

УДК

Результаты исследований волнового фронта на первом отечественном aberрометре «Мультиспот-250»

М.Г. Яблоков, В.А. Мачехин, А.В. Дога, М.Г. Колотов, С.К. Вартапетов², А.В. Ларичев, Н.Г. Ирошников

Тамбовский филиал ФГУ МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова;

¹ФГУ МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова, Москва;

²ЦФП ИОФ РАН, Троицк; Физический факультет МГУ им. Ломоносова, Москва

▼ РЕФЕРАТ

Цель

Исследование среднестатистического уровня оптических aberrаций высшего порядка у пациентов в зависимости от размеров зрачка и биологического возраста, а также отношения между роговичными и полными aberrациями на неоперированных глазах эмметропов. Измерение роговичных aberrаций после проведенных операций персонализированного LASIK и их сравнение с aberrациями всего оптического тракта глаза.

Материал и методы

Были обследованы 2 группы пациентов. В 1-ю группу вошли эмметропы (50 глаз) в возрасте 18-50 лет. Острота зрения у всех пациентов была 1,0. Во 2-ю группу вошли 50 пациентов (100 глаз) в возрасте 18-45 лет, оперированные методом персонализированного LASIK с учетом индивидуальных aberrаций поверхности роговицы. Сферозэквивалент рефракции до операции составил в среднем $-4,5 \pm 2,7$ дптр, цилиндр — $1,3 \pm 1,0$ дптр, скорректированная острота зрения — 0,8-1,0. В обследование была включена цифровая aberрометрия на первом отечественном приборе «Мультиспот-250». Расчеты всех операций проводили по оригинальной кас-

томизированной программе Analyse 250 для сканирующей эксимерлазерной установки «Микроскан».

Результаты

Самым распространенным типом aberrаций при диаметре зрачка до 5,0 мм были aberrации 3 порядка (комы) — до 75% от всех aberrаций высшего порядка. При величине зрачка до 7,0 мм влияние aberrаций 3 порядка значительно ниже и составило 35%, а 4 и более высокие порядки возрастают до 60%. Средний критический размер зрачка, который удовлетворял критерию Маршала, равняется 3,5 мм. Клиническая рефракция к 3-у мес. после операции при миопии слабой и средней степеней была эмметропической в 96% случаев. Рефракционный эффект операции в 98,5% случаев совпадал с расчетными результатами. Отмечалось усиление aberrаций, вызванных оптической нерегулярностью роговицы и всего волнового фронта глаза.

Вывод

При персонализированной коррекции необходимо принимать во внимание как роговичные aberrации, так и полные aberрометрические измерения всего оптического тракта глаза. ■

Известно, что человеческий глаз не точная оптическая система. Несовершенство оптики человеческого глаза вызвано различными отклонениями в преломлении роговицы, хрусталика и внутриглазных сред. Вообще aberrации низших порядков, такие, как дефокусировка, астигматизм и призма обычно корректируются очками и контактными линзами. До недавнего времени можно было измерять только эти aberrации, связанные в основном с передней поверхностью глаза — роговицей.

Широкое развитие рефракционной эксимерлазерной хирургии роговицы наряду с успешной коррекцией сфероцилиндрических ошибок роговицы, к сожалению, приводит к увеличению в той или иной степени aberrаций высших порядков, таких, как кома или тrefойл [6, 8, 9, 11]. Эти увеличенные в результате операции aberrации невозможно корректировать сфероцилиндрической оптикой. Лазерная коррекция зрения современного уровня требует точного знания о полном числе aberrаций всего оптического тракта глаза, а не только роговичных отклонениях [2, 4, 7].

Офтальмохирургия получила инструмент, позволяющий практически безгранично remodelировать роговицу, изменяя ее оптические

свойства. Это изменение оптических свойств влияет на количественную и качественную составляющую зрительного разрешения. Вот почему в последнее время возросло количество научных статей, отражающих один из важнейших вопросов качества зрения после рефракционной операции. Основным фактором, который определяет характер зрительного разрешения после эксимерлазерного кератомилеза, является форма и качество формируемой в результате абляции роговичной поверхности и состояние ламеллярного лоскута.

С целью достижения максимальной возможной послеоперационной остроты зрения необходимо создавать индивидуальный профиль абляции, рассчитанный на основе данных измерений волнового фронта всего оптического тракта глаза. Основной персонализированной лазерной рефракционной операции являются измерения aberrаций волнового фронта с помощью aberрометра и последующее математическое преобразование aberrаций в адекватный профиль абляции роговицы, который реализуется с помощью сканирующего пятна эксимерного лазера [1, 3]. Такие персонализированные операции в мире делают примерно у 25% пациентов. В то же время исследования говорят, что избежать послеоперационной асферичности или иррегулярности роговицы практически невозможно.

