

АБЕРРАЦИИ В ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ГЛАЗА

Певко Д. В., выпускающий редактор журнала «Глаз», г. Москва

В начале 2017 года в Санкт-Петербурге вышел новый «Справочник медицинского оптика» – настольное пособие для медицинских оптиков, оптометристов, окулистов и офтальмологов, а также для студентов, обучающихся в медтехникумах и вузах по специальности «медицинская оптика и оптометрия» (выходные данные указаны ниже в списке литературы). Публика приняла книгу благосклонно, так как давно назрела необходимость в таком кратком справочном пособии, охватывающем все ключевые аспекты теории и практики.

Обзор темы аберраций человеческого глаза подготовлен автором на основе написанных им трех первых глав. В этом номере мы также публикуем в рубрике «Оптометрия» раздел из «Справочника» о бифокальных очковых линзах с согласия автора – Т. К. Кушель.

Введение

Тема зрительных аберраций постоянно привлекает внимание производителей очковых и контактных линз. В этом обзоре перечислены все причины, вызывающие аберрации в глазу человека; оценивается влияние этих факторов на качество зрения.

Стоит начать с рассмотрения основных понятий геометрической и волновой оптики, связанных с аберрациями.

Геометрические аберрации: сферическая аберрация, кома, астигматизм, дисторсия

Идеальные оптические системы создают идеальное, так называемое стигматическое изображение (от греческого *stigmata* «точка»), в котором каждой точке соответствует точка предмета. В реальных оптических системах всегда присутствуют погрешности – **аберрации**. Аберрации приводят:

- к потере четкости изображения (точка преобразуется в **фигуру рассеяния**);
- к искажению формы изображаемых объектов;
- к появлению окрашенных контуров по краям изображения.

Аберрации бывают **геометрическими (монохроматическими)** и **хроматическими**, которые вызваны дисперсией света в линзах и призмах. Хроматические аберрации рассматриваются в рамках волновой оптики (см. ниже).

Стигматическое изображение можно получить только в том случае, если изображение создается

Исследование и коррекция аберраций глаза человека – одна из актуальных тем оптометрии и рефракционной хирургии. Автор конспективно излагает современные знания в этой области, используя материал подготовленного им справочного учебного пособия.

Ключевые слова: аберрации человеческого глаза, сферическая аберрация, кома, астигматизм, дисперсия, хроматическая аберрация, роговица, зрачок, хрусталик

Pevko D.V. ABERRATIONS IN THE OPTICAL SYSTEM OF THE EYE: A REVIEW OF THE PROBLEM

Research and correction of human eye aberrations is one of the topics of optometry and refractive surgery. The author gives a brief of the modern knowledge in this field, using the material of the new handbook (written by himself).

Key words: human eye aberrations, spherical aberration, coma, astigmatism, dispersion, chromatic aberration, cornea, eye pupil, eye lens

очень узкими световыми пучками, параллельными главной оптической оси или попадающими в оптическую систему под очень малыми углами к этой оси. В реальных оптических системах, в том числе очковых линзах и глазу человека, эти условия не выполняются.

Аномалии рефракции (миопия, гиперметропия, астигматизм) являются **аберрациями второго порядка** и существенно влияют на остроту зрения. Влияние аберраций высшего порядка (сферических, хроматических, комы, трейлоя и других) гораздо слабее.

Попадание в оптическую систему широких или наклонных пучков света вызывает сферическую аберрацию и кому. Сферическая аберрация (4-го порядка) и кома (3-го порядка) относятся к **аберрациям высших порядков**. Заметный вклад в размытие изображения они вносят, например, при фотосъемке светосильными объективами на открытой диафрагме или в человеческом глазу в темное время суток, когда зрачок максимально расширен.

