка по Цернике, по сравнению с пациентами без аномалий рефракции не было. Однако разница среднеквадратичного значения aberrаций высшего порядка Цернике была статистически значимой по сравнению с контрольной группой [8].

M.L. Salvetat и соавт. сравнили aberrации высокого порядка после традиционной сквозной кератопластики (СКП), глубокой передней послойной кератопластики (DALK — deep anterior lamellar keratoplasty) и автоматизированной послойной терапевтической кератопластики (ALTK — automated lamellar therapeutic keratoplasty) у пациентов, перенесших трансплантацию роговицы по поводу кератоконуса. Для оценки aberrаций высокого порядка передней и задней поверхности роговицы в пределах 4-мм и 6-мм зоны исследование проводили при помощи вращающейся Шеймпфлюг-камеры. Было выявлено, что как в 4-мм, так и в 6-мм центральной зоне общие НОА с передней поверхности роговицы были значительно ниже при DALK, чем при ALTK и СКП. Суммарные НОА с задней поверхности были сопоставимы в послеоперационных группах. Компоненты aberrаций, которые были значительно выше, включали кому в глазах ALTK, трилистник и кому в глазах DALK и трилистник при СКП [9]. T. Yamaguchi и соавт. провели схожее исследование, но при этом показали, что нарушение параллелизма передней и задней поверхностей при автоматизированной эндотелиальной кератопластике с удалением десцеметовой мембраны (DSAEK — Descemet stripping automated endothelial keratoplasty) вызывает потерю способности задней поверхности компенсировать aberrации передней поверхности по сравнению с СКП и DALK [10].

Результаты исследования H. Kobashi и соавт. продемонстрировали, что максимально скорректированная

острота зрения была в значительной степени связана с объективным индексом рассеяния и НОА роговицы, но не с денситометрией в глазах после СКП. Это позволило предположить, что прямое внутриглазное рассеяние и НОА роговицы играют существенную роль в зрительных функциях после СКП [11].

СФЕРИЧЕСКИЕ ИНТРАОКУЛЯРНЫЕ ЛИНЗЫ И АБЕРРАЦИИ ВЫСШЕГО ПОРЯДКА

Исследование, изучающее влияние сферических интраокулярных линз на общую ошибку волнового фронта глаза, показало, что они увеличивают положительную сферическую aberrацию роговицы с небольшим влиянием на другие виды оптических дефектов. Эти результаты, полученные с помощью устройства Хартмана — Шака, были подтверждены с использованием датчика Чернинга P. Iseli и соавт., которые подчеркнули неспособность простой топографии представить глазные aberrации при артификации [12].

Другие недавние исследования были сосредоточены на изучении различий между влиянием доступных моделей ИОЛ на оптические aberrации в артификачных глазах. Так, F. Taketani и соавт. сравнили две конструкции линз Alcon Acrysof (Alcon, Техас, США), обнаружив несколько меньшую сферическую aberrацию у линз с более изогнутой передней поверхностью, но только при диаметре апертуры зрачка 6 мм [13]. В аналогичном исследовании K.M. Rocha и соавт. обнаружили, что линзы Alcon Acrysof ReSTOR, MA30 и SA30 формируют аналогичные aberrации более высокого порядка, но дифракционная линза показала самую низкую сферическую aberrацию [14]. Связь между индуцированной сферической aberrацией и положительной оптической силой интраокулярной линзы была продемонстрирована P. Padmanabhan и соавт. на интраокулярных линзах Alcon Acrysof MA60BM [15].

R.G. Martin, D.R. Sanders сравнили четыре типа интраокулярных линз и материалов: колламер Staar, силикон Staar, AMO Sensar (AMO, Санта-Ана, Калифорния, США) и Alcon Acrysof SA60. Они обнаружили значительно более низкий уровень aberrаций высшего порядка с колламером Staar, чем с интраокулярными линзами Alcon Acrysof, никакие другие различия не были статистически значимыми [16]. О дальнейшем сравнении различных интраокулярных линз сообщили C. Rohart и соавт., что снова указывает на худшие результаты с Acrysof MA60AC по сравнению с Ioltech XLSTABI [17]. Интересно, что из никто из авторов не рассмотрел форму поверхностей и показатель преломления материала в качестве возможных причин увеличения сферической aberrации, наблюдаемой в случаях имплантации интраокулярной линзы Acrysof.

