

Костин Олег Александрович

**КЛИНИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕКЦИИ
АБЕРРАЦИЙ ВЫСШЕГО ПОРЯДКА В ЛАЗЕРНОЙ ХИРУРГИИ
АНОМАЛИЙ РЕФРАКЦИИ**

3.1.5. Офтальмология

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
доктора медицинских наук

Москва - 2023

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова" Министерства здравоохранения Российской Федерации

Научный консультант:

Академик РАН,
доктор медицинских наук, профессор

Тахчиди Христо Периклович

Официальные оппоненты:

доктор медицинских наук, профессор
ООО «Клиника доктора Куренкова»,
заместитель генерального директора
по научной работе

Куренков Вячеслав Владимирович

доктор медицинских наук, профессор
ООО Глазной центр «Восток-Прозрение»,
научный директор

Анисимов Сергей Игоревич

доктор медицинских наук,
НМИЦ ФГАУ МНТК "Микрохирургия глаза"
имени акад. С.Н. Федорова",
старший научный сотрудник,
доцент кафедры глазных болезней ИНМПО

Костенёв Сергей Владимирович

Ведущая организация: Уфимский научно-исследовательский институт глазных болезней Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Башкирский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации

Защита диссертации состоится «__» _____ 2023 года в __ часов на заседании Диссертационного совета 21.2.058.10 при ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России по адресу: 117997, Москва, ул. Островитянова, д.1.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте www.rsmu.ru и в научной библиотеке ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России по адресу: 117997, г. Москва, ул. Островитянова, д. 1

Автореферат разослан «__» _____ 2023г.

Ученый секретарь Диссертационного совета
доктор медицинских наук



Ануров Михаил Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы

Глаз человека имеет оптические дефекты, называемые аберрациями, которые искажают изображение на сетчатке и в определенной мере снижают качество зрения (Балашевич Л.И., Качанов А.Б. 2008). Современные ученые выделяют аберрации низшего (2-го) и высшего (3-го и более) порядков (Cheng S.M. et al., 2021; Faria-Correia F. et al., 2020; Frings A. et al., 2020). К аберрациям глаза низшего порядка относят миопию, гиперметропию и астигматизм, которые успешно корригируются очковой оптикой. К аберрациям высшего порядка (АВП) относят кому, трейлоид, квадрафойл, вторичный астигматизм и сферическую аберрацию (Cheng S.M. et al., 2021; Faria-Correia F. et al., 2020; Frings A. et al., 2020). При коррекции АВП изображения расплываются (Atchison D.A., 2004) или делятся, появляются блики (Zarei-Ghanavati, S. et al., 2015) искажения изображения по периферии (Atchison D.A., 2004). Оптические аберрации глаза уменьшают контрастность изображения (Jansonius N.M., 2010) и вызывают фазовые сдвиги пространственного ретинального образа (Autrusseau, F. et al., 2011). В результате качество изображения (Bühren J. et al., 2009; Schallhorn S.C. et al., 2003; Shen J. et al., 2009) затрудняет распознавание сложных объектов, таких как буквы и лица (Балашевич Л.И., Качанов А.Б. 2008; Ravikumar S. et al., 2010).

Эпидемиологические исследования показали, что АВП есть у здоровых людей, у пациентов с миопией и сложным миопическим астигматизмом (Hartwig A. et al., 2012). К факторам, влияющим на развитие АВП, относят: генетическую предрасположенность, молодой и средний возраст, форму роговицы, суточное изменение ВГД, аккомодацию, миопию, астигматизм, медикаментозное смещение центра зрачка. Степень участия описанных факторов развития АВП различны, механизмы их взаимодействия остаются до конца не изученными, поэтому проводятся экспериментальные исследования для измерения аберраций ВФ и более глубокого понимания их природы для хирургической и оптической коррекции рефракции.

В научной литературе представлены разные модели глаза: анатомически точная модель, модель оптической дифракции глаза, модель глаза с большим зрачком. Общеизвестна модель глаза из полиметилметакрилата (Cheng X., et al., 2003). Исследователи (Legras R. et al., 2004) использовали цифровую модель глаза, полученную путём вычисления оптики глаза с корректирующей линзой. Схематическая модель глаза использована для определения теоретического предела фовеолярного зрения и имеет ограничения в зависимости от диаметра зрачка (Schwiegerling J., 2000). В научных работах по лазерной рефракционной хирургии представлены способы экспериментального моделирования для оценки абляции (Баграташвили В.Н., 1990). Сравнивая модели абляции на плоских и сферических поверхностях, были обнаружены значительные различия между эксимерными лазерами в форме и глубине шаблонов абляции (Dorronsoro C. et al., 2009). Модель «летающего лазерного пятна» обеспечила улучшение профиля

абляции, компенсирующее изменение асферичности роговицы и индукции сферической аберрации (Manns F. et al., 2002, Bueeler M. et al., 2003). Разработка 3D модели конечных элементов роговицы (Кочина М.Л., 2009, Хусаинов Р.Р., 2008) относится к пациент-ориентированной и позволяет оценить хирургически индуцированные изменения упругих свойств роговицы после рефракционной хирургии (Roy A.S. et al., 2011).

Экспериментальные изучения АВП имеют значение для разработки персонализированных алгоритмов абляции роговицы, дальнейшего развития рефракционной хирургии, поиска новых способов улучшения конечного результата.

В диагностике АВП большую роль играет aberromетрия. В настоящее время используют разные конструкции aberromетров, позволяющие определить полиномы Цернике до 6 порядка на основе принципа Tscherning (Marcos S. et al., 2006, Rozema J.J. et al., 2006, Sáles C.S. et al., 2015). Часть публикаций посвящена сравнению aberromетров, работающих на разных принципах (Cade F. et al., 2013, McAlinden et al., 2010, Visser N. et al., 2011).

Измерения в виде полиномов Цернике, полученные с помощью aberromетров, являются функционально разными, и каждый из aberromетров имеет свои преимущества и недостатки в зависимости от конкретного применения (Moreno-Barriuso E. et al., 2001).

Фундаментальные работы физиков по aberromетрии и адаптивной оптике, проведенные в 90-х гг. XX века легли в основу разработки аппаратного обеспечения персонализированной абляции при использовании эксимерного лазера. В настоящее время офтальмохирурги используют: ФПК, LASEK, Epi-LASIK, LASIK, FemtoLASIK, FLEx, SMILE.

В эксимерлазерной хирургии персонализированная топографическая абляция при коррекции индуцированного нерегулярного астигматизма и децентрации оптической зоны получила широкое развитие (Балашевич Л.И. с соавт., 2001, Дога А.В. с соавт., 2004, Spadea L., 2005). Совершенствование технологии позволило проводить топографически поддержанную абляцию при аномалии рефракции на ранее неоперированных глазах (Балашевич Л.И. с соавт., 2001, 2010, Alpíns N. et al., 2008, Dougherty P.J. et al., 2008). Формирование центральной регулярной поверхности роговицы, тем не менее, вносит изменение в баланс общих АВП, требующее детального анализа. В персонализированной эксимерлазерной хирургии роговицы с коррекцией аберраций ВФ получили развитие технологии Wavefront-Guided LASIK (Mrochen M. et al., 2000) и Epi-LASIK (Pallikaris I.G. et al., 2003), которые предназначены для коррекции предоперационных показателей АВП (Mrochen M. et al., 2000). Однако, полученные послеоперационные результаты побуждают офтальмохирургов к модификации, поиску новых подходов и оптимизации показаний к применению данных технологий (Суханова Е.В. 2007., Дога А.В. и соавт. 2013; Кишкин Ю.И., Тахчиди Н.Х. 2013, Мушкова И.А. и соавт. 2013, 2000, Rozema J.J. et al., 2006, Tran D.B. et al., 2005, Seiler T. 2009, Sekundo W. et al., 2011).

В настоящее время оптимальные алгоритмы коррекции АВП не определены. В научной литературе отсутствуют контролируемые исследования селективного воздействия на АВП с помощью эксимерного лазера. Отсутствует дифференцированный подход в коррекции АВП от предоперационного уровня АВП, выбора способа хирургического вмешательства, вида лазерного излучения при удалении роговичной ткани с рефракционной целью.

Цель исследования

Разработать концепцию персонализированного подхода в лазерной хирургии миопии и сложного миопического астигматизма на основе селективной коррекции аберраций высшего порядка для повышения эффективности результатов лечения.

Задачи исследования

1. Разработать компьютерную модель глаза на основе математических конечных элементов для оценки функций аберраций роговицы по системе полиномов Цернике.
2. Оценить результаты изменений аберраций высшего порядка при режиме стандартной абляции, Wavefront-Guided по персонализированному файлу абляции и Wavefront-Guided Selective по селективному персонализированному файлу абляции в эксперименте на контактных линзах.
3. Исследовать изменение биомеханических характеристик конечноэлементной модели роговицы глаза при напряженно-деформированном состоянии под действием внутриглазного давления до и после операции FemtoLASIK.
4. Оценить послеоперационные клиничко-функциональные результаты при коррекции миопии и сложного миопического астигматизма с интрастромальным (LASIK, топографический LASIK, Wavefront-Guided LASIK, Wavefront-Guided Selective LASIK, LASIK с коррекцией сферической аберрации, Wavefront-Guided FemtoLASIK), поверхностным (Wavefront-Guided Epi-LASIK) воздействием на роговицу и удалением роговичного лентикула (FLEx, SMILE).
5. Изучить толщину роговичного клапана, формируемого фемтосекундным лазером при удалении роговичного лентикула в операции SMILE, толщину роговичного лоскута, формируемого фемтосекундным лазером с удалением роговичного лентикула в операции FLEx, толщину роговичного лоскута, формируемого фемтосекундным лазером с интрастромальным неселективным воздействием на роговицу (Wavefront-Guided FemtoLASIK) и толщину роговичного лоскута, формируемого механическим микрокератомом после операций с интрастромальным неперсонализированным (LASIK), с интрастромальным персонализированным неселективным воздействием на роговицу (топографический LASIK, Wavefront-Guided LASIK) и с интрастромальным персонализированным селективным воздействием на

роговицу (Wavefront-Guided Selective LASIK) ретроспективно по данным оптической когерентной томографии.

6. Провести сравнительный анализ изменений aberrаций волнового фронта в коррекции миопии и сложного миопического астигматизма при фемтосекундной лазерной рефракционной хирургии с удалением роговичного лентикула (FLEX, SMILE), неперсонализированными способами лазерной абляции (LASIK), неселективными персонализированными способами лазерной абляции: (топографический LASIK, Wavefront-Guided LASIK, Wavefront-Guided Epi-LASIK, Wavefront-Guided FemtoLASIK).

7. Оценить эффективность коррекции отдельных видов aberrаций волнового фронта при селективной персонализированной эксимерной лазерной рефракционной хирургии (Wavefront-Guided Selective LASIK) миопии и сложного миопического астигматизма.

8. Оценить эффективность коррекции сферической aberrации при операции LASIK с комбинацией миопического и гиперметропического профилей абляции роговицы (LASIK с коррекцией сферической aberrации) при персонализированной эксимерной лазерной рефракционной хирургии миопии и сложного миопического астигматизма.

9. Разработать и внедрить дифференцированный подход выбора метода коррекции aberrаций высшего порядка с учётом их дооперационного уровня в рефракционной хирургии миопии и сложного миопического астигматизма.

Научная новизна исследования

1. Впервые предложенная компьютерная модель глаза на основе математических конечных элементов продемонстрировала возможность моделирования клинических результатов операции LASIK (когда до лечения сферическая aberrация глаза мала, а после – становится больше и начинает снижать зрение пациента) и определить уровень значимости величины 0,2 мкм aberrаций высшего порядка на качество зрения в рефракционной хирургии миопии и сложного миопического астигматизма.

2. Впервые в эксперименте было определено статистически значимое уменьшение aberrаций $Z(3;1)$, $Z(3;-1)$ и $Z(4;0)$ при селективной коррекции клинически значимых aberrаций высшего порядка, что доказывает эффективность Wavefront-Guided Selective абляции в рефракционной хирургии миопии и сложного миопического астигматизма.

3. Биометрическое моделирование роговицы глаза при действии внутреннего давления на основе нелинейной краевой задачи теории упругости позволило анализировать состояния роговицы в дооперационный и послеоперационный периоды. Впервые математическая модель напряженно-деформированного состояния роговицы позволила определить модуль упругости роговицы при изменении внутриглазного давления, увеличение изгибных напряжений в центральной и периферической части роговицы после операции в сравнении с дооперационными значениями, что необходимо учитывать при

оценке переменной толщины формируемого роговичного лоскута с помощью оптической измерительной техники.

4. Усовершенствована методика операции LASIK для коррекции сферической аберрации с использованием комбинации миопического и гиперметропического профилей абляции.

5. Впервые на основании комплексного исследования аберраций высшего порядка, возникающих после эксимерлазерной рефракционной хирургии миопии и сложного миопического астигматизма, получено теоретическое обоснование выбора селективной коррекции аберраций высшего порядка.

6. Впервые на основании предложенного способа предоперационной системы оценки абсолютного значения величин АВП обоснована необходимость применения селективной коррекции аберраций высшего порядка, разработан алгоритм выбора вмешательства. Оценены результаты предложенных операций, проведен анализ интраоперационных, ранних и поздних послеоперационных осложнений, предложены профилактические мероприятия для уменьшения осложнений и способы их устранения.

7. Разработана комплексная система дифференцированного подхода в персонализированной фемтосекундной и эксимерной лазерной рефракционной хирургии миопии и сложного миопического астигматизма.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Воспроизводимость предложенной экспериментальной модели роговицы глаза, низкие финансовые и временные затраты дают возможность дальнейшего изучения изменения аберраций высшего порядка при лазерной рефракционной хирургии аномалий рефракции.

Сферическая аберрация, возникающая при миопическом профиле абляции роговицы, вносит основной вклад в структуре послеоперационных аберраций высшего порядка. Для устранения индуцирования сферической аберрации, возникающей вследствие биомеханических изменений роговицы, разработан способ комбинации миопического и гиперметропического профилей абляции эксимерной лазерной рефракционной хирургии миопии и сложного миопического астигматизма.

Динамическая оценка рефракционным хирургом индуцирования аберраций высшего порядка позволит целенаправленно проводить селективную коррекцию аберраций высшего порядка в рефракционной хирургии миопии и сложного миопического астигматизма.

Система персонализированной фемтосекундной и эксимерной лазерной рефракционной хирургии обеспечивает комплексный подход, позволяет расширить диапазон и повысить эффективность коррекции миопии и сложного миопического астигматизма.

На основе предоперационного диагностического исследования оптика глаза разработаны подходы к персонализированной фемтосекундной и эксимерной лазерной рефракционной хирургии миопии и сложного миопического

астигматизма, позволяющие повысить эффективность восстановительного лечения.

Уточнены показания и противопоказания к проведению персонализированных LASIK, Epi-LASIK, FemtoLASIK, а также FLEX и SMILE позволяют офтальмохирургам применять дифференцированный подход в выборе технологии лазерной рефракционной хирургии миопии и сложного миопического астигматизма.