Сферическая аберрация возникает из-за того, что периферия линзы преломляет световые лучи сильнее, чем ее центральная часть. В результате любая сферическая линза дает изображение точечного источника света в виде размытого круг-

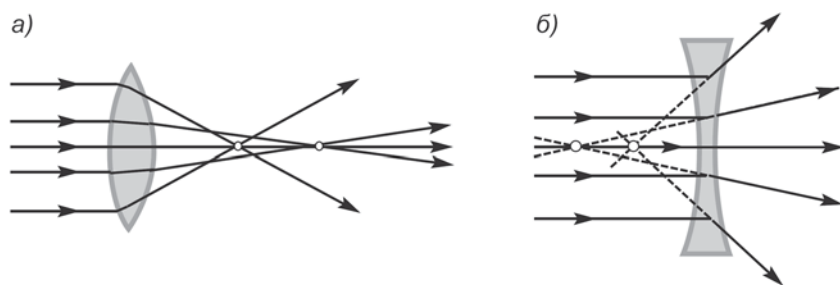


Рис. 1. Образование сферической aberrации в положительных (а) и отрицательных (б) сферических линзах

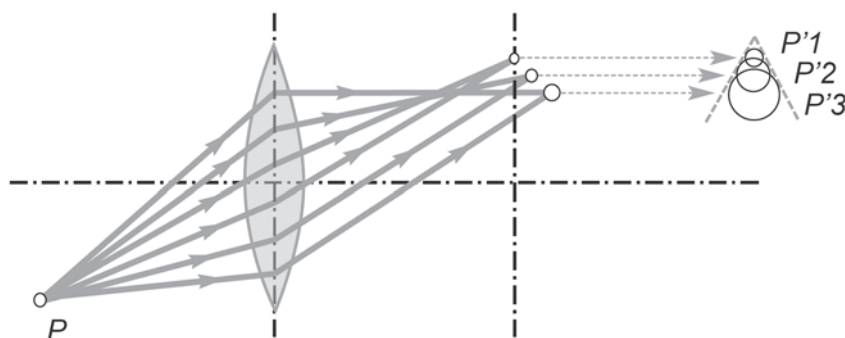


Рис. 2. Образование комы при прохождении широкого светового пучка через линзу под углом к главной оптической оси

лого пятна – **кружка рассеяния** (рис. 1). Симметричность пучка относительно главной оптической оси при этом не нарушается. Исправить сферическую aberrацию можно тремя способами:

- 1) к рассеивающей линзе подобрать собирающую, к собирающей – рассеивающую (в определенной комбинации);
- 2) добавить к сферической линзе или системе линз линзу асферической формы (параболической или гиперболической);
- 3) сузить пучок лучей, попадающих в оптическую систему, поместив в нее апертурную диафрагму (в глазу человека ее роль выполняет зрачок); диафрагмирование ограничивает ширину пучка.

Кома – геометрическая aberrация, возникающая после прохождения через линзу широкого пучка лучей от точки, лежащей не на главной оптической оси, а на побочной (рис. 2). Изображение этой точки выглядит как вытянутое и неравномерно освещенное пятно, по форме напоминающее комету и не симметричное по отношению к главной оптической оси.

Полное отсутствие сферической aberrации называется **апланатизмом**. Искусственная оптическая система

считается строго апланатической, если в ней исправлены и сферическая aberrация, и кома.

Попадание в оптическую систему любых наклонных световых пучков (как широких, так и узких) от точек предмета, удаленных от главной оптической оси, приводит к **астигматизму**. Эту aberrацию нельзя исправить диафрагмированием, так как она проявляется и на узких пучках.

Астигматизм наклонных пучков – невозможность получить после их прохождения через сферическую линзу точечное (стигматическое) изображение. Если предмет S расположен на заметном расстоянии от оптической оси, идущий от него пучок света составляет значительный угол с ней. В этом случае изображение S' получается не в виде точки, а в виде двух **фокальных линий** – перпендикулярных друг другу отрезков, лежащих в разных плоскостях (рис. 3). Расстояние между фокальными линиями называется **астигматической разностью** и определяет силу астигматизма. Для исправления астигматизма наклонных пучков применяются анастигматы – оптические системы из нескольких линз, компенсирующих астигматизм друг друга.