Клиническим выражением оптической иррегулярности роговицы могут служить оптические aberrации низшего и высшего порядков. Проявления aberrаций на практике — это различные особенности качества зрения от снижения его остроты и сумеречного зрения до диплопии.

Среди нескольких возможных методов измерения оптических aberrаций наиболее точным является датчик волнового фронта Shack-Hartman. Большинство комплексов персонализированной абляции (VISX, Carl Zeiss Meditec и т.д.) используют Shack-Hartman aberрометры [10]. Базовый принцип работы датчика волнового фронта следующий. Маломощный лазерный луч фокусируется глазом на сетчатку и создает пятно малого размера. Рас-

сеянное лазерное излучение отражается назад и приобретает aberrации, вызванные внутриглазной средой, хрусталиком и роговицей. Полученное от глаза излучение проходит конфокальный линзовый компенсатор рефракции, который устраняет сферозэквивалент. Далее излучение попадает на поляризационный светоделитель, который уменьшает паразитные блики от роговицы. Затем излучение попадает на микролинзовый растр? оптически сопряженный со зрачком исследуемого глаза. Линзовый растр формирует массив фокальных пятен «гартманограмму» в плоскости ПЗС-датчика изображений. Каждое из фокальных пятен является изображением лазерного пятна на сетчатке. Причем для каждой ячейки растра это изображение строится лучами, проходящими через различные участки зрачка глаза. Соответственно любое отклонение от идеального (плоского) волнового фронта вызывает смещение пятен гартманограммы из центров ячеек. Регистрируя эти смещения? можно восстановить форму волнового фронта и карту aberrаций при помощи метода наименьших квадратов.

В разработанном российском aberрометре «Мультиспот-250» гартманограмма регистрируется с частотой 30 Гц и разрешением 640x480 точек. Карта aberrаций восстанавливается в виде 36 полиномов Цернике (aberrации до 6-го порядка включительно). Полиномы Цернике первого порядка описывают наклон (призма), полиномы второго порядка соответствуют дефокусировке и астигматизму, третьего порядка — коме и трилистнику, четвертого порядка — сферической aberrации и астигматизмам 4-го порядка и т.д. Амплитуда aberrаций человеческого глаза обычно резко уменьшается с увеличением их порядка.

Среднеквадратичное (RMS) значение ошибок отклонения волнового фронта от идеального в плоскости зрачка оптической системы и есть количественная характеристика оптического качества изображения. Оптическая система считается хорошей, если коэффициенты Цернике близки к нулю и,

следовательно, среднеквадратичное значение ошибок волнового фронта меньше 1/14 длины волны (критерий Моршала) [5].

Цель работы — исследование среднестатистического уровня оптических aberrаций высшего порядка у пациентов в зависимости от размеров зрачка и биологического возраста, а также отношения между роговичными и полными aberrациями на неоперированных глазах эмметропов. Измерение роговичных aberrаций после проведенных операций персонализированного LASIK по топограмме и их сравнение с aberrациями всего оптического тракта глаза.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для решения поставленных задач были обследованы 2 группы пациентов. В 1-ю группу вошли пациенты эмметропы (50 глаз) в возрасте 18-50 лет. Некорректированная острота зрения у всех пациентов была 1,0, величина сферозэквивалента варьировала от 0,75 до +1,5 дптр, цилиндр во всех случаях был менее 1,5 дптр, медикаментозный мидриаз при обследовании достигался более 7,5 мм. Во 2-ю группу вошли 50 пациентов (100 глаз) в возрасте 18-45 лет, оперированные методом персонализированного LASIK с учетом индивидуальных aberrаций поверхности роговицы на основе данных топографии. Величина сферозэквивалента до операции составила в среднем — $4,5 \pm 2,7$ дптр, цилиндр — $1,3 \pm 1,0$ дптр, скорректированная острота зрения варьировала от 0,8 до 1,0.