Методология и методы исследований

Методологической основой диссертационной работы явилось последовательное применение методов научного познания. Изучение современной отечественной и зарубежной литературы, позволило сформулировать научную гипотезу: развитие послеоперационных аберраций высшего порядка в рефракционной хирургии миопии и сложного миопического астигматизма не одинаково при влиянии разных технологий рефракционной лазерной хирургии. Эффективность лазерной рефракционной хирургии миопии и сложного миопического астигматизма можно повысить, если учитывать факторы риска, клиническую форму, наличие осложнений.

Проведенное исследование включало: экспериментальное исследование на модели роговицы, ретроспективное и проспективное контролируемое исследование пациентов с миопией и сложным миопическим астигматизмом.

Методы исследования экспериментальных моделей роговицы: рефрактометрия, оптическая когерентная томография, кератотопография, aberрометрия.

Методы исследования пациентов: клиническое исследование, офтальмологическое исследование, оптическая когерентная томография, кератотопография, aberрометрия, пространственная контрастная чувствительность. Организация научного исследования включала ретроспективное и проспективное сравнительное исследование. Проведена статистическая обработка полученных результатов экспериментального и клинического исследований. Тема диссертации утверждена на заседании ученого совета ФГАОУ ВО "Российский Национальный Исследовательский Медицинский Университет им. Н.И. Пирогова" Министерства здравоохранения Российской Федерации, Локальный этический комитет РНИМУ им. Н.И. Пирогова одобрил 19 декабря 2022 г. (приказ №224). В настоящем исследовании использовались современные методики сбора, хранения и обработки полученной информации, был обоснован подбор пациентов по критериям включения. Для статистической обработки и интерпретации данных были применены современные методики количественного и качественного анализа.

Положения, выносимые на защиту

1. Селективная коррекция аберраций высшего порядка при миопическом алгоритме абляции в эксперименте приводит к устранению корректируемых видов аберраций высшего порядка.
2. На развитие послеоперационной сферической аберрации важное значение имеет способ формирования роговичного лоскута при эксимерной лазерной рефракционной хирургии миопии и сложного миопического астигматизма.
3. Фемтосекундные лазерные рефракционные операции индуцируют меньшую величину сферической аберрации по сравнению с эксимерными лазерными рефракционными операциями в лазерной рефракционной хирургии миопии и сложного миопического астигматизма.
4. Разработанные технологии персонализированной абляции формируют комплексную систему лазерной рефракционной хирургии миопии и сложного миопического астигматизма.

Степень достоверности результатов исследования

Степень достоверности полученных результатов определяется большим и репрезентативным объемом проанализированных данных, выборкой исследований и количеством обследованных пациентов с использованием современных высокоинформативных методов исследования, а также применением корректных методов статистической обработки данных. Статистический анализ проводился с использованием программы STATISTICA 12 (разработчик - StatSoft.Inc). Данные были представлены в виде средних значений и стандартной ошибки среднего для непрерывных нормально распределенных переменных, в виде медианы и минимальных и максимальных значений для непрерывных данных, не распределенных нормально, а также в виде абсолютных значений и процентов для категориальных данных. Анализ нормальности проводился с помощью теста Колмогорова – Смирнова и Шапиро – Уилка. Для парного сравнения непрерывных переменных, имеющих нормальное распределение, использовался t-критерий Стьюдента для независимых выборок, для переменных, не имеющих нормальное распределение - U-критерий Манна-Уитни. Категориальные данные и пропорции сравнивались с использованием критерия хи-квадрат или точного двустороннего критерия Фишера. При сравнении средних показателей, рассчитанных для связанных выборок (например, значений показателя до операции и после операции), использовался парный t-критерий Стьюдента. Для проверки различий между двумя связанными выборками переменных, не имеющих нормальное распределение, применялся W-критерий Уилкоксона. Значение $p < 0,05$ считалось статистически значимым.

Апробация результатов исследования

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на научно-практических конференциях: II, III, IV, V, VI, VII, VIII Евро-Азиатских конференциях (Екатеринбург 2009, 2012, 2015, 2018), XII, XXI, XXII научно-практической конференции «Новые технологии микрохирургии глаза» (Оренбург

2010, 2011), 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 научно-практических конференциях Екатеринбургского Центра МНТК "Микрохирургия глаза" (Екатеринбург 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019), XX, XXI, XXII, XXIII, XXIV, XXV, XXVI, XXVII, XXVIII, XIX, XXX, XXXI, XXXII, XXXIII конгрессах Европейского общества катарактальной и рефракционной хирургии (Ницца 2002, Мюнхен 2003, Париж 2010, Лиссабон 2017, Стокгольм 2007, Берлин 2008, Барселона 2015, Вена 2018, Милан 2012, Амстердам 2013, Лондон 2014, Барселона 2015, Копенгаген 2016), IX, X и XI Съездах офтальмологов России (Москва 2010, 2015 и 2020), VII, VIII, IX, X, XI, XII, XIII, XIV, XV, XVI XVII, XVIII Международных научно-практических конференциях «Современные технологии катарактальной и рефракционной хирургии» (Москва 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2021, 2022), конгрессах Американского общества катарактальной и рефракционной хирургии (Вашингтон 2006, Сан-Диего 2011, Чикаго 2008, Сан-Франциско 2013, Бостон 2014, Новый Орлеан 2016, Лос-Анжелес 2017), 19, 21, 22, 26, 27, 29, 30 конгрессах немецких офтальмохирургов (Нюрнберг 2012, 2013, 2014, 2018), I и II Всероссийских научных конференциях молодых ученых (Москва 2006, 2007), Всемирном офтальмологическом конгрессе (Гонг-Конг 2008, Абу-Даби 2012, Токио 2014, Тихуана 2016), 23 конгрессе немецких офтальмохирургов (Гамбург 2010), 25 конгрессе немецких офтальмохирургов (Лейпциг 2015) научно-клинической конференции ФГБУ МНТК "Микрохирургия глаза" им. акад. С.Н. Федорова (Москва 2011, 2012), научно-практической конференции «Применение фемтосекундных лазеров в офтальмологии» (Киев 2012), Европейской конференции рефракционных хирургов-пользователей фемтосекундного лазера VisuMax (Лимассол 2012), Волгоградском обществе офтальмологов (Волгоград 2012), научно-практической конференции «Проблемы воспаления в офтальмологии» (Челябинск 2013), научно-практической конференции офтальмологов УрФО «Актуальные проблемы офтальмологии» (Екатеринбург 2013), научно-практической конференции, посвященной 30-летию Санкт-Петербургского филиала МНТК "Микрохирургия глаза" им. акад. С.Н. Федорова (Санкт-Петербург 2017), научно-практической конференции Санкт-Петербургского филиала МНТК "Микрохирургия глаза" им. акад. С.Н. Федорова (Санкт-Петербург 2021) Всероссийской научно-практической конференции «Современные технологии в офтальмологии. Практика, собственный опыт, диалог», посвященной 90-летию со дня рождения академика С.Н. Федорова (Новосибирск 2017), научно-практической конференции «Современные технологии лечения заболеваний глаз» (Уфа 2018), X Юбилейный Международный Междисциплинарный Конгресс по заболеваниям Головы и Шеи (Москва 2022).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 21 научная работа в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, определенных Высшей Аттестационной Комиссией. Получено 4 патента Российской Федерации.

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности

Научные положения и результаты диссертации соответствуют формуле и области исследований специальности 3.1.5. - Офтальмология, пунктам №5 и №7.

Внедрение результатов исследования в практику

Теоретические и практические рекомендации диссертационного исследования используются в процессе обучения студентов 6 курса педиатрического факультета кафедры офтальмологии педиатрического факультета ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России, слушателей ФПК Чебоксарского филиала ФГАУ «НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С. Н. Фёдорова» Минздрава России, в работе врачей-офтальмологов Чебоксарского филиала ФГАУ «НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С. Н. Фёдорова» Минздрава России, Иркутского филиала ФГАУ «НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С. Н. Фёдорова» Минздрава России, Екатеринбургского центра МНТК «Микрохирургия глаза» Минздрава России.

Личный вклад автора в проведенное исследование

Выбор направления исследования принадлежит автору. Автором самостоятельно проведен анализ и изучение 664 литературных источников, из которых 130 отечественных и 534 зарубежных авторов. Автор планировал дизайн исследования, оперировал всех пациентов, проводил в последующем обследования, осмотр пациентов, анализ и обобщение полученных результатов. Вклад автора заключается в непосредственном участии на всех этапах исследования: от постановки задач, проведении экспериментальных исследований, выполнения обсуждения результатов, докладов, научных публикаций и их внедрения в практику. Самостоятельно сформированы обобщающие таблицы первичных данных и результатов, выполнен их статистический анализ. Обработка, интерпретация полученных результатов, написание и оформление диссертации выполнены лично автором.

Объем и структура диссертационной работы

Диссертация изложена на 317 страницах машинописного текста и состоит из введения, обзора литературы, описания материалов и методов исследования, собственных данных (6 глав), заключения, выводов, практических рекомендаций и списка литературы. Библиографический указатель включает 664 источников, в том числе 130 отечественных и 534 иностранных. Иллюстративный материал представлен 84 рисунками и 57 таблицами.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Общая характеристика исследований

Настоящая работа выполнена в отделении лазерной хирургии Екатеринбургского центра МНТК «Микрохирургия глаза» Министерства здравоохранения Российской Федерации (Генеральный директор, к.м.н., О.В. Шиловских) с 2006 по 2016 годы.

Научное исследование включало четыре этапа. На первом этапе изучена современная отечественная и зарубежная литература по коррекции аберраций высшего порядка (АВП) в лазерной рефракционной хирургии миопии и миопического астигматизма.

На втором этапе проведено экспериментальное исследование, которое включало разработку математической и компьютерной модели оптики глаза, модель рефракционной операции LASIK для расчета геометрических аберраций ВФ. Моделирование глубины селективной абляции роговицы в эксперименте на контактных линзах из полиметилметакрилата проведено на основе подхода с отысканием неосесимметричного обобщения формулы Маннерлина. Для изучения влияния биомеханических изменений роговицы от способа формирования роговичного лоскута на АВП была построена расчетная конечноэлементная модель роговицы.

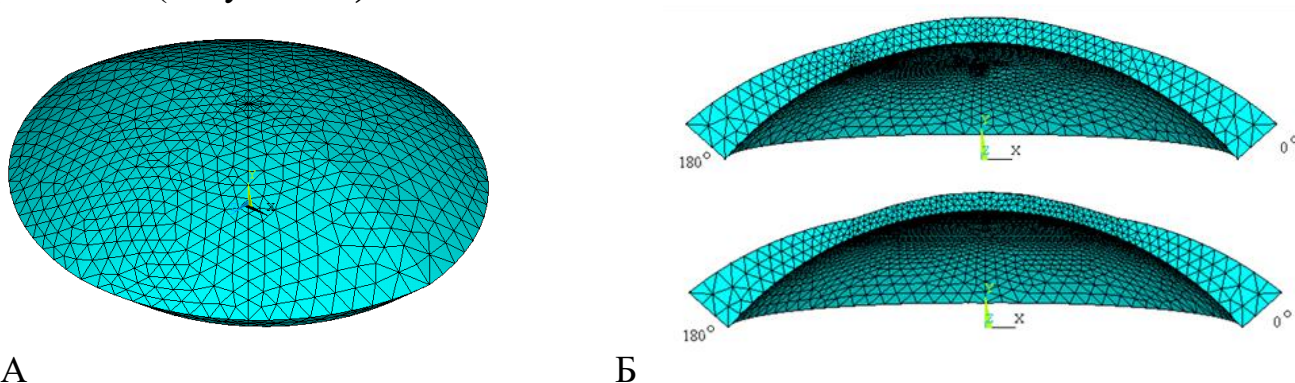
На третьем этапе проведено ретроспективное исследование для оценки индуцирования АВП и влияния способов формирования роговичного лоскута на АВП. В исследование включены 80 лиц, проживающих в г. Екатеринбурге и Свердловской области, обратившихся в Екатеринбургский центр «Микрохирургия глаза».

Четвертый этап включал ретроспективное и проспективное контролируемое исследование 472 пациентов с миопией и сложным миопическим астигматизмом. Пациентам было проведено клиническое и офтальмологическое исследование: кератотопография, абберрометрия, оптическая когерентная томография, исследование оптических срезов вращающейся камерой Шеймпфлюга, исследование контрастной чувствительности. Лечение пациентов с миопией и сложным миопическим астигматизмом включало проведение эксимерной лазерной и фемтосекундной лазерной хирургии роговицы. Для оценки результатов лечения использованы статистические методы. По завершении исследования сделаны выводы.

Экспериментальное исследование. Математическое и компьютерное моделирование оптики глаза

Экспериментальное исследование включало разработку математической и компьютерной модели оптики глаза. Разработанная модель глаза состоит из роговицы, передней камеры, хрусталика, стекловидного тела и сетчатки и использована для расчета аберраций по Хартману-Шаку (Bille J.F. et al., 2004). Компьютерная модель хрусталика построена на основании работ R.Navarro и

соавт. (Navarro, R. et al., 2006). Для оценки функций, задающей переднюю и заднюю поверхности хрусталика, использованы математические формулы (Navarro, R. et al., 2006). Экспериментальное исследование включало так же разработку модели рефракционной операции LASIK для расчета геометрических aberrаций ВФ. На контактных линзах из полиметилметакрилата проведено моделирование различных режимов селективной абляции роговицы. Для изучения влияния биомеханических изменений в зависимости от способа формирования роговичного лоскута на АВП построена расчетная конечноэлементная модель роговицы (Рисунок 1А).



А Б
Рисунок 1 – Конечноэлементная модель роговицы глаза (А), Конечноэлементная модель роговицы в поперечном сечении до и после операции (Б)

Для оценки достоверности расчетов выполнены измерения толщины лоскута, величины абляции (Δu , Δh , мкм) при операции Wavefront-Guided LASIK и Wavefront-Guided FemtoLASIK. Измерения толщины роговицы проводили до операции, в процессе операции и после операции (Рисунок 1Б). Экспериментальные расчетные данные приведены для 6 мм четырех диаметральных сечений роговицы. Измерения толщины роговицы проводили на оптическом когерентном томографе переднего отрезка глаза Visante (Carl Zeiss Meditec, Германия).