Астигматизм, связанный с асимметрией оптической системы, приводит к тому же результату независимо от направления световых пучков. Он вызван тем, что сферичность реальных линз, как правило, не идеальна, и они преломляют лучи по-разному в вертикальном (меридиональном) и горизонтальном (сагиттальном) сечениях, которые называют **главными сечениями астигма-**

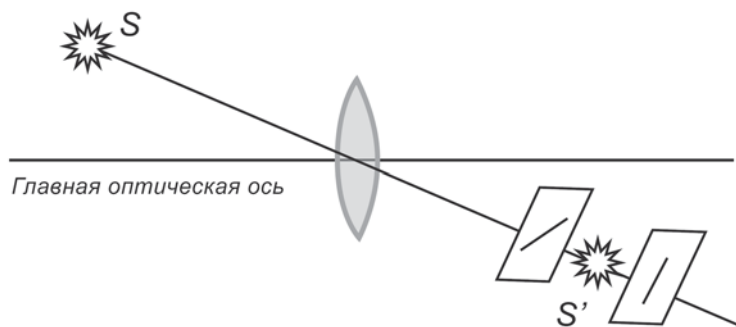


Рис. 3. Астигматизм наклонных пучков

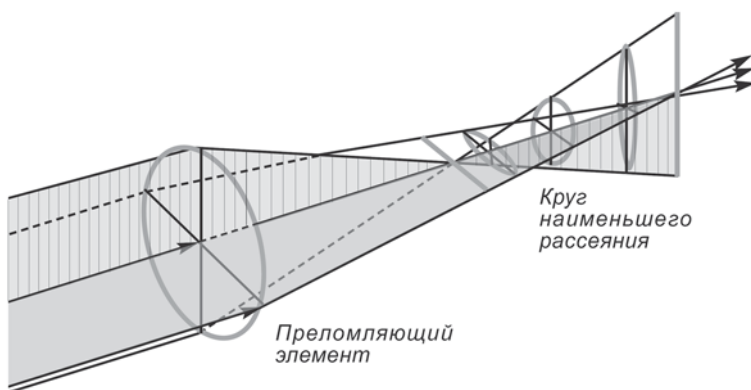


Рис. 4. Ход световых лучей в оптической системе при астигматизме

тизма. При таком астигматизме нет ни одной точки, в которой сходились бы все световые пучки, прошедшие через оптическую систему (рис. 4). Из рисунка видно, что в зависимости от расположения экрана (в человеческом глазу – сетчатки) изображение точки на нем будет иметь вид либо горизонтального отрезка, либо горизонтального овала, либо круга (так называемый **круг наименьшего рассеяния**), либо вертикального овала, либо вертикального отрезка.

На практике при изготовлении линз свести астигматизм к минимуму очень трудно. Неудивительно, что такой астигматизм всегда присутствует и в глазу человека из-за несферичности роговицы и хрусталика (см. ниже). Природный астигматизм глаза можно исправить цилиндрическими очковыми или торическими контактными линзами, а также с помощью рефракционной хирургии. В оптометрии главные сечения астигматизма принято называть **главными меридианами** (в соответствии с топографией роговицы и глазного яблока).

Дисторсия – это искажение изображения из-за непостоянства величины линейного увеличения от центра к периферии линзы. Изображение прямоугольной сетки становится подушкообразным, если линза положительная, или бочкообразным,

если линза отрицательная (рис. 5). Дисторсия искажает изображение, но не влияет на резкость, в отличие от всех геометрических aberrаций, перечисленных выше. Глаз человека – «широкоугольный объектив» с фокусным расстоянием 23 мм, что вызывает некоторую дисторсию. Однако она незаметна из-за того, что наш зрительный анализатор использует для построения образа практически только центральное поле зрения каждого глаза.