АСФЕРИЧЕСКИЕ ИОЛ И АБЕРРАЦИИ ВЫСШЕГО ПОРЯДКА

Из всех aberrаций, представленных в пирамиде Цернике, интраокулярные линзы могут нейтрализовать только сферическую aberrацию, что связано

с единственной ротационно симметричной aberrацией, и, следовательно, она не требует какого-либо определенного вращения корригирующей интраокулярной линзы внутри глаза. В настоящее время существуют разные подходы к асферическим интраокулярным линзам: корригирующий, нейтральный и оптимизирующий.

Асферическая ИОЛ была разработана с фиксированной величиной отрицательной сферической aberrации, предназначенной для компенсации средней положительной сферической aberrации роговицы. При оптической зоне 6,0 мм сферическая aberrация здоровой роговицы составляет примерно $(+0,27 \pm 0,09 \text{ мкм})$. Чтобы оставить сферическую aberrацию глаза на уровне как у нормальных молодых людей $(+0,1 \text{ мкм})$ или свести к минимуму сферическую aberrацию глаза, асферическая ИОЛ была скорректирована в основном от $-0,17$ до $-0,27 \text{ мкм}$ [18].

КОРРЕКТИРУЮЩИЕ ИОЛ

Целью корректирующего подхода является создание глаза с нулевой сферической aberrацией, что создаст наилучшее оптическое качество с максимальной резкостью изображения на сетчатке и, как следствие, с последующим улучшением остроты зрения и контрастной чувствительности. Для этого интраокулярная линза должна иметь отрицательную сферическую aberrацию, чтобы сбалансировать положительную сферическую aberrацию поверхности роговицы.

AMO Tecnis Z9000 была первой интраокулярной линзой этого типа, за ней последовали Alcon Acrysof WF и другие конструкции. Асферический дизайн размещается на передней (AMO) или задней (Alcon) поверхности линзы. Различную степень асферичности этих двух линз следует учитывать в отношении показателя преломления материала и исходной кривизны поверхности, что, вероятно, дает аналогичные результаты в глазах с имплантированными ИОЛ.

Поскольку эти линзы разработаны с отрицательной сферической aberrацией, которая превышает величину, при которой сама линза является асферической, их лучше определить как гиперасферические [5].

НЕЙТРАЛИЗУЮЩИЕ ИОЛ

Поскольку асферичность роговицы может различаться у разных пациентов, а общая асферичность также включает в себя вклад задней поверхности роговицы, нельзя предполагать степень необходимой коррекции для данных оптических дефектов в каждом глазу. Таким образом, гиперасферичность ИОЛ может не только не улучшить, но и ухудшить выраженность aberrаций у части прооперированных пациентов.

Кроме того, гиперасферические линзы чувствительны к децентрации; если смещение оптической оси составит более 0,8 мм, преимущества такой линзы исчезнут и возникнет несколько недостатков, а именно, появятся кома и кома-подобные aberrации. Глаз не является идеально отцентрированной оптической системой, в связи

с этим невозможно идеально точное определение центрации интраокулярной линзы. Однако, согласно физической оптике, возможная оптическая децентрация интраокулярной линзы составляет менее 0,5 мм по отношению к центральной оси глаза, если только не происходит анатомическая децентрация.

Худшие зрительные характеристики, по сравнению со сферическими линзами, были основной причиной отказа от асферических интраокулярных линз в 1980 и 1990-х годах, но эта проблема, по-видимому, исчезла с фактоэмульсификацией, капсулорексисом и введением складных интраокулярных линз, по крайней мере, в глазах с нормальным зонулярным аппаратом.

Таким образом, эффект нейтрализации направлен на создание глаза с такой же сферической аберрацией, которая уже присутствует на поверхности роговицы, путем имплантации линзы, которая корректирует только свою собственную сферическую аберрацию, т.е. действительно асферической линзы.

Первым примером нейтрализующего подхода была линза Bausch & Lomb Sofport и Akreos Advanced Optics (Bausch & Lomb, Клируотер, Флорида, США), которая представляет собой двояковыпуклую силиконовую линзу с небольшой отрицательной сферической аберрацией на обеих поверхностях и должна быть идеально асферической, оставляя неизменной сферическую аберрацию поверхности роговицы. Результат должен быть лучше, чем при использовании сферических линз, в каждом имплантированном глазу, но не настолько, как при корригирующем подходе в глазах с положительной сферической аберрацией роговицы [5].