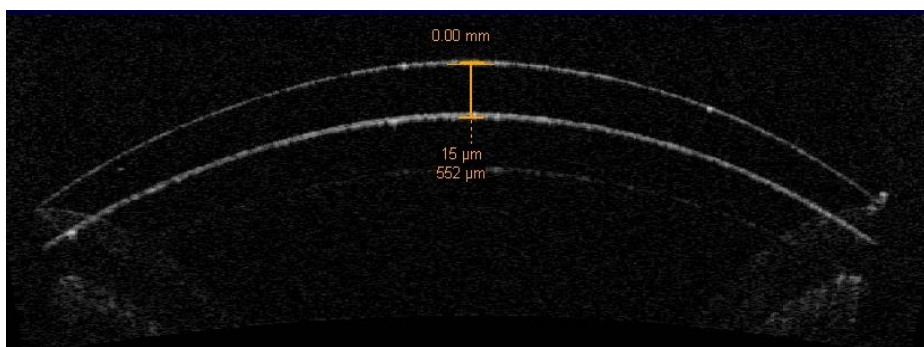
Характеристика искусственно созданной роговицы глаза для моделирования различных режимов селективной абляции

Исследование проведено на 50 контактных линзах (Лаборатория оптической коррекции зрения КОКОБ, Россия), имитирующих роговицу человеческого глаза. Линзы выполнены из полиметилметакрилата диаметром 10 мм, толщиной 520 ± 34 мкм, радиусом кривизны 7,8 мм и оптической силой $3,81 \pm 0,16$ D. Измерение толщины линз проводили на оптическом когерентном томографе переднего отрезка глаза Visante (Carl Zeiss Meditec, Германия) до абляции и после абляции. Оптическую силу линз оценивали на линзметре AUTO LENS METER TL-2000B (TOMEY). Оптическая сила комбинации контактная линза и абэррометрический шаблон была равна 0 D. Контактную линзу размечали при помощи маркера в меридиане 12 часов и помещали в шаблон строго по меридиану при помощи устройства собственной конструкции, исключающего децентрацию линзы (Рисунок 2А). Шаблон имел постоянную рефракцию.

Аберрации шаблона были стабильными при проведении измерений до и после моделирования операции. На шаблоне измеряли следующие параметры: аберрации ВФ, величину среднеквадратичного корня суммы всех оптических аберраций (RMS), оптических аберраций высшего порядка (RMS HO) и величины всех аберраций в виде коэффициентов Zernike по нотации Malacara на абберрометре WASCA (Wavefront Aberration Supported Customise Ablation) (Carl Zeiss Meditec, Германия) в скотопических условиях с максимально возможным на тестовом искусственном глазе диаметром анализируемой зоны в 5 мм. Аналогичным образом проводили измерения после проведения абляции. Полученные в результате измерений величины всех аберраций в виде коэффициентов Zernike по нотации Malacara с абберрометра WASCA, экспортировали в компьютер (CRS-Master) (Customized Refractive Surgery Master) для расчета персонализированного файла абляции (Carl Zeiss Meditec, Германия). Во всех случаях была проведена эксимерлазерная абляция по миопическому алгоритму. В результате абляции оптическая сила контактной линзы была наиболее близка к нулевой. Абляцию линз выполняли на эксимерном лазере MEL-80, работающего по технологии «летающего пятна» диаметром 0,7 мм с гауссовским профилем абляции и длиной волны 193 нм (Carl Zeiss Meditec, Германия) с диаметром оптической зоны 6 мм.



А



Б

Рисунок 2 – Установка и центрация контактной линзы в шаблон абберрометра WASCA (А), измерение толщины линзы на оптическом когерентном томографе Visante (Carl Zeiss Meditec, Германия) в режиме High Resolution Corneal до абляции (Б)

Экспериментальные линзы были разделены на 5 групп для изучения изменения АВП в разных режимах абляции. В 1-ой группе на 10 линзах проведена стандартная абляция в режиме Aberration Smart Ablation, подразумевающим отсутствие коррекции АВП и коррекцию аберраций только низших порядков, таких как дефокус. Во 2-ой группе на 10 линзах проведена абляция в режиме Wavefront-Guided по персонализированному файлу абляции с коррекцией АВП линз, полученных при помощи абберрометра WASCA, интегрированного в систему CRS-Master. В 3-ей группе на 10 линзах проведена абляция в режиме Wavefront-Guided Selective с коррекцией горизонтальной комы Z(3;1). В 4-ой группе на 10

линзах проведена абляция в режиме Wavefront-Guided Selective с коррекцией вертикальной комы Z(3;-1). В 5-ой группе на 10 линзах проведена абляция в режиме Wavefront-Guided Selective с коррекцией сферической аберрации Z(4;0). Экспериментальные и расчетные данные приведены для четырех диаметральных сечений на диаметре линзы 6 мм. Измерения толщины роговицы проводили на оптическом когерентном томографе переднего отрезка глаза Visante (Carl Zeiss Meditec, Германия) до операции и после операции (Рисунок 2Б). Вычисления проводили для двух значений толщин линзы: 1) исходная толщина линзы до проведения операции; 2) толщины линзы после абляции, Δu , Δh , мкм.

Общая характеристика обследованных пациентов

В Екатеринбургском Центре МНТК «Микрохирургия глаза» с 2010 по 2016 гг. было проведено обследование и лечение 472 пациента с миопией и сложным миопическим астигматизмом. В работу вошли результаты проспективного исследования и лечения 472 пациентов с миопией слабой, средней степени и сложным миопическим астигматизмом (944 глаз). Среди обследованных пациентов было 283 (60,1%) женщин и 189 (39,9%) мужчины. Критерии включения: лица мужского и женского пола в возрасте от 18 до 40 лет с миопией слабой, средней степени и сложным миопическим астигматизмом. Критерии исключения: лица мужского и женского пола в возрасте младше 18 и старше 40 лет, пациенты с нестабилизированной рефракцией, имеющие аутоиммунные заболевания, сахарный диабет, болезни соединительной ткани, ВИЧ-инфекцию, хронические воспаления век и глазного яблока, катаракта, глаукома, отслойка сетчатки, нейродермит, экзема, псориаз, дерматиты, заболевания онкологические и эндокринной системы, бронхиальная астма, синдром “сухого глаза”. Возраст больных варьировал от 18 до 40 лет (средний возраст $28,2 \pm 5,9$ лет), пациентов стратифицировали по полу и возрасту с 5-летним интервалом (Таблица 1).

Таблица 1 – Распределение пациентов по возрасту

Кол-во пациентов	Возраст, лет					Всего
	18-20	21-25	26-30	31-35	36-40	
Абс.	43	124	128	126	51	472
%	9,11	26,27	27,12	26,69	10,81	100

В группу сравнения включены 72 пациента в возрасте от 18 до 40 лет (31 мужчина, 41 женщина) перенесшие операцию LASIK. Пациенты группы сравнения не предъявляли жалоб на низкую остроту зрения вдаль и вблизи с очковой коррекцией, двоение, не имели затруднения при чтении, работе за компьютером, не пользовались глазными каплями.

Клиническое и офтальмологическое обследование пациентов

Клиническое обследование включало изучение жалоб, развития

заболевания, анамнеза жизни, данных осмотра. Офтальмологическое обследование до операции проводилось всем пациентам и включало: кераторефрактометрия, визометрия без циклоплегии и визометрия с циклоплегией, оптическая биометрия, исследование полей зрения, кератотопография, аберрометрия, исследование контрастной чувствительности, тонометрия, ультразвуковая пахиметрия, ультразвуковое А- и В-сканирование. После этого выполняли биомикроскопию, офтальмоскопию, исследование глазного дна с трехзеркальной линзой Гольдмана. Кераторефрактометрию проводили с использованием автоматического автокераторефрактометра Торсон KR-8900 (Япония) и автоматического автокераторефрактометра Торсон KR-1 (Япония). Для определения ОЗ использовали автоматический фороптер Торсон Auto Vision Tester CV-5000 (Япония) и набор пробных линз с оправой Carl Zeiss (Германия). Глубину передней камеры, толщину хрусталика и длину глаза определяли ультразвуковым биометром-пахиметром Tomey AL-3000 (Япония), толщину роговицы OcuScan RxP (Alcon, США). При ультразвуковом измерении длина глаз у обследуемых нами пациентов составляла от 23,68 до 28,34 мм (в среднем $25,02 \pm 0,64$ мм). Поля зрения исследовали на периметре Форстера, количественную пороговую периметрию - методом количественной оценки дефектов поля зрения на периметре Zeiss Meditec HFA-750i (Германия). Скрининговый метод исследования ВГД проводили на пневмотонометре Торсон СТ-80 (Япония) в положении сидя. Для контактного измерения ВГД использовали пневмотонометр Mentor 30 Classic (США).

ВГД у пациентов до лечения варьировало от 14 до 21 мм рт.ст. (в среднем $17,1 \pm 2,9$ мм рт.ст.). Для дополнительной оценки состояния стекловидного тела, сетчатки и сосудистой оболочки проводили ультразвуковое В-сканирование А/В-сканирующей системой Humphrey 835 (США). Биомикроскопию выполняли на щелевой лампе SL 30M Carl Zeiss (Германия). Офтальмоскопию выполняли переносным офтальмоскопом Heine Autofoc 2 с переносным зарядным устройством Heine Nica Tron S2 (Германия) и непрямым налобным бинокулярным офтальмоскопом Heine EN-20 (Германия), Keeler (Англия) с набором линз для бинокулярной офтальмоскопии 20 D (увеличение изображения 2,97х, поле зрения 50°), Triple 2 (72х, 60°), 28 D (2,13х, 58°). Исследование глазного дна проводили на щелевой лампе SL 30M Zeiss (Германия) с универсальной линзой Гольдмана OG3M с тремя зеркалами с углом наклона 59°, 67°, 73° и шириной обзора глазного дна и передней камеры в 120° (Ocular Instruments, США). Оптическую когерентную томографию (ОКТ) роговицы у пациентов с миопией выполняли на оптическом когерентном томографе Visante OCT (Carl Zeiss Meditec, Германия) с разрешением 5 мкм. Методом ОКТ определяли толщину роговицы до и после операции, толщину роговичного лоскута после операции. Полученные данные заносили в протокол.

Измерение толщины лоскута у пациентов после операции в центре роговицы и в 1, 2 и 3 мм от центра проводили на оптическом когерентном томографе Visante OCT (Carl Zeiss Meditec) в режиме режимов High Resolution Corneal Quad и High Resolution Corneal Single. Кератотопографическое

исследование роговицы проводили на кератотопографах ATLAS 995 и ATLAS 9000 (Carl Zeiss Meditec, Германия) путем трехкратного измерения для исключения субклинического кератоконуса, исследования роговичных АВП, для формирования персонализированного файла абляции при операциях Topography-guided LASIK на основе топографического измерения. Персонализированный файл для абляции роговицы рассчитывался, формировался и сохранялся на офтальмологической станции CRS-Master (Carl Zeiss Meditec, Германия) с последующей передачей через USB-flash накопитель в эксимерный лазер MEL-80 (Carl Zeiss Meditec, Германия). Перед операцией и через 1, 3, 6 и 12 месяцев исследовали контрастную чувствительность на частотах 3, 6, 12 и 18 циклов/градус на аппарате CSV-1000 (Vector Vision, США).

Методы исследования аберраций высшего порядка

Перед операцией и через 1, 3, 6 и 12 месяцев после операции измеряли аберрации ВФ, величину среднеквадратичного корня суммы всех оптических аберраций (RMS), оптических АВП (RMS HO) и величину АВП в виде коэффициентов Zernike по нотации Malacara и OSA в μm (мкм) в фотопических, а также в скотопических условиях, при немедикаментозном мидриазе с диаметром зрачка 6 мм на абберометре WASCA (Carl Zeiss Meditec, Германия). Данные абберометрического исследования переносили в CRS-Master (Carl Zeiss Meditec, Германия) для формирования персонализированного файла абляции при операциях Wavefront-Guided LASIK, Wavefront-Guided Selective LASIK, Wavefront-Guided Epi-LASIK, Wavefront-Guided Selective Epi-LASIK, Wavefront-Guided FemtoLASIK. Персонализированный файл для абляции роговицы рассчитывали, формировали и сохраняли на офтальмологической станции CRS-Master (Carl Zeiss Meditec, Германия) с последующей передачей через USB-flash накопитель в эксимерный лазер MEL-80 (Carl Zeiss Meditec, Германия).

Методы лазерной коррекции аберраций высшего порядка

Лазерную коррекцию АВП пациентам выполняли на двух офтальмологических лазерах: эксимерный лазер MEL-80 (Carl Zeiss Meditec, Германия) с частотой следования импульса 250 Гц и фемтосекундный лазер VisuMax (Carl Zeiss Meditec, Германия) с частотой следования импульса 500 кГц со стандартным уровнем энергии $150 \pm 10 \text{ nJ}$ в отделении лазерной хирургии Екатеринбургского центра МНТК «Микрохирургия глаза» в период 2006-2016 гг. Пациенты, получившие разные методы лазерной коррекции АВП были разделены на 11 групп (Таблица 2).

Стандартная операция LASIK

Операция LASIK была выполнена 72 пациентам с миопией и сложным миопическим астигматизмом. При анизометропии для решения о возможности проведения операции LASIK назначали пробную контактную коррекцию (патент РФ №2353342 от 27.04.2009). Непосредственно перед операцией LASIK после эпibuльбарной анестезии Алкаин (Alcon) трехкратно измеряли толщину в центре роговицы ультразвуковым датчиком пахиметра RXP (Alcon). Роговичный лоскут

формировали микрокератомом Moria Evolution 3E (Moria, Франция) с одноразовыми пластиковыми головками M2 Single Use (M2SU) 90 с вмонтированным металлическим лезвием для формирования лоскута толщиной 90 мкм. После формирования микрокератомом роговичного лоскута и его отгибания, трехкратно измеряли толщину стромального ложа роговицы в центре. Толщина лоскута в центральной части была автоматически вычислена ультразвуковым пахиметром путем вычитания минимального значения толщины стромального ложа после формирования лоскута из минимального значения толщины роговицы до формирования лоскута. Глаз пациента фиксировали пинцетом (патент на полезную модель № 63219 от 27.05.2007). Эксимерную лазерную абляцию в ходе операции проводили на эксимерном лазере MEL-80 (Carl Zeiss Meditec, Германия) в режиме ASA (Aberration Smart Ablation) с диаметром оптической зоны 6 мм. После проведения абляции ультразвуковым датчиком измеряли толщину стромального ложа в центре.

Таблица 2 – Группы оперированных пациентов с миопией и сложным миопическим астигматизмом

Неперсонали- зированные методы лечения	1 группа 72 пациента	Стандартная операция LASIK	
Неселектив- ные персонализи- рованные методы лечения	2 группа 40 пациентов	Топографический LASIK	
	3 группа 40 пациентов	Wavefront-Guided LASIK	
	4 группа 40 пациентов	Wavefront-Guided Epi-LASIK	
	5 группа 40 пациентов	Wavefront-Guided FemtoLASIK	
Фемтосекунд- ные методы лечения	6 группа 40 пациентов	Фемтосекундная лазерная экстракция роговичного лентикула (FLEx)	
	7 группа 40 пациентов	Микроинвазивная фемтосекундная лазерная экстракция роговичного лентикула (SMILE)	
Селективные персонализи- рованные методы лечения	8 группа 40 пациентов	Wavefront-Guided LASIK с селективной коррекцией трефойла	
	9 группа 40 пациентов	Wavefront-Guided LASIK с селективной коррекцией комы	9А подгруппа коррекция горизонтальной комы
			9Б подгруппа коррекция вертикальной комы
	10 группа 20 пациентов	Wavefront-Guided LASIK с селективной коррекцией квадрафойла и вторичного астигматизма	10А подгруппа коррекция квадрафойла
			10Б подгруппа коррекция вторичного астигматизма
	11 группа 40 пациентов	LASIK с коррекцией сферической аберрации	

Автоматически вычислялась толщина аблированной роговичной ткани путем вычитания из значения толщины стромы до абляции значения толщины стромы после абляции. После укладки, промывания лоскута и подлоскутного пространства измеряли общую толщину роговицы. В послеоперационном периоде во всех группах проводили лечение антибактериальными Тобрамицин (Tobramycin) и противовоспалительными Дексаметазон (Dexamethasone) препаратами в каплях - Тобрадекс (Alcon), гипотензивными препаратами в каплях с целью профилактики вторичной гипертензии Арутимол 0,5% (Bausch&Lomb) и слезозамещающими препаратами в виде геля Видисик (Bausch&Lomb).