Элементы волновой оптики: дисперсия и хроматические aberrации

Нельзя ограничиваться только геометрической оптикой. Некоторые явления, рассматриваемые в волновой оптике, также имеют практическое значение для оптометрии.

Дисперсия (разложение) света – зависимость абсолютного показателя преломления света от частоты падающей на данное вещество световой волны (или от длины волны в вакууме). Световые волны разной длины в одной и той же среде преломляются с разной силой. Самый известный и наглядный пример – эффект разложения видимого света призмой на радужный спектр. Каждому из условно выделяемых 7 основных цветов радуги соответствует определенный диапазон длин световых волн. Смещение всех 7 цветов дает белый цвет. Радуга после дождя и красный цвет солнца на закате – также проявления дисперсии.

Поскольку в реальном мире мы наблюдаем не монохроматический, а полихроматический (смешанный) свет, дисперсия вызывает побочный оптический эффект – хроматические aberrации. **Хроматическая aberrация**, или **хроматизм** – окрашивание изображения, возникающее из-за дисперсии света при прохождении через преломляющий элемент (линзу или призму). Различают хроматизм положения и хроматизм увеличения.

Хроматизм положения, или **продольная хроматическая aberrация**, наблюдается на главной оптической оси. Она проявляется в том, что

фокусы световых волн разной длины не совпадают. Синий свет преломляется сильнее, чем красный. В итоге изображение точечного источника белого света выглядит как набор концентрических цветных колец (рис. 6). Последовательность цветов колец зависит от положения экрана. Хроматизм положения приво-

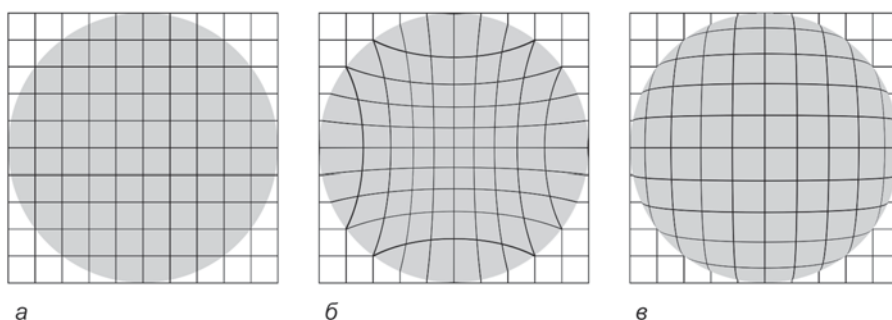


Рис. 5. Дисторсия: идеальное изображение (а), «подушка» (б) и «бочка» (в)

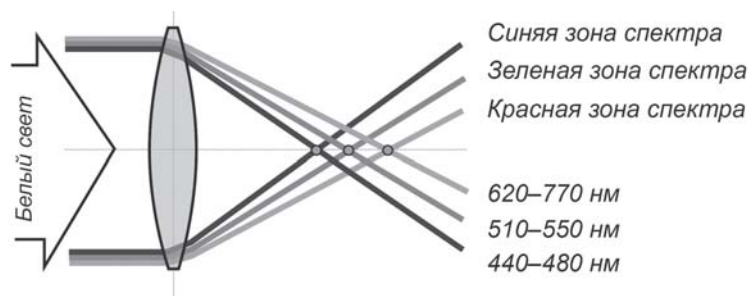


Рис. 6. Хроматизм положения: зависимость фокусных расстояний от длины световых волн

дит к тому, что в эметропическом глазу человека лучи синей части спектра фокусируются перед сетчаткой, а лучи красной части спектра – за ней. Это существенно сказывается на резкости получаемого изображения.