Во всех случаях стандартными методами измеряли скорректированную и некорректированную остроту зрения, изучали топографию роговицы и проводили анализ волнового фронта всего оптического тракта глаза. Роговичные aberrации и топографию роговицы измеряли с помощью кератотопографа Tomey 3 (ИУА) и пересчитывали по коэффициентам Цернике по специально разработанной программе. Aberrации волнового фронта измеряли с помощью цифрового aberрометра типа Shack-Hartman «Мультиспот-250» (рис. 1). Полученные

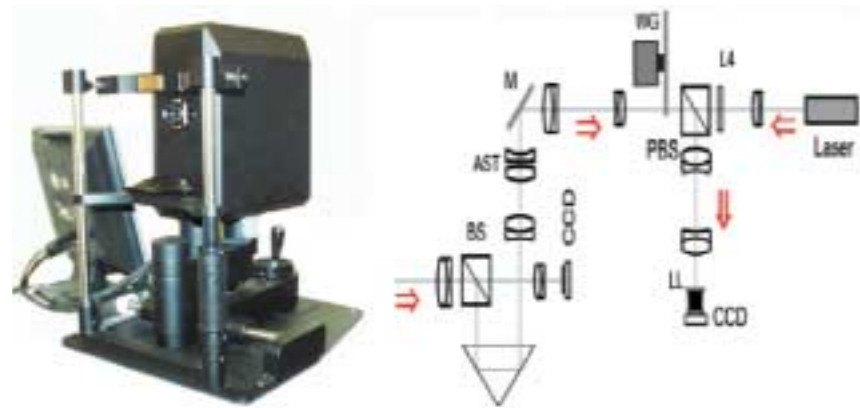
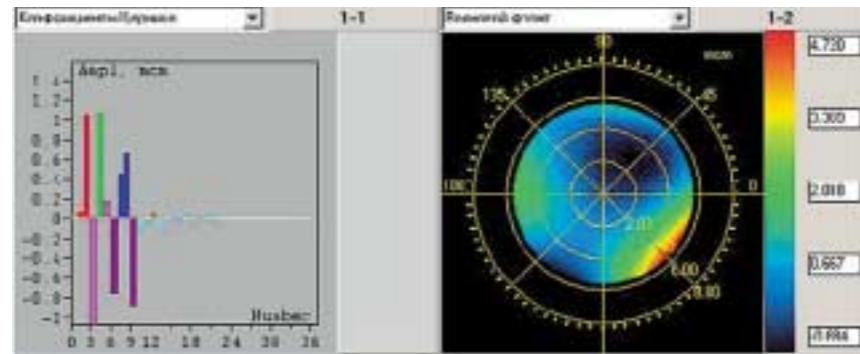
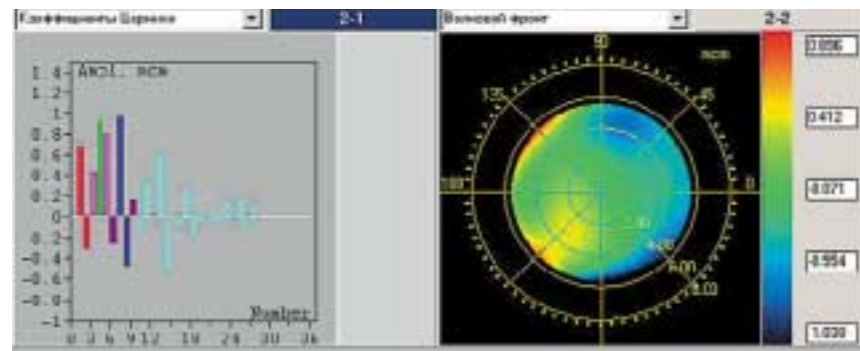


Рис. 1. Аберрометр «Multifisopt 250». Основные показатели: диаметр зрачка: 8 мм; время восстановления: 20 мсек (36 ZP); освещение сетчатки: 15 μW; (-10D+15D) сфера, (±6D) цилиндр; выборка волнового фронта: 15x15



а



б

Рис. 2. Средние значения коэффициентов Цернике, измеренные при диаметре зрачка 5,0 (а) и 7,0 мм (б)

данные аппроксимировались полиномами Цернике. Среднеквадратичные ошибки волнового фронта включали 3, 4, 5 и 6 порядки аберраций.

Операции LASIK выполняли с помощью микрокератома Moria LSK ONE (Франция), диаметр клапана составил 8-9 мм, толщина — 130 мкм, анестезия 0,5% раствором алкаина. Аблиция проводили модернизированным эксимерным лазером «Микроскан» (Россия) сканирующего типа с диаметром пятна 0,7 мм и частотой 200 Гц одномоментно на оба глаза. Параметры операций персонализированного LASIK рассчитывали по оригинальной кастомизированной программе расчета Analyse-250. Все пациенты подвергались тщательному осмотру периферии сетчатки. Во всех необходимых случаях проводили периферическую лазеркоагуляцию.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования среднестатистического уровня оптических аберраций высшего порядка в зависимости от размеров зрачка и биологического возраста были проведены в 1-й группе пациентов.