Операцию топографический LASIK выполняли на основании экспортированных данных кератотопографии и введенных данных аберраций низшего порядка (дефокус, астигматизм).

Операцию Wavefront-Guided LASIK выполняли на основании измерения всех величин аберраций высшего порядка, таких как: кома, трейфойл, вторичный астигматизм, квадрафойл, сферическая аберрация в виде коэффициентов Zernike на аберрометре WASCA и данных визометрии.

Операцию Wavefront-Guided Epi-LASIK с формированием эпителиального лоскута применяли эпимикрокератом Epi-K™ Moria Evolution 3E (Moria, Франция). При операции Wavefront-Guided FemtoLASIK формировали роговичный лоскут с запланированной толщиной 100 мкм, диаметром 8,5 мм и ножкой на 12 ч с помощью фемтосекундного лазерного микрокератома VisuMax (Carl Zeiss Meditec).

Операцию фемтосекундная лазерная экстракция роговичного лентикула (FLEx) была выполнена с формированием роговичного лоскута и роговичного лентикула, удаляемого с рефракционной целью с использованием фемтосекундного лазера VisuMax (Carl Zeiss Meditec) со стандартным уровнем энергии $150 \pm 10 \text{ nJ}$.

Операцию микроинвазивная фемтосекундная лазерная экстракция роговичного лентикула (SMILE) была выполнена с формированием роговичного клапана и роговичного лентикула, который удаляли с рефракционной целью через дугообразный разрез роговичного клапана на протяжении 3.67 мм.

Операцию Wavefront-Guided LASIK Selective с селективной коррекцией АВП - кома, трейфойл, вторичный астигматизм, квадрафойл выполняли на основании измерения величины корректируемой АВП, таких как: кома, трейфойл, вторичный астигматизм, квадрафойл в виде коэффициентов Zernike на аберрометре WASCA и данных визометрии.

В компьютере CRS-Master из переданных данных выбирали АВП, абсолютные величины которых более 0,1375 мкм, затем из этих величин выбирали самую большую по абсолютному значению величину АВП и только ее из всех АВП закладывали в рассчитываемый файл абляции (патент РФ № 2420251 от 10.06.2011). В этот же компьютер вводили вручную данные аберраций низшего порядка (дефокус и астигматизм), полученные до операции путем визометрии. Полученный персонализированный файл абляции загружали непосредственно в

операционный компьютер эксимерного лазера для проведения интрастромальной эксимерной лазерной абляции с активацией системы OcuLign для распознавания глаза пациента (Eye Registration) и активации функции (Offset / Torsion) после поднятия роговичного лоскута для компенсации циклоторсии и смещения центра зрачка при абляции.

Интрастромальную эксимерную лазерную абляцию в ходе операции проводили на эксимерном лазере MEL-80 (Carl Zeiss Meditec, Германия) в режиме Wavefront-Guided Selective ASA (Aberration Smart Ablation) с диаметром оптической зоны 6 мм. Формирование роговичного лоскута, его интраоперационное ультразвуковое кератопахиметрическое измерение, отгибание роговичного лоскута, его адаптацию к стромальному ложу и послеоперационное лечение проводили аналогично при операции Wavefront-Guided LASIK.

Операцию LASIK с комбинацией миопического и гиперметропического профилей абляции роговицы (LASIK с коррекцией сферической аберрации) (патент № 2301651 от 27.06.2007). Эксимерную интрастромальную лазерную абляцию в ходе операции проводили на эксимерном лазере MEL-80 (Carl Zeiss Meditec, Германия) с диаметром оптической зоны 6 мм. Миопическую интрастромальную абляцию выполняли глубиной соответствующей величине корректируемой близорукости, увеличенной на 2,0 диоптрии при слабой степени миопии и на 2,5 диоптрии при средней степени миопии. Затем проводили второй этап операции: гиперметропическую интрастромальную абляцию глубиной, соответствующей 1,0 диоптрии при слабой степени миопии и 1,5 диоптрии при средней степени миопии (патент РФ № 2301651 от 27.06.2007). Формирование роговичного лоскута, его интраоперационное ультразвуковое кератопахиметрическое измерение, отгибание роговичного лоскута, его адаптацию к стромальному ложу и послеоперационное лечение проводили аналогично при операции Wavefront-Guided LASIK.

РЕЗУЛЬТАТЫ СОБСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты математического и компьютерного моделирования оптики глаза

Разработанная нами модель глаза, состоящая из роговицы, передней камеры, хрусталика, стекловидного тела и сетчатки, отличается от ранее предложенных моделей тем, что роговица представлена двумя преломляющимися поверхностями (передней и задней), хрусталик имеет переменный показатель преломления и привязан к оптической оси глаза, сетчатка представлена только центральной частью. Биометрическое моделирование роговицы глаза осуществляли при действии внутреннего давления на основе нелинейной краевой задачи теории упругости с использованием численного метода решения и анализировали состояния роговицы в дооперационный и послеоперационный периоды (Рисунок 3). Для моделирования глубины абляции в эксперименте была рассчитана неосесимметричная формула с $a(0, \phi) \equiv A_0$. При расчете формы

передней поверхности роговицы и аббераций моделируемого глаза после лечения получены следующие результаты.

Толщина лоскута составила 140 мкм, глубина абляции в центре – 37 мкм, радиус абляции – 3 мм, сферозэквивалент коррекции – (-3,0 D). Разложение функции аббераций по полиномам Цернике вплоть до шестого порядка имело для контрольного варианта следующие коэффициенты, мкм:

$$\begin{aligned} Z(1, -1) &= -0,32, \\ Z(2,0) &= 1,7, \quad Z(2,2) = -0,69, \\ Z(4,0) &= 0,90, \quad Z(5, -5) = -0,26. \end{aligned}$$

Модули всех остальных коэффициентов для полиномов 1-6-го порядков были меньше 0,2 мкм; Радиус зрачка был равен 2.9 мм как до, так и после лечения при моделировании.

В результате модулированной операции коэффициент $Z(4,0)$ возрос с 0,66 мкм до 0,90 мкм, что качественно согласуется с клиническими результатами LASIK: часто до лечения сферическая абберация глаза мала, а после – становится больше и начинает снижать зрение пациента.

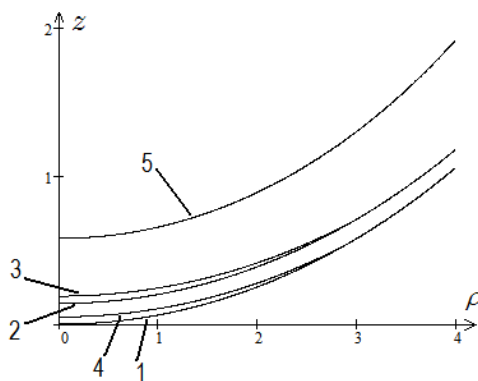


Рисунок 3 – Модель роговицы до и после лечения, сечение плоскостью проходящей через ось глаза, верхняя часть: 1 – Передняя поверхность роговицы до начала операции, 2 – ложе до начала абляции, 3 – ложе после абляции, 4 – Передняя поверхность роговицы после укладывания лоскута, 5 - ЗПР до и после операции. Единица длины – 1 мм.

Результаты изменений АВП при различных режимах селективной абляции в эксперименте

Изучение изменений АВП в разных режимах абляции проведено на экспериментальных линзах. В 1-ой (стандартная абляция) и 2-ой (Wavefront-Guided по персонализированному файлу абляции) группах АВП статистически значимо не изменялись ($p > 0,05$). В 3-ей группе (Wavefront-Guided Selective с коррекцией горизонтальной комы) наблюдалось статистически значимое уменьшение абберации $Z(3;1)$ ($p < 0,05$). Наблюдалась статистически значимая корреляция между полученными изменениями и планируемыми изменениями абберации $Z(3;1)$ с коэффициентом корреляции $R = 0,97$.

В 4-ой группе (Wavefront-Guided Selective с коррекцией вертикальной комы) наблюдалось статистически значимое уменьшение абберации $Z(3;-1)$ ($p < 0,05$).

Наблюдалась статистически значимая корреляция между полученными изменениями и планируемыми изменениями аберрации $Z(3;-1)$ с коэффициентом корреляции $R = 0,98$.

В 5-ой группе (Wavefront-Guided Selective с коррекцией сферической аберрации) наблюдалось статистически значимое уменьшение аберрации $Z(4;0)$ ($p < 0,05$). Наблюдалась статистически незначимая корреляция между полученными изменениями и планируемыми изменениями аберрации $Z(4;0)$ с коэффициентом корреляции $R = 0,48$.

Во всех группах после абляции наблюдалось статистически значимое увеличение RMS, связанное с изменением рефракции экспериментальных линз. Результаты измерений аберраций 3-го и 4-го порядков, которые статистически значимо изменились по модулю в виде коэффициентов Zernike ($Z_3; 4$) по нотации Malacara до и после абляции в 3-ей, 4-ой и 5-ой группах представлены в (Таблица 3).

Таблица 3 – Величины АВП линз по модулю до и после эксимерной лазерной абляции * ($p < 0,05$)

Вид аберраций	До абляции, мкм	После абляции, мкм
$Z(3;1)$ в 3-ей группе с Wavefront-Guided абляцией с коррекцией горизонтальной комы ($n=10$)	$0,28 \pm 0,03$	$0,09 \pm 0,07^*$
$Z(3;-1)$ в 4-ой группе с Wavefront-Guided абляцией с коррекцией вертикальной комы ($n=10$)	$0,31 \pm 0,08$	$0,09 \pm 0,06^*$
$Z(4;0)$ в 5-ой группе с Wavefront-Guided абляцией с коррекцией сферической аберрации ($n=10$)	$0,41 \pm 0,05$	$0,15 \pm 0,10^*$

В 1-ой группе АВП статистически значимо не изменялись ($p > 0,05$), так как стандартная абляция по миопическому алгоритму рассчитана только на коррекцию дефокуса – аберрации низшего порядка и теоретически не должна влиять на АВП. Статистически значимое уменьшение аберраций $Z(3;1)$, $Z(3;-1)$ и $Z(4;0)$ в 3-ей, 4-ой и 5-ой группах соответственно показывает эффективность Wavefront-Guided Selective абляции.

Таким образом, при выполнении Wavefront-guided абляции по миопическому алгоритму на экспериментальных линзах ожидаемого уменьшения величин АВП выявлено не было. Применение Wavefront-Guided Selective абляции позволило эффективно корректировать отдельные АВП. Применение Wavefront-Guided Selective абляции целесообразно в коррекции клинически значимых АВП в отличие от Wavefront-Guided абляции.

Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния роговицы глаза под действием ВГД

Для создания расчетной конечноэлементной модели роговицы глаза использован объемный конечный элемент с десятью узлами и тридцатью

степенями свободы. Модель содержит 14887 узлов и 8670 конечных элементов и позволяет учитывать реальную геометрию роговицы и моментное напряженное состояние. Изменение изгибных напряжений в диаметральной сечении 180° - 0° модели роговицы глаза представлено двумя фрагментами на рисунке 4. До и после операции наибольшие напряжения наблюдаются на периферической части поверхности роговицы. Их максимальная величина равна 13,42 кПа до операции и 17,46 кПа после операции. В центральной части роговицы до операции максимальная величина анализируемых напряжений составляет 8,72 кПа, а после операции – 11,67 кПа.

Уменьшение толщины роговицы сопровождается увеличением изгибных напряжений в центральной части роговицы на 25% и более, двукратным возрастанием применительно к сжимающим изгибным напряжениям на периферической части. При деформации 7,38%, которая имеет место в периферической части роговицы по данным расчета, величина напряжений разрыва незначительно превышает 50 кПа. Таким образом, суммарное уменьшение толщины роговицы на 120 – 150 мкм в результате абляции и отгибания лоскута не приводит к напряженному состоянию роговицы близкому к потере прочности.

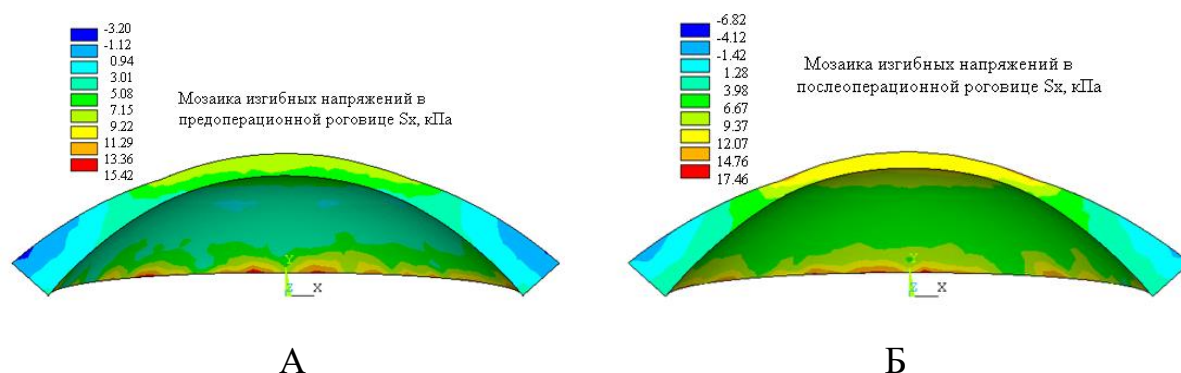


Рисунок 4 – Изменение изгибных напряжений в диаметральной сечении модели роговицы глаза: А – до операции, Б – после операции

Предложенный численный метод расчета напряженно-деформированного состояния роговицы глаза позволяет учитывать ее реальную геометрию в рамках расчетной модели. Максимальная относительная погрешность составляет 34,42% для Wavefront-Guided LASIK и 18,34% для Wavefront-Guided FemtoLASIK.

Сравнительная характеристика результатов хирургического лечения пациентов с миопией и сложным миопическим астигматизмом

Сравнительная характеристика результатов хирургического лечения пациентов с миопией и сложным миопическим астигматизмом различными методами включала оценку следующих признаков: Сферический эквивалент, остроту зрения без коррекции, остроту зрения с коррекцией, изменение АВП, RMS НО, контрастную чувствительность, толщину сформированного роговичного лоскута и клапана.

Результаты исследования во 2-й, 3-й, 6-й и 7-й группах сравнивали с результатами 1-й группы. Результаты лечения пациентов 4-й и 5-й групп сравнивали с результатами лечения 3-й группы, в которой применен алгоритм коррекции предоперационных АВП.

Проведенное исследование позволило оценить средние значения сферического эквивалента рефракции до и после хирургического лечения в исследованных группах. Во всех группах пролеченных пациентов сферический эквивалент уменьшился.