ОПТИМИЗИРУЮЩИЕ ИОЛ

Оптические аберрации связаны с фокусным расстоянием, общей силой преломляющей системы и силами отдельных преломляющих поверхностей, входящих в ее состав. Принимая во внимание эти факторы и учитывая, что интраокулярные линзы с низкой преломляющей силой предназначены для миопических глаз, а интраокулярные линзы со значительной преломляющей силой — для глаз с гиперметропией, мы могли бы изменять асферичность интраокулярной линзы [19].

Цель этого оптимизирующего подхода состоит в том, чтобы создать глаз с величиной сферической аберрации, которая является промежуточной между положительной роговицей и нулевой, путем придания каждой оптической силе линзы различной степени асферичности.

МУЛЬТИФОКАЛЬНЫЕ/EDOF ИОЛ И АБЕРРАЦИИ ВЫСШЕГО ПОРЯДКА

В последнее время достигнуты значительные успехи в технологии мультифокальных ИОЛ, разработаны различные концепции мультифокальных линз. Кроме того, в настоящее время для имплантации доступны ИОЛ с увеличенной глубиной фокуса (extended depth of focus, EDOF), которые обеспечивают большую глубину

резкости, чем монофокальные ИОЛ, и меньше — гало и бликов, чем мультифокальные (трехфокусные) ИОЛ. Оба типа линз могут увеличить риск снижения контрастной чувствительности и нежелательных световых явлений, особенно в случаях, когда дополнительно имеется патология переднего и/или заднего сегмента глаза.

В большинстве случаев в мультифокальных и EDOF ИОЛ используется асферическая оптическая базовая конструкция с целью уменьшения потерь контрастной чувствительности из-за увеличения сферической аберрации сферическими ИОЛ в дополнение к сферической аберрации роговицы [20].

Хорошо известно, что увеличение НОА роговицы снижает контрастную чувствительность. Как объяснялось ранее, топография роговицы может играть важную роль в определении показаний к имплантации мультифокальной ИОЛ / EDOF путем выявления аномальных НОА роговицы, связанных с кератоконусом, птеригиумом или другими заболеваниями роговицы низкой степени.

N. Maeda и соавт. установили предварительные пороговые значения НОА 0,3 μm и менее в пределах 4-мм зоны роговицы, при которых возможно проведение имплантации мультифокальной ИОЛ, поскольку эффект размытия при расфокусировке 0,5 дптр теоретически соответствует значению RMS в 0,29 μm для 4-мм оптической зоны роговицы [21].

В одном из исследований было показано, что значения передней комы более 0,32 μm могут привести к непереносимой дисфотопии в присутствии дифракционной мультифокальной ИОЛ.

К сожалению, в настоящее время практически не существует четких указаний или рекомендаций относительно количества и типа аберраций высшего порядка, которые могут препятствовать использованию мультифокальной ИОЛ. И все-таки глаза с аномальными НОА роговицы следует рассматривать как противопоказание, а рутинная оценка аномальных НОА роговицы может быть полезной для принятия решения об имплантации премиальной дифракционной ИОЛ.

Хотя это и не обязательно является противопоказанием, важно знать, что у пациентов, перенесших практически любые операции на роговице: автоматизированную ламеллярную кератопластику, лазерный кератомилез *in situ*, ФРК или радиальную кератотомию (РК), часто наблюдается сложное увеличение многих аберраций, а сама роговица часто становится мультифокальной. Это увеличение НОА приводит к снижению контраста, особенно при большом размере зрачка. Размещение дифракционной ИОЛ за мультифокальной роговицей сопряжено с риском дополнительной потери контраста и ухудшением качества зрения. Это может быть упущенной из виду причиной неудовлетворенности пациентов [22].