Средние значения коэффициентов Цернике от 3 до 6 порядка даны на (рис. 2), из которого видно, что при диаметре зрачка до 5,0 мм практически все коэффициенты Цернике близки к нулю. В то же время отклонение от среднего значения при диаметре зрачка 7,0 мм и более менялось в значительном диапазоне от 2 до 20 раз. Критерий Морешаля выполнялся только при размерах зрачка менее 5,0 мм. Самым распространенным типом аберраций при диаметре зрачка до 5,0 мм были аберрации 3 порядка (комы) — до 75% от всех аберраций высшего порядка. Остальные аберрации 4 и более высоких порядков составили 25%. При величине зрачка до 7,0 мм влияние аберраций 3 порядка значительно ниже и составило 35%, а 4-й и более высокие порядки возрастают до 60% (рис. 3).

Средний критический размер зрачка, который удовлетворял критерию Морешаля, равнялся 3,5 мм. Изменения среднеквадратичных

Таблица 1

Сравнение полных и роговичных аберраций

Порядок аберраций	Аберрометр («Мультиспот-250»)	Роговичный Топограф (Томеу-3)
2	0,76 ± 0,04	0,78 ± 0,04
3	0,12 ± 0,03	0,14 ± 0,03
Высший порядок	0,12 ± 0,02	0,076 ± 0,015

значений волнового фронта с возрастом дано на рис. 4. Изменения аберраций, связанные с возрастом, начинают проявляться после 40 лет, при этом отмечается общий рост аберраций высоких порядков.

Исследование роговичных и полных аберраций проведено в 1-й группе пациентов и представлены в табл. 1. В среднем, все коэффициенты Цернике для роговицы были больше суммарных до 4 порядка. При аберрациях более высокого порядка преобладали аберрации всего оптического тракта, что свидетельствовало о частичной компенсации аберраций роговицы аберрациями внутренних структур глаза.

Измерения роговичных аберраций после проведенных операций персонализированного LASIK и их сравнение с аберрациями всего оптического тракта глаза проведены во 2-й группе пациентов.

Средняя острота зрения без коррекции через 6 мес. после операции составила при миопии слабой степени 0,97 ± 0,02, при миопии средней степени — 0,92 ± 0,01 и при миопии высокой (до -10,0 дптр) степени — 0,76 ± 0,03 (табл. 2). Клиническая рефракция к 3-му мес. после операции при миопии слабой и средней степеней была эметропической в 96% случаев (табл. 3). Рефракционный эффект операции в 98,5% случаев совпадал с расчетным.

Измерения аберраций всего оптического тракта глаза (wavefront) представлены в табл. 4. При анализе результатов хочется отметить эффективное устранение аберраций 2 порядка (дефокус, астигматизм). Аберрации 3 порядка (кома) имеют тенденцию к небольшому увеличению в основном за счет увеличения поверхностного компонента. Отмечается безусловное увеличение аберраций 4 порядка (сфероподобные) в раннем послеоперационном периоде. Причем отмечается усиление аберраций, вызванных оптической нерегулярностью всего оптического тракта глаза.

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что в среднем человеческий глаз имеет минимальные ошибки волнового фронта, однако с возрастом отмечается общий рост аберраций высоких порядков. Аберрации роговицы существенно



Рис. 3. Изменение соотношения аберраций высоких порядков при увеличении диаметра зрачка с 5,0 до 7,0 мм

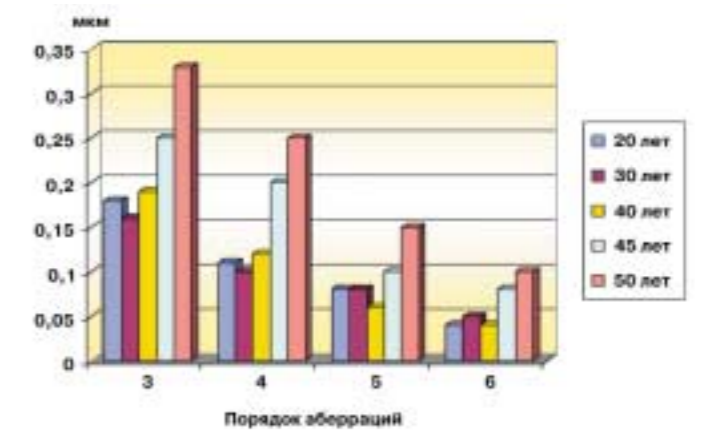


Рис. 4. Зависимость изменений суммарных аберраций Wavefront (мкм) от возраста при диаметре зрачка 5,0 мм