Сравнительный анализ средних значений сферический эквивалент показал, что до операции наибольшую часть пациентов составили лица со средней степенью миопии. После операции рефракция получена эметропической в 1-й, 3-й, 5-й, 6-й, 7-й группах пациентов. Миопия слабой степени получена во 2-й и 4-й группах пациентов. Средние значения НКОЗ до и после лечения в исследованных группах увеличились.

Полученная НКОЗ была наименьшей в 1-й и 2-й группах при коррекции миопии методом стандартного LASIK и топографического LASIK. Максимальная НКОЗ была достигнута в 3-й, 5-й и 7-й группах методами Wavefront-Guided LASIK, Wavefront-Guided FemtoLASIK и микроинвазивной фемтосекундной лазерной экстракции роговичного лентикула (SMILE). Сравнительная оценка средних значений КОЗ до и после лечения в исследованных группах показала неоднородность полученных результатов.

Полученная КОЗ была наименьшей во 2-й группе при коррекции миопии и сложного миопического астигматизма методом топографический LASIK. Максимальная КОЗ была достигнута в 3-й группе при лечении пациентов методом Wavefront-Guided LASIK. В 1-й и 4-й группах КОЗ увеличилась. В 5-й, 6-й и 7-й группах пролеченных пациентов КОЗ практически не изменилась.

Проведенное исследование позволило оценить RMS НО до и после хирургического лечения в исследованных группах. Во всех группах пролеченных пациентов RMS НО увеличился.

Предоперационный уровень RMS НО в 6-й группе достигал среднего значения $0,17 \pm 0,09 \text{ мкм}$, в 3-й группе $0,33 \pm 0,07 \text{ мкм}$, в остальных группах варьировал от $0,30 \pm 0,06$ до $0,34 \pm 0,12 \text{ мкм}$. В послеоперационном периоде RMS НО увеличился в 4-й и 5-й группах - в 1,3 раза, в 3-й, во 2-й и 7-й группах - в 1,4 раза, в 1-й группе - в 1,5 раза, 6-й группах - в 1,7 раза.

Средние значения RMS НО показали прирост АВП в послеоперационном периоде во всех группах пациентов. Полученные значения статистически значимы. Средние значения горизонтальной комы Z(3;1) после хирургического лечения в исследованных группах увеличились.

До операции средняя величина горизонтальной комы Z(3;1) в 4-й группе составляла $0,14 \pm 0,22 \text{ мкм}$, что значительно меньше, чем в других группах пациентов. Этот показатель в 1-й, 2-й, 3-й группах варьировал от $0,22 \pm 0,37 \text{ мкм}$ до $0,25 \pm 0,36 \text{ мкм}$. Величина горизонтальной комы Z(3;1) до операции в 5-й, 6-й, 7-й группах варьировала от $0,29 \pm 0,21 \text{ мкм}$ до $0,33 \pm 0,27 \text{ мкм}$, что было выше в сравнении с остальными группами. В послеоперационном периоде средняя

величина горизонтальной комы $Z(3;1)$ в 7-й группе увеличилась в 1,3 раза, в 1-й, 2-й и 3-й группах - в 1,6-1,7 раза. В 5-й и 6-й группах средняя величина горизонтальной комы $Z(3;1)$ увеличилась в 2 раза, в 4-й группе - в 5,6 раз.

Примененные методы коррекции миопии и сложного миопического астигматизма вызывают неодинаковые оптические изменения передней поверхности роговицы относительно горизонтальной комы $Z(3;1)$, при этом можно отметить зависимость между полученной толщиной роговичного лоскута в ходе оперативного вмешательства и величиной горизонтальной комы $Z(3;1)$.

Средние значения вертикальной комы $Z(3;-1)$ после хирургического лечения миопии и сложного миопического астигматизма в исследованных группах увеличились. Средняя величина вертикальной комы $Z(3;-1)$ в послеоперационном периоде в 3-й, 6-й и 7-й группах увеличилась в 1,1-1,8 раза, в 1-й, 2-й и 5-й группах - в 2 раза, в 4-й группе - в 2,5 раза.

Полученный результат показывает, что поверхностная абляция даже с коррекцией предоперационных АВП, выполненная у пациентов при коррекции миопии и сложного миопического астигматизма вызывает значительное индуцирование не только горизонтальной комы $Z(3;1)$, но и вертикальной комы $Z(3;-1)$.

Средние значения величины трейфойла $Z(3;3)$ до хирургического лечения в исследованных группах варьировали от $0,03 \pm 0,05 \mu\text{m}$ до $-0,37 \pm 0,16 \mu\text{m}$. Во всех группах пролеченных пациентов средние значения трейфойла $Z(3;3)$ увеличились. Во 2-й, 5-й, 6-й и 7-й группах пациентов прирост средней величины трейфойла $Z(3;3)$ был незначительный в послеоперационном периоде. В 4-й и 5-й группах пациентов прирост средней величины трейфойла $Z(3;3)$ был наибольший в послеоперационном периоде. В послеоперационном периоде средняя величина трейфойла $(3;3)$ увеличилась в 1,1 раза в 6-й и 7-й группах пациентов, в 1,2-1,3 раза - в 1-й, 2-й, 3-й и 5-й группах пациентов, в 1,7 раза - в 4-й группе пациентов.

Полученный результат показывает, что поверхностная абляция даже с коррекцией предоперационных АВП, выполненная у пациентов при коррекции миопии и сложного миопического астигматизма, вызывает индуцирование трейфойла $Z(3;3)$.

Средние значения величины трейфойла $Z(3;-3)$ до хирургического лечения в исследованных группах пациентов варьировали от $0,01 \pm 0,12$ до $0,1 \pm 0,06 \mu\text{m}$. В 5-й группе у пациентов пролеченных методом Wavefront-Guided LASIK средние значения трейфойла $Z(3;-3)$ уменьшились. В остальных группах пролеченных пациентов средние значения трейфойла $Z(3;-3)$ увеличились.

Послеоперационные средние значения величины трейфойла $Z(3;-3)$ увеличились, за исключением 3-й и 5-й группы пациентов. Абсолютные величины прироста трейфойла $Z(3;-3)$ в послеоперационном периоде были незначительны.

Во 2-й, 3-й и 7-й группах средняя величина трейфойла $Z(3;-3)$ в послеоперационном периоде увеличилась в 1,1-1,3 раза, в 4-й и 6-й группах - в 1,5-1,8 раза.

Проведенное исследование позволило оценить средние значения сферической аберрации $Z(4;0)$ до и после хирургического лечения в исследованных группах.

В 3-й, 6-й и 7-й группах пациентов средняя величина сферической аберрации $Z(4;0)$ до операции варьировала от $0,03 \pm 0,23$ до $-0,17 \pm 0,25 \mu\text{m}$, в 1-й, 2-й, 4-й и 5-й группах - от $0,04 \pm 0,16$ до $0,08 \pm 0,23 \mu\text{m}$. Во всех группах пролеченных пациентов средние значения сферической аберрации $Z(4;0)$ увеличились в отрицательную сторону.

В послеоперационном периоде прирост величины сферической аберрации $Z(4;0)$ был наименьший в 5-й, 6-й, 7-й группах пациентов, а наибольший – в 1-й, 2-й и 3-й группах.

В 1-й, 2-й и 3-й группах пролеченных пациентов средние значения вторичного астигматизма $Z(4;2)$ после операции увеличились. В 4-й, 5-й, 6-й и 7-й группах пролеченных пациентов средние значения вторичного астигматизма $Z(4;2)$ после операции уменьшились.

Послеоперационная величина вторичного астигматизма $Z(4;2)$ во 2-й группе пациентов увеличилась в 1,2 раза, в 1-й и 3-й группах пациентов - в 1,5 раза. В данных группах были применены способы коррекции миопии и сложного миопического астигматизма при применении стандартного LASIK, топографического LASIK и Wavefront-Guided LASIK.

Послеоперационная величина вторичного астигматизма $Z(4;2)$ в 4-й, 5-й и 6-й группах пациентов уменьшилась в 0,6 раза, в 7-й группе пациентов – в 0,9 раза. В описанных группах были применены способы коррекции миопии и сложного миопического астигматизма при применении Wavefront-Guided Epi-LASIK, Wavefront-Guided FemtoLASIK, фемтосекундной лазерной экстракции роговичного лентикюла (FLEx) и микроинвазивной фемтосекундной лазерной экстракции роговичного лентикюла (SMILE).

В группах пролеченных пациентов средние значения вторичного астигматизма $Z(4;-2)$ увеличились, за исключением пациентов 1-й группы, в которой данный показатель уменьшился в 0,5 раза после применения метода стандартного LASIK.

Послеоперационная величина вторичного астигматизма $Z(4;-2)$ во 2-й, 3-й, 4-й группах увеличилась в 1,3 раза, в 5-й и 6-й группах увеличилась в 1,6 раза, в 7-й – в 2,3 раза.

В исследованных группах пациентов сравнены средние значения квадрафойла $Z(4;4)$ до и после хирургического лечения. В 1-й и 4-й группах пролеченных пациентов методом стандартного LASIK и Wavefront-guided FemtoLASIK средние значения квадрафойла $Z(4;4)$ в послеоперационном периоде уменьшились в 0,7-0,8 раза. В остальных группах пролеченных пациентов средние значения квадрафойла $Z(4;4)$ в послеоперационном периоде увеличились.

Наибольший прирост показателя квадрафойла $Z(4;4)$ (в 2 раза) был определен в 7-й группе при лечении пациентов методом микроинвазивной фемтосекундной лазерной экстракции роговичного лентикюла (SMILE).

В исследованных группах пациентов сравнены средние значения квадратофойла Z(4;-4) до и после хирургического лечения. В 1-й и 4-й группах пролеченных пациентов методом стандартного LASIK и wavefront-guided FemtoLASIK средние значения квадратофойла Z(4;-4) в послеоперационном периоде уменьшились в 0,7 раза. В остальных группах пролеченных пациентов средние значения квадратофойла Z(4;-4) в послеоперационном периоде увеличились.

Наибольший прирост показателя квадратофойла Z(4;-4) (в 2 раза) был определен в 7-й группе при лечении пациентов методом микроинвазивной фемтосекундной лазерной экстракции роговичного лентикюла (SMILE).

В проведенном исследовании сравнены средние значения контрастной чувствительности (3 цикл/градус) до и после хирургического лечения в исследованных группах.

В 1-й, 2-й, 3-й и 4-й группах у пациентов, пролеченных методом LASIK, Топографический LASIK, Wavefront-Guided LASIK и Wavefront-Guided FemtoLASIK, средние значения контрастной чувствительности (3 цикл/градус) уменьшились. В остальных группах пролеченных пациентов средние значения контрастной чувствительности (3 цикл/градус) не изменились.

В 1-й, 2-й, 3-й и 4-й группах у пациентов средние значения контрастной чувствительности (6 цикл/градус) уменьшились. В 6-й и 7-й группах пролеченных пациентов средние значения контрастной чувствительности (6 цикл/градус) не изменились. В 5-й группе у пациентов, пролеченных методом wavefront-guided FemtoLASIK среднее значения контрастной чувствительности (6 цикл/градус) увеличилось.

Проведенное исследование позволило оценить средние значения контрастной чувствительности (12 цикл/градус) до и после хирургического лечения в исследованных группах. В 1-й, и 2-й группах у пациентов средние значения контрастной чувствительности (12 цикл/градус) уменьшились. В 3-й, 4-й, 5-й 6-й и 7-й группах пролеченных пациентов средние значения контрастной чувствительности (12 цикл/градус) не изменились.

Проведенное исследование позволило оценить средние значения контрастной чувствительности (18 цикл/градус) до и после хирургического лечения в исследованных группах. В 1-й, 2-й и 3-й, группах у пациентов средние значения контрастной чувствительности (18 цикл/градус) уменьшились. В 4-й, 5-й 6-й и 7-й группах пролеченных пациентов средние значения контрастной чувствительности (18 цикл/градус) не изменились.

Селективная коррекция аберраций высшего порядка

Результаты коррекции Wavefront-Guided LASIK Selective аберраций 3 порядка (трефойл) у пациентов 8 группы

Результаты лечения пациентов 8-ой группы сравнивали с результатами лечения пациентов 3-й группы. НКОЗ до операции в 3-ей и 8-ой группах была $0,05 \pm 0,08$; $0,05 \pm 0,03$ соответственно и после операции составила $0,86 \pm 0,04$; $0,96 \pm 0,09$ соответственно ($p > 0,05$). Сферический эквивалент до операции в 3-ей

и 8-ой группах составил $-4,67 \pm 1,94D$; $-4,3 \pm 0,95D$ соответственно и после операции стал $0,01 \pm 0,33 D$; $0 \pm 0,12 D$ соответственно ($p > 0,05$).

КОЗ до операции в 3-ей и 8-ой группах была $1,0 \pm 0,14$; $0,99 \pm 0,03$ соответственно и после операции $1,0 \pm 0,09$; $0,99 \pm 0,03$ соответственно ($p > 0,05$). Среднеквадратичный корень суммы аберраций высшего порядка (RMS HO) до операции в 3-ей и 8-ой группах был $0,33 \pm 0,07 \mu m$, $0,23 \pm 0,07 \mu m$ соответственно и после операции увеличился до $0,46 \pm 0,25 \mu m$, $0,41 \pm 0,07 \mu m$ соответственно ($p > 0,05$).

Величина сферической аберрации глаз в 3-ей и 8-ой группах до операции была $0,03 \pm 0,23 \mu m$; $-0,07 \pm 0,15 \mu m$, после операции увеличилась в этих группах в отрицательную сторону до $-0,62 \pm 0,16 \mu m$; $-0,51 \pm 0,28 \mu m$ соответственно ($p > 0,05$). Величина трейфола Z(3;3) в 3-ей группе до операции была $-0,37 \pm 0,16 \mu m$ и после операции статистически значимо не изменилась и составила $-0,38 \pm 0,24 \mu m$ ($p > 0,05$). Величина трейфола Z(3;3) в 8-ой группе до операции была $-0,37 \pm 0,16$ и после операции статистически значимо уменьшилась и составила $-0,15 \pm 0,24 \mu m$ ($p < 0,05$).

Показатели контрастной чувствительности после операции Wavefront-guided LASIK в 3-ей группе на средних частотах были статистически достоверно меньше ($p < 0,05$), чем в группе Wavefront-guided LASIK Selective с селективной коррекцией трейфола Z(3;3) в 8-ой группе.

Wavefront-Guided LASIK Selective с селективной коррекцией трейфола Z(3;3) уменьшает величину трейфола, что позволяет получить более высокие значения контрастной чувствительности в послеоперационном периоде по сравнению с Wavefront-Guided LASIK.

Результаты коррекции Wavefront-Guided LASIK Selective аберраций 3 порядка (кома) у пациентов 9-ой группы

Результаты лечения пациентов 9 – ой группы сравнивали с результатами лечения пациентов 3-й группы. Третью группу составили 20 пациентов (40 глаз), которым была проведена Wavefront-Guided LASIK. Пациенты были разделены на 2 подгруппы: с селективной коррекцией горизонтальной комы (подгруппа А) и с селективной коррекцией вертикальной комы (подгруппа Б).