Применение EDOF-линзы с рефракционной оптикой, сконструированной на основании технологии

манипулирования сферической аберрацией (Mini WELL Ready (SIFI, Catania, Italy), разработанной с чередующимися кольцевыми зонами положительной и отрицательной сферической аберрации ИОЛ для увеличения глубины фокуса, согласно полученным *in vivo* данным, позволяет значительно уменьшить степень снижения контрастной чувствительности, а также выраженность и частоту нежелательных оптических явлений (halo-и glare-эффектов) [23]. Однако при этом следует принимать во внимание степень вариабельности сферической аберрации роговицы (тем более оперированной) в каждом глазу (что усложняет достижение желаемого эффекта) и в границах, до которых сферическая аберрация может быть изменена до ухудшения качества зрения.

С 2021 года в РФ зарегистрирована новая EDOF-линза AcrySof IQ Vivity DFT015 (Alcon, Техас, США) с принципиально оригинальным механизмом формирования волнового фронта, первой в своем роде ИОЛ с увеличенной глубиной фокуса, в которой используется запатентованная недифракционная технология X-Wave, растягивающая и смещающая световой пучок, не разделяя его, как в дифракционной технологии, и не разделяя на кольцевые зоны с различной силой преломления, как в рефракционной оптике. Линза обеспечивает расширенный диапазон зрения от дальнего до ближнего, низкий уровень оптических феноменов как у монофокальной линзы. AcrySof IQ Vivity обладает толерантностью к небольшому отклонению от заданной эмметропии от +0.5 до -0.5 дптр, что позволяет обойти вероятность непопадания в целевую рефракцию.

В доступной литературе количество работ, посвященных результатам имплантации данной ИОЛ, является ограниченным, а в отечественной офтальмологической литературе представлен единичный анализ краткосрочных наблюдений за функциональными результатами [24].

Благодаря своим характеристикам новая ИОЛ AcrySof IQ Vivity позволяет расширить показания для имплантации ИОЛ при коррекции пресбиопии у пациентов с сопутствующими заболеваниями роговицы, высоким уровнем аберраций высшего порядка, когда имплантация трифокальных или EDOF-линз на основе дифракционной решетки противопоказана, в частности для пациентов после кератопластики [25]. Проведение подобных исследований, на наш взгляд, явилось бы крайне интересным и актуальным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С увеличением частоты использования технически совершенных ИОЛ систематическая предоперационная оценка топографии роговицы имеет решающее значение для предотвращения послеоперационных ошибок рефракции и низкого качества зрения. Пациентам с аномальными состояниями роговицы, такими как нерегулярный роговичный астигматизм, отрицательная сферическая аберрация и/или пропорциональные нарушения оптической силы или астигматизм между передней и задней поверхностью роговицы, в особенности имеющих анамнез хирургических вмешательств на роговице, не рекомендована имплантация мультифокальных/EDOF ИОЛ с дифракционным и рефракционным (по типу кольцевых зон) устройством оптики. Перспективным направлением в плане получения качественного зрения представляется имплантация в подобных случаях недифракционной ИОЛ с увеличенной глубиной фокуса, сформированного на основании технологии X-Wave, однако это требует дополнительного изучения и большего числа наблюдений.

УЧАСТИЕ АВТОРОВ:

Хван Д.А. — существенный вклад в замысел и дизайн исследования, сбор данных, анализ и интерпретацию данных;
Федяшев Г.А. — существенный вклад в замысел и дизайн исследования, сбор данных, анализ и интерпретацию данных, окончательное одобрение варианта статьи для опубликования.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Oliveira CM, Ferreira A, Franco S. Wavefront analysis and Zernike polynomial decomposition for evaluation of corneal optical quality. *Journal of cataract and refractive surgery*. 2012;38(2):343–356. doi:10.1016/j.jcrs.2011.11.016.
- Аверич ВВ, Егорова ГВ. Оптические аберрации глаза при кератоконусе. *Клиническая офтальмология*. 2022;22(3):168–174.
- Averich VV, Egorova GB. Ocular aberrations in keratoconus. *Russian journal of clinical ophthalmology*. 2022;22(3):168–174 (In Russ.). doi: 10.32364/2311-7729-2022-22-3-168-174.
- Villegas EA, Artal P. An analytical model describing aberrations in the progression corridor of progressive addition lenses. *Optometry and vision science*. 2006;83(9):666–671. doi: 10.1097/01.opx.0000232827.99741.66.
- Smolek MK, Klyce SD. Goodness-of-prediction of Zernike polynomial fitting to corneal surfaces. *Journal of cataract and refractive surgery*. 2005;31:2350–2355. doi: 10.1016/j.jcrs.2005.05.025.
- Bellucci R, Morselli S. Optimizing higher-order aberrations with intraocular lens technology. *Current opinion in ophthalmology*. 2007;18(1):67–73. doi: 10.1097/ICU.0b013e3280121af1.
- Salmon TO, Pol C. Normal-eye Zernike coefficients and root-mean-square wavefront errors. *Journal of cataract and refractive surgery*. 2006;32(12):2064–2074. doi: 10.1016/j.jcrs.2006.07.022.
- Liang CL, Juo SH, Chang CJ. Comparison of higher-order wavefront aberrations with 3 aberrometers. *Journal of cataract and refractive surgery*. 2005;31(11):2153–2156. doi: 10.1016/j.jcrs.2005.04.040.
- Yagci A, Egrilemez S, Kaskaloglu M, Egrilmez ED. Quality of vision following clinically successful penetrating keratoplasty. *Journal of cataract and refractive surgery*. 2004;30(6):1287–1294. doi:10.1016/j.jcrs.2003.10.037.
- Salvetat ML, Brusini P, Pedrotti E, Zeppieri M, Miani F, Marcigaglia M, Passilongo M, Marchini G. Higher Order Aberrations After Keratoplasty for Keratoconus. *Optometry and vision science*. 2013;90(3):293–301. doi:10.1097/oxp.0b013e318281980f
- Yamaguchi T, Ohnuma K., Tomida D., Konomi K, Satake Y, Negishi K, Tsubota K, Shimazaki J. The Contribution of the Posterior Surface to the Corneal Aberrations in Eyes after Keratoplasty. *Investigative Ophthalmology and visual Science*. 2011;52(9):6222–6229. doi:10.1167/iovs.11-7647.
- Kobashi H, Kamiya K, Shimizu K. Impact of Forward and Backward Scattering and Corneal Higher-Order Aberrations on Visual Acuity after Penetrating Keratoplasty. *Seminars in ophthalmology*. 2018;33(6):748–756. doi:10.1080/08820538.2018.1427767
- Iseli HP, Jankov M, Bueeler M, Wimmersberger Y, Seiler T, Mrochen M. Corneal and total wavefront aberrations in phakic and pseudophakic eyes after implantation of monofocal foldable intraocular lenses. *Journal of Cataract and refractive surgery*. 2006;32(5):762–771. doi: 10.1016/j.jcrs.2005.10.032.
- Taketani F, Yukawa E, Yoshii T, Sugie Y, Hara Y. Influence of intraocular lens optical design on high-order aberrations. *Journal of cataract and refractive surgery*. 2005;31(5):969–972. doi: 10.1016/j.jcrs.2004.10.064.
- Rocha KM, Chalita MR, Souza CE, Soriano ES, Freitas LL, Muccioli C, Belfort R Jr. Postoperative wavefront analysis and contrast sensitivity of a multifocal apodized diffractive IOL (ReSTOR) and three monofocal IOLs. *Journal of refractive surgery*. 2005;21(6):808–812. doi: 10.3928/1081-597X-20051101-32.
- Padmanabhan P, Yoon G, Porter J, Rao SK, Roy J, Choudhury M. Wavefront aberrations in eyes with AcrySof monofocal intraocular lenses. *J Refract Surg*. 2006 Mar;22(3):237–242. doi: 10.3928/1081-597X-20060301-07.