Таблица 2

Динамика средней остроты зрения после операции персонализированный LASIK при миопии

Степень миопии	Острота зрения после операции	
	через 1 сутки	через 6 мес.
Слабая до -3,0 дптр	0,88 ± 0,02	0,97 ± 0,03
Средняя от -3,25 до -6,0 дптр	0,79 ± 0,01	0,92 ± 0,01
Высокая от -6,25 до -10,0 дптр	0,61 ± 0,02	0,76 ± 0,02

Таблица 3

Величина клинической рефракции после операции персонализированный LASIK при миопии

Степень миопии	Среднее значение рефракции до операции	Рефракция после операции	
		через 1 сутки	через 6 мес.
Слабая	-2,12 ± 0,41	+0,35 ± 0,2	+0,25 ± 0,2
Средняя	-4,64 ± 0,73	+0,25 ± 0,35	-0,25 ± 0,2
Высокая	-7,71 ± 0,66	-0,75 ± 0,25	-0,5 ± 0,45

Таблица 4

Сравнение полных (wave front) и роговичных аберраций через 3 месяца после операции персонализированный LASIK при миопии. (RMS) Higher Order RMS Wavefront Error*

Порядок аберраций	Абберометр «Мильтиспот-250»		Роговичный Топограф Томеу 3	
	до лечения	после	до лечения	после
2 (дефокус)	4,44 ± 0,01	0,76 ± 0,04	4,47 ± 0,01	0,78 ± 0,04
3 (кома)	0,13 ± 0,02	0,12 ± 0,03	0,13 ± 0,02	0,14 ± 0,03
Высший порядок	0,08 ± 0,01	0,12 ± 0,02	0,06 ± 0,01	0,076 ± 0,01

больше аберраций всего волнового фронта оптического тракта. Сферические и сфероподобные аберрации не коррелируют с аберрациями передней поверхности роговицы. Для успешного проведения рефракционных операций целесообразно принимать во внимание аберрации передней поверхности глаза и суммарные аберрации всего оптического тракта, при этом необходимо стремиться не к выравниванию поверхности роговицы, а к оптимизации суммарных аберраций, учитывая тот факт, что процесс заживления уменьшает общие аберрации волнового фронта к 3-му мес. после операции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Martinez C.E., Applegate R.A., Klyce S.D. *et al.* Effect of papillary dilation on corneal optical aberration after photorefractive keratectomy // Arch. Ophthalmol.– 1998.– Vol. 116.– P. 1053-1062.
2. Oliver T., Hemenger R.P., Corbett M.C. *et al.* Corneal optical aberration induced by photorefractive keratectomy // J.Refract. Surg.– 1997.– Vol. 13.– P. 246-254.
3. Osbika T., Klyce S.D., Applegate R.A. Comparison of corneal wavefront aberration after photorefractive keratectomy and in situ keratomileusis //Am. J.Ophthalmol.– 1999.– Vol. 127.– P. 1-7.
4. Seiler T., Kaemmerer M., Vierdel P., Krinke H. Oculare optical aberrations after photorefractive keratectomy for myopia and myopic astigmatism //Arch. Ophthalmol.-2000.– Vol. 118.– P. 17-21.
5. MacRae S.M., Schwiegerling J., Snyder R. Customized corneal ablation and super vision //J. Refract. Surg.– 2000.– Vol. 16 (Suppl).– P. 230 – 235.
6. Mrochen M., Kaemmerer M., Seiler T. Wavefront – uided Laser in situ keratomileusis: Early results in three eyes // J.Refract. Surg.– 2000.– Vol. 16.– P. 116-121.
7. MacRae S., Kruuueger R.R., Applegate R.A. Customized corneal ablations. The quest for super vision. Thorofare, USA: Slack Inc., 2001.
8. MacRae S., Schwiegerling J., Snyder R.W. Customized and low spherical aberration corneal ablation design //J. Refract. Surg.– 1999.– Vol. 2.– P. 246-248.
9. Klein S.A. Optimal corneal ablation for eyes with arbitrary Hartmann-Shack aberrations // J. Opt. Soc.Am.A.– 1998.– Vol. 15.– P. 2580-2588.
10. Marechal A. Etude des effect combines de la diffraction et des aberrations geometriques sur L»image d»un point lumineux // Revue d» optique.– 1947.– P. 257-277.
11. Rozema T.T., Van Dyck, Dirk E.M. Marie-Jose Tassignon M.T. Clinical comparison of 5 commercially available aberrometers // I: technical specifications.

Поступила 05.11.04