Девятую А подгруппу составили 20 пациентов (40 глаз), которым была проведена операция Wavefront-Guided LASIK Selective с селективной коррекцией горизонтальной комы Z(3;1). Девятую Б подгруппу составили 20 пациентов (40 глаз), которым была проведена операция Wavefront-Guided LASIK Selective с селективной коррекцией вертикальной комы Z(3;-1).

НКОЗ до операции в 3-ей группе, 9-ой А и 9-ой Б подгруппах была $0,05 \pm 0,02$; $0,09 \pm 0,07$ и $0,08 \pm 0,06$ соответственно и после операции $0,86 \pm 0,04$; $0,95 \pm 0,12$ и $0,93 \pm 0,21$ соответственно ($p < 0,05$). Сферический эквивалент до операции в 3-ей группе, 9-ой А и 9-ой Б подгруппах составил $-4,67 \pm 1,94D$; $-3,55 \pm 1,39D$ и $-4,14 \pm 1,37 D$ соответственно и после операции $0,01 \pm 0,33 D$; $0,15 \pm 0,27 D$ и $0,11 \pm 0,25$ соответственно ($p < 0,05$).

КОЗ до операции в 3-ей группе, 9-ой А и 9-ой Б подгруппах была $1,0 \pm 0,14$; $0,99 \pm 0,02$ и $0,99 \pm 0,01$ соответственно и после операции $1,00 \pm 0,09$; $1,0 \pm 0,07$ и $0,97 \pm 0,12$ соответственно ($p > 0,05$). Среднеквадратичный корень суммы аберраций высшего порядка (RMS HO) до операции в 3-ей группе, 9-ой А и 9-ой Б подгруппах был $0,33 \pm 0,07 \mu\text{m}$, $0,31 \pm 0,1 \mu\text{m}$ и $0,22 \pm 0,06 \mu\text{m}$ соответственно и после операции увеличился до $0,46 \pm 0,25 \mu\text{m}$, $0,39 \pm 0,08 \mu\text{m}$ и $0,46 \pm 0,17 \mu\text{m}$ соответственно ($p < 0,05$).

Величина сферической аберрации глаз в 3-ей группе, 9-ой А и 9-ой Б подгруппах до операции была $0,03 \pm 0,23 \mu\text{m}$; $-0,08 \pm 0,22 \mu\text{m}$ и $-0,07 \pm 0,18 \mu\text{m}$, после операции увеличилась во всех группах в отрицательную сторону до $-0,62 \pm 0,16 \mu\text{m}$; $-0,33 \pm 0,23 \mu\text{m}$ и $-0,44 \pm 0,26 \mu\text{m}$ соответственно ($p < 0,05$).

Величина вертикальной комы глаз в 3-ей группе, 9-ой А и 9-ой Б группах до операции была $0,08 \pm 0,31 \mu\text{m}$; $0,02 \pm 0,17$ и $0,07 \pm 0,38$ соответственно и после операции практически не изменилась составила $0,07 \pm 0,46 \mu\text{m}$; $0,08 \pm 0,28 \mu\text{m}$ и $0,07 \pm 0,32 \mu\text{m}$ соответственно ($p > 0,05$).

Величина горизонтальной комы глаз до операции была $0,22 \pm 0,37 \mu\text{m}$; $-0,12 \pm 0,65$ и $0,06 \pm 0,18$ соответственно и после операции практически не изменилась и составила $0,38 \pm 0,7 \mu\text{m}$; $0,06 \pm 0,58$ и $0,12 \pm 0,44$ ($p > 0,05$). Показатели контрастной чувствительности после операции статистически значимо не изменились. Наблюдалась статистически значимая высокая корреляция между получаемыми изменениями комы и величиной используемой в селективной коррекции комы в 9-ой А и 9-ой Б подгруппах. В 3-ей группе данной корреляции не наблюдалось.

Селективная коррекция комы с использованием Wavefront-Guided LASIK Selective с коррекцией аберраций 3 порядка не позволяет полностью устранить кому, но позволяет влиять на величину изменений комы во время операции.

Результаты коррекции Wavefront-Guided LASIK Selective аберраций 4 порядка (квадрафойл и вторичный астигматизм) у пациентов 10-ой группы

Результаты лечения пациентов 10-ой группы сравнивали с результатами лечения пациентов 3-й группы.

3-ую группу составили 20 пациентов (40 глаз) которым была проведена Wavefront-Guided LASIK с полной коррекцией всех АВП. Пациенты были разделены на 2 подгруппы: с селективной коррекцией квадрафойла (подгруппа А) и с селективной коррекцией вторичного астигматизма (подгруппа Б).

10 А подгруппа - 20 пациентов (40 глаз), которым была проведена операция Wavefront-Guided LASIK Selective с селективной коррекцией квадрафойла Z(4;4) и Z(4;-4).

10 Б подгруппа - 20 пациентов (40 глаз), которым была проведена операция Wavefront-Guided LASIK Selective с селективной коррекцией вторичного астигматизма Z(4;2), Z(4;-2)

НКОЗ до операции в 3-ей группе, 10-ой А и 10-ей Б подгруппах была $0,05 \pm 0,02$; $0,07 \pm 0,04$ и $0,06 \pm 0,02$ соответственно и после операции $0,86 \pm 0,04$; $0,91 \pm 0,23$ и $0,94 \pm 0,11$ соответственно ($p > 0,05$). Сферический эквивалент (СЭ) до

операции в 3-ей группе, 10-ой А и 10-ей Б подгруппах составил $-4,67 \pm 1,94$ D; $-3,08 \pm 0,77$ D; $-3,76 \pm 1,1$ D соответственно и после операции $0,01 \pm 0,33$ D; $0,16 \pm 0,44$ D; $0,14 \pm 0,41$ D соответственно ($p > 0,05$).

КОЗ до операции в 3-ей группе, 10-ой А и 10-ей Б подгруппах была $1,0 \pm 0,14$; $0,96 \pm 0,11$; $0,98 \pm 0,07$ соответственно и после операции $1,0 \pm 0,09$; $0,97 \pm 0,06$; $0,99 \pm 0,03$ соответственно ($p > 0,05$).

Во всех группах до операции статистически достоверной разницы в значениях квадрафойла и вторичного астигматизма выявлено не было.

Отклонения от запланированных значений квадрафойла Z(4;4) и Z(4;-4) и вторичного астигматизма Z(4;2) и Z(4;-2) после Wavefront-Guided LASIK носили случайный характер и в среднем составили $\pm 0,2$ μm .

Было принято решение разделить группу Wavefront-Guided LASIK на подгруппы с абсолютными значениями менее $0,2$ μm укладывающимися в случайные изменения и более $0,2$ μm .

В 3-ей группе Wavefront-Guided LASIK, где величины квадрафойла Z(4;4) и Z(4;-4) и вторичного астигматизма Z(4;2) и Z(4;-2) до операции были менее $0,2$ μm и составили $0,08 \pm 0,05$ μm и $0,08 \pm 0,05$ μm соответственно, и после операции составили $0,06 \pm 0,18$ μm и $0,04 \pm 0,26$ μm соответственно, статистически значимых изменений между до и послеоперационными величинами не наблюдалось.

В 3-й группе Wavefront-Guided LASIK где величины квадрафойла Z(4;4) и Z(4;-4) и вторичного астигматизма Z(4;2) и Z(4;-2) до операции были более $0,2$ μm и составили $0,31 \pm 0,12$ μm и $0,27 \pm 0,06$ μm соответственно и после операции составили $0,01 \pm 0,2$ μm и $-0,02 \pm 0,2$ μm соответственно наблюдалось статистически значимое уменьшение ($p < 0,05$).

В 10 А подгруппе с селективной Wavefront-Guided LASIK коррекцией квадрафойла Z(4;4) и Z(4;-4) и в 10 Б подгруппе с коррекцией вторичного астигматизма Z(4;2) и Z(4;-2) были выбраны абсолютные величины квадрафойла Z(4;4) и Z(4;-4) и вторичного астигматизма Z(4;2) и Z(4;-2) до операции более $0,2$ μm : $0,22 \pm 0,02$ μm , $0,30 \pm 0,07$ μm соответственно и после операции статистически значимо уменьшились и составили $0,07 \pm 0,13$ μm , $0,1 \pm 0,22$ μm ($p < 0,05$).

Результаты коррекции аберраций 4 порядка (сферическая аберрация) у пациентов 11-ой группы

Результаты лечения пациентов 11-ой группы сравнивали с результатами лечения пациентов 3-ей группы и 1-ой группы. Динамика показателей остроты зрения без коррекции, среднего сферического эквивалента, остроты зрения с коррекцией представлена в таблице (Таблица 4).

Статистически значимых различий дооперационных показателей остроты зрения без коррекции, среднего сферического эквивалента, остроты зрения с коррекцией между 11-ой, 3-ой и 1-ей группами не получено ($p > 0,05$). Значения остроты зрения без коррекции, остроты зрения с коррекцией через 1 месяц, 3 месяца и 1 год после операции в 11-ой группе были выше ($p < 0,05$) по сравнению с

3-ей и 1-ой группами. Средний сферический эквивалент в 11-ой группе был статистически значимо меньше, чем во 3-ей и 1-ей группах ($p < 0,05$).

Таблица 4 – НКОЗ, средний сферический эквивалент и КОЗ до операции и в разные сроки после операции $*(p < 0,05)$

	Острота зрения без коррекции ($M \pm \sigma$)			Средний сферический эквивалент (диоптрии) ($M \pm \sigma$)			Острота зрения с коррекцией ($M \pm \sigma$)		
№ группы	11-я гр. n=80	3-я гр. n=80	1-я гр. n=144	11-я гр. n=80	3-я гр. n=80	1-я гр. n=144	11-я гр. n=80	3-я гр. n=80	1-я гр. n=144
До операц.	0,05 $\pm$ 0,01	0,05 $\pm$ 0,02	0,06 $\pm$ 0,01	- 3,93 $\pm$ 1,05	- 4,67 $\pm$ 1,94	- 4,46 $\pm$ 0,96	1,00 $\pm$ 0,12	1,00 $\pm$ 0,14	0,92 $\pm$ 0,13
1 месяц после операц.	0,94 $\pm$ 0,05	0,86 $\pm$ 0,04	0,83 $\pm$ 0,03	0,02 $\pm$ 0,21	0,01 $\pm$ 0,33	- 0,02 $\pm$ 0,35	0,98 $\pm$ 0,05	1,00 $\pm$ 0,09	0,96 $\pm$ 0,11
3 месяца после операц.	1,13 $\pm$ 0,02	0,92 $\pm$ 0,04	0,91 $\pm$ 0,03	0 $\pm$ 0,01	- 0,02 $\pm$ 0,56	- 0,05 $\pm$ 0,31	1,13 $\pm$ 0,03	1,02 $\pm$ 0,07	1,0 $\pm$ 0,10
1 год после операц.	1,13 $\pm$ 0,03*	0,96 $\pm$ 0,05	0,93 $\pm$ 0,02	0 $\pm$ 0,01*	- 0,03 $\pm$ 0,43	- 0,08 $\pm$ 0,28	1,13 $\pm$ 0,02*	1,02 $\pm$ 0,05	1,0 $\pm$ 0,08

Таблица 5 – RMS, RMS HO и величина сферической аберрации до операции и в разные сроки после операции $*(p < 0,05)$

	RMS (μm) ($M \pm \sigma$)			RMS HO (μm) ($M \pm \sigma$)			Сферическая аберрация Z(4,0) (μm) ($M \pm \sigma$)		
№ группы	11-я гр. n=80	3-я гр. n=80	1-я гр. n=144	11-я гр. n=80	3-я гр. n=80	1-я гр. n=144	11-я гр. n=80	3-я гр. n=80	1-я гр. n=144
До опер.	6,18 $\pm$ 0,13	6,43 $\pm$ 0,17	6,32 $\pm$ 0,15	0,35 $\pm$ 0,06	0,33 $\pm$ 0,07	0,32 $\pm$ 0,08	0,01 $\pm$ 0,19	0,03 $\pm$ 0,23	0,04 $\pm$ 0,16
1 месяц после опер.	0,93 $\pm$ 0,32	1,05 $\pm$ 0,29	1,86 $\pm$ 0,38	0,34 $\pm$ 0,11*	0,46 $\pm$ 0,25	0,51 $\pm$ 0,34	-0,15 $\pm$ 0,13*	-0,62 $\pm$ 0,16	-0,73 $\pm$ 0,17
3 месяца после опер.	0,96 $\pm$ 0,35	1,13 $\pm$ 0,38	1,98 $\pm$ 0,33	0,32 $\pm$ 0,14*	0,48 $\pm$ 0,23	0,62 $\pm$ 0,36	-0,17 $\pm$ 0,16*	- 0,53 $\pm$ 0,21	-0,68 $\pm$ 0,18
1 год после опер.	1,10 $\pm$ 0,38	1,24 $\pm$ 0,42	1,16 $\pm$ 0,34	0,30 $\pm$ 0,12*	0,43 $\pm$ 0,21	0,59 $\pm$ 0,17	-0,09 $\pm$ 0,14*	- 0,57 $\pm$ 0,19	-0,62 $\pm$ 0,15

Результаты измерений среднеквадратичного корня суммы всех оптических аберраций (RMS) и оптических аберраций высшего порядка (RMS HO), а также величины сферической аберрации Z(4,0) в виде коэффициентов Zernike по нотации Malacara приведены в таблице (Таблица 5).

Статистически значимых различий в представленных данных до операции между 11-ой, 3-ей и 1-ой группами не было ($p > 0,05$). Данные измерений среднеквадратичного корня суммы всех оптических aberrаций (RMS), оптических aberrаций высшего порядка (RMS HO) и величины сферической aberrации $Z(4,0)$ в различные сроки после операции были ниже в 11-ой группе ($p < 0,05$) по сравнению с данными в 3-ей и 1-ой группах.

Статистически значимых различий в результатах контрастной чувствительности до операции между 11-ой, 3-ей и 1-ей группами не было ($p > 0,05$). Показатели контрастной чувствительности в различные сроки после операции были значительно выше в 11-ой группе ($p < 0,05$) по сравнению с показателями в 3-ей и 1-ой группах, особенно на частотах 12 и 18 цикл/градус.

После эксимерных лазерных операций толщина периферических отделов роговицы увеличивается по сравнению с центральными отделами, соответственно, и увеличивается рефракционная сила роговицы от центра к периферии. Вследствие этого изменялись значения сферической aberrации в виде коэффициента Zernike по нотации Malacara $Z(4,0)$ в сторону отрицательной сферической aberrации глаза.

В результате комбинации миопического и гиперметропического профилей абляции роговицы (LASIK с коррекцией сферической aberrации) во время гиперметропической абляции происходит эксимерлазерное удаление утолщенных во время миопической абляции периферических отделов роговицы и, соответственно, увеличения толщины периферических отделов роговицы, как и увеличения рефракционной силы роговицы от центра к периферии не происходит.