16. Martin RG, Sanders DR. A comparison of higher order aberrations following implantation of four foldable intraocular lens designs. *Journal of refractive surgery*. 2005;21(6):716–721. doi: 10.3928/1081-597X-20051101-10.
17. Rohart C, Lemarinel B, Thanh HX, Gatineau D. Ocular aberrations after cataract surgery with hydrophobic and hydrophilic acrylic intraocular lenses: comparative study. *Journal of cataract and refractive surgery*. 2006;32(7):1201–1205. doi: 10.1016/j.jcrs.2006.01.099.
18. Goto S, Maeda N. Corneal topography for intraocular lens selection in refractive cataract surgery. *Ophthalmology*. 2021;128(11):142–152. doi: 10.1016/j.ophtha.2020.11.016.
19. Atchison DA. Design of aspheric intraocular lenses. *Ophthalmic and physiological optics*. 1991;11(2):137–146. doi: 10.1111/j.1475-1313.1991.tb00213.x.
20. Kim JS, Jung JW, Lee JM, Seo KY, Kim EK, Kim TI. Clinical Outcomes Following Implantation of Diffractive Multifocal Intraocular Lenses With Varying Add Powers. *American Journal of Ophthalmology*. 2015;160(4):702–709. doi: 10.1016/j.ajo.2015.07.021.
21. Maeda N. Assessment of corneal optical quality for premium IOLs with Pentacam. *Highlights of Ophthalmology Journal*. 2011;39(4):16–20. doi: 10.5005/hoo-10101-39405.
22. Braga-Mele R, Chang D, Dewey S, Foster G, Henderson BA, Hill W, Hoffman R, Little B, Mamalis N, Oetting T, Serafino D, Talley-Rostov A, Vasavada A, Yoo S. Multifocal intraocular lenses: relative indications and contraindications for implantation. *Journal of cataract and refractive surgery*. 2014;40(20):313–322. doi: 10.1016/j.jcrs.2013.12.011.
23. Ruiz-Mesa R, Blanch-Ruiz J, Ruiz-Santos M, Montés-Micó R. Optical and visual quality assessment of an extended depth-of-focus intraocular lens based on spherical aberration of different sign. *International Ophthalmology*. 2021;41(3):1019–1032. doi: 10.1007/s10792-020-01659-z.
24. Першин КБ, Пашинова НФ, Цыганков АЮ, Антонов ЕА, Косова ИВ, Корнеева ЕА. Недифракционная интраокулярная линза с расширенной глубиной фокуса, формирующая волновой фронт: первый опыт имплантации. *Офтальмология*. 2022;19(4):774–781.
Pershin KB, Pashinova NF, Tsygankov AY, Antonov EA, Kosova IV, Korneeva EA. Non-Diffractive Wavefront-Shaping Intraocular Lens with Extended Depth of Focus: First Implantation Experience. *Ophthalmology in Russia*. 2022;19(4):774–781 (In Russ.). doi: <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2022-4-774-781>.
25. Федяшев ГА, Хван ДА, Ручкин МП. Имплантация интраокулярной линзы с механизмом формирования волнового фронта при хирургическом лечении катаракты у пациентов после сквозной кератопластики. *Офтальмохирургия*. 2022;4:13–17.
Fedyashev GA, Khvan DA, Ruchkin MP. Implantation of an intraocular lens with a wavefront formation mechanism in the surgical treatment of cataracts in patients after penetrating keratoplasty. *Fyodorov Journal of Ophthalmic Surgery*. 2022;4:13–17 (In Russ.). doi: 10.25276/0235-4160-2022-4-13-17.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный медицинский университет»
Министерства здравоохранения Российской Федерации
ООО «Приморский центр микрохирургии глаза»
Хван Дмитрий Артурович
аспирант, офтальмолог
пр-т Острякова, 2, Владивосток, 690002, Российская Федерация
ул. Борисенко, 100е, Владивосток, 690088, Российская Федерация
<https://orcid.org/0000-0003-2221-9145>

ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный медицинский университет»
Министерства здравоохранения Российской Федерации
ООО «Приморский центр микрохирургии глаза»
Федяшев Глеб Арнольдович
доктор медицинских наук, профессор
пр-т Острякова, 2, Владивосток, 690002, Российская Федерация
ул. Борисенко, 100е, Владивосток, 690088, Российская Федерация
<https://orcid.org/0000-0003-2440-6059>

ABOUT THE AUTHORS

Pacific State Medical University Ministry of Health of Russia
Primorskii Center of Eye Microsurgery
Khvan Dmitry A.
postgraduate, ophthalmologist the Ophthalmology
and otorhinolaryngology department
Ostryakova ave., 2, Vladivostok, 690002, Russian Federation
Borisenko str., 100e, Vladivostok, 690088, Russian Federation
<https://orcid.org/0000-0003-2221-9145>

Pacific State Medical University Ministry of Health of Russia
Primorskii Center of Eye Microsurgery
Fedyashev Gleb A.
MD, PhD, professor
Ostryakova ave., 2, Vladivostok, 690002, Russian Federation
Borisenko str., 100e, Vladivostok, 690088, Russian Federation
<https://orcid.org/0000-0003-2440-6059>