Следовательно, изменение значения сферической aberrации $Z(4,0)$ в виде коэффициента Zernike по нотации Malacara в сторону отрицательной сферической aberrации не происходит.

Комбинация миопического и гиперметропического профилей абляции роговицы (LASIK с коррекцией сферической aberrации) позволяет получить лучшие результаты, как по остроте зрения, так и по контрастной чувствительности (то есть качеству зрения) по сравнению с Wavefront-Guided LASIK и стандартным LASIK.

При выполнении персонализированной коррекции aberrаций высшего порядка необходимо основываться не только на предоперационном измерении aberrаций ВФ, но и учитывать биомеханические изменения роговицы, происходящие в процессе абляции и вызывающие изменение сферической aberrации $Z(4,0)$ по нотации Malacara в сторону отрицательных значений.

Применение комбинации миопического и гиперметропического профилей абляции роговицы (LASIK с коррекцией сферической aberrации) в коррекции миопии способно устранить индуцирование сферической aberrации, возникающее вследствие биомеханических изменений роговицы, что увеличивает контрастную чувствительность после операции LASIK по сравнению с Wavefront-Guided LASIK и стандартной операцией LASIK.

Сравнительная характеристика результатов хирургического лечения с селективной коррекцией АВП у пациентов с миопией и сложным миопическим астигматизмом

Сравнительная характеристика результатов хирургического лечения пациентов с миопией и сложным миопическим астигматизмом различными методами включала оценку следующих признаков: сферический эквивалент, остроту зрения без коррекции, остроту зрения с коррекцией, изменение АВП, RMS НО, контрастную чувствительность.

Wavefront-Guided LASIK - эксимерная интрастромальная абляция роговицы с коррекцией предоперационных АВП относится к безопасным и достаточно эффективным методом рефракционной хирургии для коррекции миопии и сложного миопического астигматизма, что определило распространение данного метода в офтальмологических клиниках России. Эта группа была основная в проведенном сравнительном исследовании.

Результаты исследования в 8-й, 9-й, 10-й и 11-й группах сравнивали с результатами 3-й группы, в которой применен алгоритм коррекции предоперационных АВП.

Проведенное исследование позволило оценить средние значения сферического эквивалента рефракции до и после хирургического лечения в исследованных группах. Во всех группах пролеченных пациентов сферический эквивалент уменьшился.

Сравнительный анализ средних значений сферический эквивалент показал, что до операции наибольшую часть пациентов составили лица со средней степенью миопии. После операции рефракция получена эметропической во всех группах пациентов. Средние значения НКОЗ до и после лечения в исследованных группах увеличились.

Полученная НКОЗ была наименьшей в 10 А подгруппе при коррекции миопии и сложного миопического астигматизма методом Wavefront-Guided Selective LASIK с коррекцией квадрафойла. Максимальная НКОЗ была достигнута в 8-й и 11-й группах методами Wavefront-Guided Selective LASIK с коррекцией трейфойла и LASIK с коррекцией сферической аберрации.

Сравнительная оценка средних значений КОЗ до и после лечения в исследованных группах показала неоднородность полученных результатов.

Полученная КОЗ была наименьшей в 9 Б подгруппе и в 10 А подгруппе при коррекции миопии и сложного миопического астигматизма методом Wavefront-Guided Selective LASIK с коррекцией вертикальной комы и Wavefront-Guided Selective LASIK с коррекцией квадрафойла. Максимальная КОЗ была достигнута в 11-й группе при лечении пациентов методом с комбинацией миопического и гиперметропического профилей абляции роговицы (LASIK с коррекцией сферической аберрации). В 11-й группах КОЗ увеличилась. В 3-й, 8-й 9-й и 10-й группах пролеченных пациентов острота КОЗ практически не изменилась.

Проведенное исследование позволило оценить RMS НО до и после хирургического лечения в исследованных группах. Во всех группах пролеченных пациентов RMS НО увеличился, за исключением 11-й группы.

Предоперационный уровень RMS НО в 9 Б подгруппе достигал среднего значения $0,22 \pm 0,06 \mu\text{m}$, в 8-й группе - $0,23 \pm 0,07 \mu\text{m}$, в остальных группах варьировал от $0,24 \pm 0,06$ до $0,35 \pm 0,06 \mu\text{m}$. В послеоперационном периоде RMS НО увеличился в 9 А подгруппе - в 1,25 раза, в 10 А подгруппе - в 1,31 раза, в 3-й группе - в 1,77 раза, в 8-й группе - в 1,78 раза, в 10 Б подгруппе - в 1,87 раза, в 9 Б подгруппе - в 2,1 раза.

Средние значения RMS НО показали прирост АВП в послеоперационном периоде в этих группах пациентов. Полученные значения статистически значимы.

В 11-группе RMS НО уменьшился в 1,1 раза. Полученное значение статистически значимо.

Средние значения величины трейфола $Z(3;3)$ до хирургического лечения в исследованных группах варьировали от $-0,37 \pm 0,06 \mu\text{m}$ до $0,37 \pm 0,16 \mu\text{m}$.

В послеоперационном периоде средняя величина трейфола $Z(3;3)$ практически не изменилась в 3-й группе, а в 8-й группе уменьшилось в 2,47 раза.

Полученный результат показывает, что Wavefront-Guided LASIK с коррекцией предоперационных АВП, выполненная у пациентов при коррекции миопии и сложного миопического астигматизма, не уменьшает величину трейфола $Z(3;3)$, а Wavefront-Guided Selective LASIK с коррекцией трейфола снижает уровень трейфола $Z(3;3)$. Полученные значения статистически значимы.

Средние значения горизонтальной комы $Z(3;1)$ после хирургического лечения в исследованных группах увеличились.

До операции средняя величина горизонтальной комы $Z(3;1)$ в 3-й группе была $0,22 \pm 0,37 \mu\text{m}$. Величина горизонтальной комы $Z(3;1)$ до операции в 9 А подгруппе и 9 Б подгруппе варьировала от $-0,12 \pm 0,65 \mu\text{m}$ до $0,06 \pm 0,18 \mu\text{m}$, что было ниже в сравнении с основной группой. В послеоперационном периоде средняя величина горизонтальной комы $Z(3;1)$ в исследуемых группах статистически значимо не изменилась.

Примененные методы коррекции миопии и сложного миопического астигматизма вызывают неодинаковые оптические изменения роговицы относительно горизонтальной комы $Z(3;1)$, при этом можно отметить зависимость между полученной средней величины горизонтальной комы $Z(3;1)$ от величины, используемой в селективной коррекции комы при коррекции миопии и сложного миопического астигматизма Wavefront-guided Selective LASIK с коррекцией горизонтальной комы.

Средние значения вертикальной комы $Z(3;-1)$ после хирургического лечения миопии и сложного миопического астигматизма в исследованных группах увеличились, за исключением 9 Б подгруппе.

До операции средняя величина вертикальной комы $Z(3;-1)$ в 3-й группе была $0,08 \pm 0,31 \mu\text{m}$. Величина вертикальной комы $Z(3;-1)$ до операции в 9 А подгруппе и 9 Б подгруппе варьировала от $0,02 \pm 0,17 \mu\text{m}$ до $0,07 \pm 0,38 \mu\text{m}$, что было ниже в сравнении с основной группой.

В послеоперационном периоде средняя величина вертикальной комы $Z(3;-1)$ в исследуемых группах статистически значимо не изменилась.

Примененные методы коррекции миопии и сложного миопического астигматизма вызывают неодинаковые оптические изменения роговицы относительно вертикальной комы $Z(3;-1)$, при этом можно отметить зависимость между полученной средней величины вертикальной комы $Z(3;-1)$ от величины, используемой в селективной коррекции комы при коррекции миопии и сложного миопического астигматизма Wavefront-Guided Selective LASIK с коррекцией вертикальной комы.

В 3-й группе пролеченных пациентов среднее значение вторичного астигматизма $Z(4;2)$ после операции увеличилось. В 10 Б подгруппе пролеченных пациентов среднее значение вторичного астигматизма $Z(4;2)$ после операции уменьшились.

Послеоперационная величина вторичного астигматизма $Z(4;2)$ в 3-й группе пациентов увеличилась в 1,5 раза. В данной группе был применен способ коррекции миопии и сложного миопического астигматизма Wavefront-Guided LASIK.

Послеоперационная величина вторичного астигматизма $Z(4;2)$ в 10 Б подгруппе уменьшилась в 30 раз. В описанной группе был применен способ коррекции миопии и сложного миопического астигматизма при применении Wavefront-Guided Selective LASIK с коррекцией вторичного астигматизма $Z(4;2)$.

В исследованных группах пациентов сравнены средние значения квадрафойла $Z(4;4)$ до и после хирургического лечения. В 3-й группе пролеченных пациентов методом Wavefront-Guided LASIK среднее значение квадрафойла $Z(4;4)$ в послеоперационном периоде не изменилось. В 10 Б подгруппе пролеченных пациентов среднее значение квадрафойла $Z(4;4)$ в послеоперационном периоде уменьшилось. Уменьшение показателя квадрафойла $Z(4;4)$ (в 2 раза) был определен 10 Б подгруппе при лечении пациентов методом Wavefront-Guided Selective LASIK с коррекцией квадрафойла.

Проведенное исследование позволило оценить средние значения сферической аберрации $Z(4;0)$ до и после хирургического лечения в исследованных группах.

В 3-й группе пациентов средняя величина сферической аберрации $Z(4;0)$ до операции была $0,03 \pm 0,23 \mu\text{m}$, в 11-й группе - от $0,01 \pm 0,19 \mu\text{m}$. Во всех группах пролеченных пациентов средние значения сферической аберрации $Z(4;0)$ увеличились в отрицательную сторону.

В послеоперационном периоде прирост величины сферической аберрации $Z(4;0)$ был наименьший в 11-й группе пациентов, а наибольший – в 3-й группе. Послеоперационная величина сферической аберрации $Z(4;0)$ в 3-й группе пациентов увеличилась статистически значимо ($p < 0,05$). В данной группе был применен способ коррекции миопии и сложного миопического астигматизма Wavefront-guided LASIK.

Послеоперационная величина сферической аберрации $Z(4;0)$ в 11 группе изменилась статистически не значимо ($p > 0,05$). В описанной группе был применен способ коррекции миопии и сложного миопического астигматизма при применении LASIK с коррекцией сферической аберрации $Z(4;0)$.

В проведенном исследовании сравнены средние значения контрастной чувствительности (3 цикл/градус) до и после хирургического лечения в исследованных группах. В 11-й группе у пациентов пролеченных методом LASIK с коррекцией сферической аберрации Z(4;0) средние значения контрастной чувствительности (3 цикл/градус) увеличились ($p < 0,05$), в 3-й группе у пациентов пролеченных методом Wavefront-Guided LASIK средние значения контрастной чувствительности (3 цикл/градус) уменьшились ($p < 0,05$). В остальных группах пролеченных пациентов средние значения контрастной чувствительности (3 цикл/градус) не изменились ($p > 0,05$).

Проведенное исследование позволило оценить средние значения контрастной чувствительности (6 цикл/градус) до и после хирургического лечения в исследованных группах.

В 3-й группе у пациентов среднее значение контрастной чувствительности (6 цикл/градус) уменьшилось ($p < 0,05$). В 8-й, 9-й и 10 группах пролеченных пациентов средние значения контрастной чувствительности (6 цикл/градус) не изменились ($p > 0,05$). В 11-й группе у пациентов, пролеченных методом LASIK с коррекцией сферической аберрации Z(4;0), средние значения контрастной чувствительности (6 цикл/градус) увеличились ($p < 0,05$).

Проведенное исследование позволило оценить средние значения контрастной чувствительности (12 цикл/градус) до и после хирургического лечения в исследованных группах. В 3-й группе у пациентов среднее значение контрастной чувствительности (12 цикл/градус) уменьшилось ($p < 0,05$). В 9-й и 10 группах пролеченных пациентов средние значения контрастной чувствительности (12 цикл/градус) не изменились ($p > 0,05$).

В 8-й и 11-й группах у пациентов, пролеченных методом Wavefront-Guided Selective LASIK с коррекцией трефойла Z(3;3) и LASIK с коррекцией сферической аберрации Z(4;0) соответственно, средние значения контрастной чувствительности (12 цикл/градус) увеличились ($p < 0,05$).

Проведенное исследование позволило оценить средние значения контрастной чувствительности (18 цикл/градус) до и после хирургического лечения в исследованных группах. В 3-й группе у пациентов среднее значение контрастной чувствительности (18 цикл/градус) уменьшилось ($p < 0,05$). В 8-й, 9-й и 10 группах пролеченных пациентов средние значения контрастной чувствительности (12 цикл/градус) не изменились ($p > 0,05$).

В 11-й группе у пациентов, пролеченных методом LASIK с коррекцией сферической аберрации Z(4;0), среднее значение контрастной чувствительности (18 цикл/градус) увеличилось ($p < 0,05$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

У пациентов большой выбор способов коррекции миопии и сложного миопического астигматизма с коррекцией АВП. Развитие рефракционной хирургии связано с тем, что данный вид лечения позволяет добиться эметропии, высокой остроты зрения и качества зрения.

В связи с этим в данном научном исследовании проведено сравнительное исследование коррекции миопии и сложного миопического астигматизма с коррекцией АВП различными методами, причем технологическое появление новых способствовало применению высокоточных методов диагностики АВП, современного эксимерного лазера, способного выполнять коррекцию АВП и развитие фемтосекундных лазерных технологий с фемтосекундной диссекцией роговицы.

Для повышения эффективности коррекции АВП необходим персонализированный подход в диагностике предоперационного состояния АВП, расчёту и способу удаления роговичной ткани (Рисунок 5).

Таким образом, на основании проведенной научно-исследовательской работы и совокупности всех полученных данных, в современной офтальмологии разработана и предложена концепция персонализированной коррекции АВП при коррекции миопии и сложного миопического астигматизма с применением эксимерного и фемтосекундного лазеров в рефракционной хирургии.

Рисунок 5 – Концептуальная модель выбора лазерной хирургии

ВЫВОДЫ

1. Разработанная компьютерная модель глаза на основе математических конечных элементов с заданными геометрическими и оптическими свойствами позволила оценить изменение упругих свойств роговицы, воспроизвести aberrации высшего порядка на сферической поверхности и получить значения aberrаций, влияющих на качество зрения. При моделировании операции LASIK с глубиной абляции 37 мкм и толщиной роговичного лоскута 140 мкм возрастают модули коэффициентов для полиномов Цернике 3-6 порядка с 0,66 мкм до 0,90 мкм.
2. Выполнение режима стандартной и Wavefront-Guided абляции по миопическому алгоритму на экспериментальных линзах не уменьшили величины aberrаций высшего порядка. Применение на экспериментальных линзах Wavefront-Guided Selective абляции позволило наблюдать статистически значимое уменьшение горизонтальной комы, вертикальной комы, сферической aberrации. Разница в глубине абляции различных режимов в эксперименте не выявлена.
3. По конечноэлементной модели роговицы глаза установлено, что ее модуль упругости резко возрастает при увеличении внутриглазного давления более 30 мм рт. ст., изгибная жесткость увеличивается от центра к периферии на 1 порядок. Экспериментальное моделирование уменьшения толщины роговицы сопровождается увеличением изгибных напряжений в центре на 25% и увеличением в 2 раза сжимающего напряжения на периферии роговицы. После операции FemtoLASIK уменьшение толщины роговицы в центре на 120-150 мкм в результате абляции и формирования лоскута не приводит к напряженному состоянию роговицы и потере прочности.
4. При использовании с целью коррекции миопии и сложного миопического астигматизма неселективных неперсонализированного и персонализированных методов лечения повышение остроты зрения выявлено во всех группах пациентов ($p < 0,05$), наиболее высокий функциональный результат получен в группах пациентов с поверхностным воздействием на роговицу (Wavefront-Guided Epi-LASIK) и удалением роговичного лентикула (SMILE); при использовании селективных персонализированных методов лечения - в группе пациентов с LASIK с коррекцией сферической aberrации ($p < 0,05$).
5. На основании сравнительного анализа данных оптической когерентной томографии установлено, что в результате использования фемтосекундного лазера при Wavefront-Guided FemtoLASIK, в отличие от использования механического микрокератома при интрастромальном персонализированном неселективном воздействии на роговицу Wavefront-Guided LASIK, формируется роговичный лоскут с точно заданными параметрами, равномерный по толщине в симметричных точках исследуемых меридианов ($225^\circ - 45^\circ$) и ($270^\circ - 90^\circ$) ($p < 0,05$).
6. При коррекции миопии и сложного миопического астигматизма с использованием неселективных персонализированных способов лазерной абляции aberrации высшего порядка увеличиваются больше, чем при использовании фемтосекундной лазерной хирургии ($p < 0,05$) - топографический LASIK и

Wavefront-Guided LASIK более значительно индуцируют сферическую aberrацию $Z(4;0)$ и горизонтальную кому $Z(3;1)$, чем Wavefront-Guided FemtoLASIK, FLEx и SMILE; SMILE минимально индуцирует сферическую aberrацию $Z(4;0)$ и максимально снижает величину вторичного астигматизма $Z(4;2)$ ($p < 0,05$).

7. Использование операции Wavefront-Guided Selective LASIK при коррекции миопии и сложного миопического астигматизма обеспечивает самые низкие значения индуцирования aberrаций высшего порядка трейфойл ($Z(3;3)=0,15 \pm 0,24$) квадрафойл ($Z(4;4)=0,07 \pm 0,13$), вторичный астигматизм ($Z(4;2)$ $0,01 \pm 0,02$), комы ($Z(3;1)$ $0,06 \pm 0,18$) за счёт отсутствия взаимного влияния АВП в персонализированном файле абляции, равномерного распределения лазерного воздействия по строме роговицы.

8. Предлагаемый метод комбинации миопического и гиперметропического профилей абляций (LASIK с коррекцией сферической aberrации) в коррекции миопии и сложного миопического астигматизма с дополнительным лазерным воздействием на периферию роговицы устраняет индуцирование сферической aberrации, что обеспечивает высокую остроту зрения и увеличивает контрастную чувствительность пространственной контрастной чувствительности 3 цикл/градус ($6,14 \pm 0,53$), 6 цикл/градус ($6,43 \pm 0,41$), 12 цикл/градус ($6,14 \pm 0,34$), 18 цикл/градус ($6,43 \pm 0,11$) вследствие кератотопографически равномерной поверхности роговицы.

9. Разработанная система выбора метода коррекции aberrаций высшего порядка основана на дифференцированном подходе к назначению разных видов кераторефракционной лазерной операции в зависимости от дооперационного значения aberrаций высшего порядка, исходных параметров роговицы и степени рефракционного нарушения.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Пациентам с миопией и сложным миопическим астигматизмом с центральной толщиной роговицы менее 500 мкм может быть рекомендована операция Epi-LASIK.

2. Операция FemtoLASIK, обладающая предсказуемостью и равномерностью сформированного роговичного лоскута, является операцией выбора при лечении миопии высокой степени и сложного миопического астигматизма.

3. Алгоритм топографической абляции роговицы, обладающий меньшим объемом удаления роговичной ткани для достижения рефракционного эффекта предпочтителен при высокой степени миопии для снижения риска послеоперационной эктазии.

4. При выявлении $Z(3) \dots Z(4) > 0,1375$ мкм по данным aberрометрии для отдельных видов АВП при коррекции миопии и сложного миопического астигматизма рекомендовано использовать Wavefront-Guided Selective алгоритм абляции роговицы с целью улучшения контрастной чувствительности после операции.

5. При выявлении положительной сферической аберрации по нотации Malacara рекомендовано использование стандартного алгоритма абляции роговицы для приведения сферической аберрации близкой к 0 мкм в послеоперационном периоде.

6. При выявлении сферической аберрации по нотации Malacara близкой к 0 мкм, с целью предотвращения индуцирования сферической аберрации целесообразно выбрать фемтосекундные экстракции роговичного лентикула – операцию FLEx, при риске смещения роговичного лоскута (контактные виды спорта, профессии с высоким риском глазного травматизма) - операцию SMILE.

7. При выявлении отрицательной сферической аберрации по нотации Malacara следует применить разработанную комбинацию миопического и гиперметропического профилей абляции в коррекции миопии для устранения индуцирования сферической аберрации, возникающее вследствие биомеханических изменений роговицы, что увеличивает контрастную чувствительность после операции LASIK.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Тахчиди, Х.П. Коррекция сферической аберрации, возникающей во время проведения эксимерлазерной абляции роговицы при коррекции миопии / Х.П. Тахчиди, **О.А. Костин**, А.В. Дога, С.В. Ребриков, А.И. Овчинников, А.А. Степанов // **Офтальмохирургия**. – 2008. – № 5. – С. 9–14.
2. Тахчиди, Х.П. Анализ изменений аберраций высших порядков при эксимерлазерной абляции в режимах Aberration Smart Ablation, Wawefront-guided и Wawefront-guided Selective в эксперименте / Х.П. Тахчиди, **О.А. Костин**, А.В. Дога, С.В. Ребриков, А.И. Овчинников, А.А. Степанов // **Офтальмохирургия**. – 2009. – № 5. – С. 11–15.
3. Тахчиди, Х.П. Селективная коррекция трейфола с использованием Wavefront-guided LASIK / Х.П. Тахчиди, **О.А. Костин**, А.В. Дога, С.В. Ребриков, А.И. Овчинников, А.А. Степанов // **Офтальмохирургия** – 2010. – №2. – С.8–13.
4. **Костин, О.А.** Wavefront-Guided LASIK и Wavefront-Guided epi-LASIK в коррекции миопии и миопического астигматизма / **О.А. Костин** // **Вестник Оренбургского государственного университета**. – 2010. – №12. – С. 107–109.
5. **Костин, О.А.** Персонализированный топографический LASIK в коррекции миопии и миопического астигматизма / **О.А. Костин** // **Вестник Оренбургского государственного университета**. – 2010. – №12. – С. 110–111.
6. **Костин, О.А.** Интраоперационное ультразвуковое измерение толщины роговичного лоскута при операции ЛАСИК в коррекции миопии и сложного миопического астигматизма / **О.А. Костин** // **Пермский медицинский журнал**. – 2011. – №1. – С. 66–70.
7. **Костин, О.А.** Сравнительная оценка изменений аберраций высшего порядка всей оптической системы глаза, измеренных с использованием аберрометра WASCA с изменениями аберраций высшего порядка передней поверхности роговицы измеренными с использованием PENTAKAM HR и Atlas 9000 после операции WAVEFRONT-Guided LASIK / **О.А. Костин** // **Вестник новых медицинских технологий**. – 2011. – №1. – С. 86–87.
8. **Костин, О.А.** Измерение толщины роговичного лоскута методом оптической когерентной томографии при операции WAVEFRONT-Guided LASIK / **О.А. Костин** // **Пермский медицинский журнал**. – 2011. – №2. – С. 94–97.
9. **Костин, О.А.** Интраоперационное ультразвуковое измерение толщины роговичного лоскута при проведении операции LASIK и при повторном лазерном кератомилёзе с подъёмом ранее сформированного роговичного лоскута в коррекции миопии и миопического астигматизма / **О.А. Костин**, С.В. Ребриков, А.И. Овчинников, А.А. Степанов // **Вестник Оренбургского Государственного университета**. – Оренбург, 2011. – С. 203–205.
10. **Костин, О.А.** Использование системы OCULIGN при операции WAVEFRONT-GUIDED LASIK в коррекции миопии и миопического астигматизма / **О.А. Костин**, С.В. Ребриков, А.И. Овчинников, А.А. Степанов //

Вестник Оренбургского Государственного университета. – Оренбург, 2011. – С. 206–207.

11. **Костин, О.А.** Сравнительная оценка изменений aberrаций после операции Wawefront-guided LASIK и Wawefront-guided Femto-LASIK / **О.А. Костин, С.В. Ребриков, А.И. Овчинников, А.А. Степанов** // **Современная оптометрия.** – 2012. – №4. – С. 26–30.

12. **Костин, О.А.** Селективная коррекция aberrаций четвёртого порядка с использованием WAVEFRONT – Guided LASIK / **О.А. Костин, С.В. Ребриков, А.И. Овчинников, А.А. Степанов** // **Катарактальная и рефракционная хирургия.** – 2012. – Т. 12, № 2. – С. 31–33.

13. **Костин, О.А.** Моделирование напряжённо-деформированного состояния роговицы под действием внутриглазного давления / **О.А. Костин, К.А. Гончаров** // **Практическая медицина.** – 2012. – Т. 1, № 4. – С. 36–42.

14. **Костин, О.А.** Сравнительная оценка изменений aberrаций высшего и низшего порядков после операций WAVEFRONT – Guided LASIK в группах с использованием технологии OFFSET/TORSHION, центрацией абляции по фотопическому зрачку и центрацией абляции по геометрическому центру роговицы / **О.А. Костин, С.В. Ребриков, А.И. Овчинников, А.А. Степанов** // **Практическая медицина.** – 2012. – Т. 1, № 4. – С. 42–45.

15. **Костин, О.А.** Анализ состояния роговицы после операции LASIK и femto-LASIK методами оптической когерентной томографии и оптических срезов / **О.А. Костин, С.В. Ребриков, А.И. Овчинников, А.А. Степанов** // **Вестник офтальмологии.** – 2012. – Т. 128, № 5. – С. 3–5.

16. **Костин, О.А.** Фемтосекундные лазерные операции FLEx – первый опыт применения / **О.А. Костин, С.В. Ребриков, А.И. Овчинников, А.А. Степанов.** // **Офтальмохирургия.** – 2013. – № 1. – С. 36–39.

17. **Костин, О.А.** Сравнительные результаты использования для коррекции миопии и миопического астигматизма операций LASIK и фемтосекундной лазерной операции SMILE (Small-Incision Lenticule Extraction) / **О.А. Костин, С.В. Ребриков, А.И. Овчинников, А.А. Степанов** // **Катарактальная и рефракционная хирургия.** – 2013. – Т. 13, № 4. – С. 21–24.

18. **Ребриков, С.В.** Оценка результатов операции FLEx с использованием фемтосекундного лазера VisuMax после автоматизированной послойной кератопластики / **С.В. Ребриков, О.А. Костин, А.И. Овчинников, А.А. Степанов** // **Катарактальная и рефракционная хирургия.** – 2014. – Т. 14, № 1. – С. 47–50.

19. **Костин, О.А.** Исследование и оценка результатов слезопродукции, стабильности слёзной плёнки, индекса патологии глазной поверхности глаза после операции SMILE при коррекции миопии и миопического астигматизма / **О.А. Костин, С.В. Ребриков, А.И. Овчинников, А.А. Степанов** // **Катарактальная и рефракционная хирургия.** – 2015. – Т. 15, №1. – С. 26–29.

20. **Костин, О.А.** Результаты устранения остаточной аметропии методом CIRCLE после лазерных операций по технологии SMILE / **О.А. Костин, С.В. Ребриков, А.И. Овчинников, А.А. Степанов, Х.П. Тахчиди** // **Вестник Офтальмологии.** – 2017. – Т. 133, №1. – С. 55–60.

21. **Костин, О.А.** Исход криминальной травмы глаза после фемтосекундной лазерной операции SMILE / **О.А. Костин, С.В. Ребриков, А.И. Овчинников, А.А. Степанов** // **Катарактальная и рефракционная хирургия.** – 2017. – Т. 17, №1. – С. 46–49.

ПАТЕНТЫ РФ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Костин О.А.,** Струков В.В., Ребриков С.В., Степанов А.А., Овчинников А.И.

«Пинцет для фиксации глазного яблока» Патент на полезную модель № 63219. Опубликовано 25.07.2007 г. Бюл. № 15. (Приоритет от 29.12.2006г).

2. Тахчиди Х.П., **Костин О.А.,** Дога А.В., Ребриков С.В., Степанов А.А., Овчинников А.И. «Способ коррекции сферической аберрации, возникающей во время проведения эксимерлазерной абляции роговицы в коррекции миопии» Патент на изобретение № 2301651. Опубликовано 27.06.2007 г. Бюл. № 18. (Приоритет от 17.07.2006г).

3. **Костин О.А.,** Ребриков С.В., Степанов А.А., Овчинников А.И. «Способ коррекции анизометропии (варианты)» Патент на изобретение № 2353342. Опубликовано 27.04.2009 г. Бюл. № 12. (Приоритет от 09.01.2008г).

4. Тахчиди Х.П., **Костин О.А.,** Дога А.В., Ребриков С.В., Степанов А.А., Овчинников А.И. «Способ улучшения контрастной чувствительности глаз при выполнении операции Wavefront-Guided LASIK» Патент на изобретение № 2420251. Опубликовано 10.06.2011 г. Бюл. № 16. (Приоритет от 25.12.2009г).

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АВП – абберрации высшего порядка
ВГД – внутриглазное давление
ВФ – волновой фронт
КОЗ – корригированная острота зрения
КЧ – контрастная чувствительность
НКОЗ – некорригированная острота зрения
ОКТ – оптическая когерентная томография
СА – сферическая абберрация
ФРК – фоторефракционная кератэктомия
ФС-лазер – фемтосекундный лазер
ЭЛ – эксимерный лазер
D - диоптрия
Epi-LASIK (Epipolis laser in-situ keratomileusis) – поверхностный лазерный кератомилёз
FemtoLASIK – лазерный кератомилёз *in situ* с использованием фемтосекундного лазера для формирования роговичного лоскута
FLEX (Femtosecond Lenticule Extraction) – фемтосекундная экстракция лентикула
LASIK (Laser-Assisted in Situ Keratomileusis) – лазерный кератомилёз *in situ*
RMS (Root Mean Square) – усреднённый показатель степени деформации фронтальной волны
RMS HO (Root Mean Square High Order Aberrations) – усреднённый показатель степени деформации фронтальной волны абберраций высшего порядка
SMILE (Small Incision Lenticule Extraction) – фемтосекундная экстракция лентикула через малый разрез
WFG (Wave Front Guided) – коррекция предоперационных абберраций высшего порядка волнового фронта
WFGS (Wave Front Guided Selective) – селективная коррекция предоперационной абберрации высшего порядка волнового фронта