Хроматизм увеличения, или **поперечная хроматическая аберрация**, наблюдается в фокальной плоскости как цветовая кайма по краям изображения. Она возникает из-за того, что оно имеет разные размеры в лучах разного спектра (рис. 7). Это обусловлено разной степенью преломления пучков света, падающих под углом к главной оптической оси. Вместо изображения точки получается цветная линия.

Физическая мера дисперсии в прозрачных средах – **число Аббе**, или **коэффициент дисперсии**. Чем меньше его значение, тем сильнее дисперсия и вызванные ею хроматические аберрации. В очковой оптике это одна из основных характеристик материала очковых линз. Чем выше показатель преломления материала, тем ниже число Аббе.

Глаз человека: невозможность идеальной осесимметричности

В искусственных оптических системах преломляющие элементы, как правило, осесимметричны. У каждой оптической поверхности есть центр кривизны, а центры кривизны всех поверхностей лежат на **оптической оси** – прямой линии, проходящей через геометрический центр системы. Например, производители фотообъективов или подзорных труб добиваются как можно лучшей центрации, выравнивания линз по оптической оси. Плохая центрация ведет к техническому браку – кривизне поля изображения (неравномерной резкости) и другим аберрациям.

Глаз человека – живая оптическая система, созданная природой, и применительно к нему оптическая ось – понятие чисто теорети-

ческое. Истинную оптическую ось можно было бы провести, если бы поверхности роговицы и хрусталика были осесимметричны, как линзы в качественном телескопе-рефракторе. В этом случае их центры кривизны должны лежать на одной линии – оптической оси, перпендикулярной каждой из оптических поверхностей. Однако в реальном глазу оптические поверхности не осесимметричны, так что не существует ни одного глаза с истинной оптической осью.

Оптическая ось глаза иногда определяется как линия, на которой изображения Пуркинье отклоняются друг от друга минимально. С ней совпадает **передне-задняя ось глаза (ПЗО)**, соединяющая передний и задний полюса.

Традиционно выделяется несколько осей в человеческом глазу, а также разные углы между ними и точки пересечения осей с передней поверхностью роговицы. Основные оси показаны на рис. 8. Хорошо заметно, что оптическая ось не совпадает с зоной фовеа, играющей ключевую роль в зрительном восприятии. Желтое пятно с ямкой децентрировано – смещено примерно на 5 градусов в темпоральную сторону по отношению к точке пересечения оптической оси с сетчаткой. На рисунке показано расположение зоны фовеа, центра зрачка Е и узловых оптических точек N и N' относительно ПЗО, а также **зрительная ось**, или **ось фиксации**. Если глаз смотрит на точку фиксации, зрительная ось определяется как линия, соединяющая точку фиксации с передней узловой точкой N, а затем идущая к зоне фовеа.

Несовпадение зрительной оси с оптической – одна из нерешенных пока загадок эволюции. Отчасти это компенсируется тем, что отверстие зрачка обычно тоже слегка децентрировано в противоположную, назальную сторону. Теоретически расположение зрительной ямки прямо на оптической оси обеспечивало бы лучшее качество изображения, сводя к минимуму аберрации. С

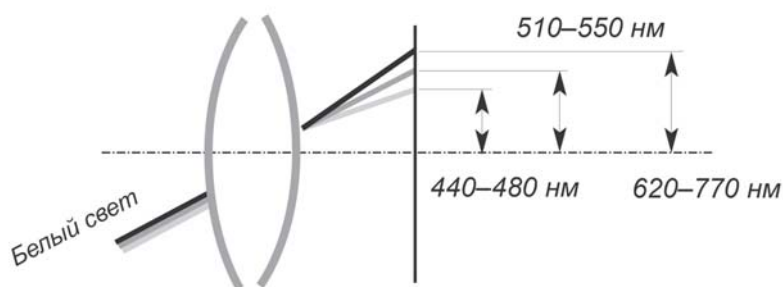


Рис. 7. Хроматизм увеличения: зависимость размеров изображения от длины волн косых пучков света

другой стороны, в ряде зарубежных исследований отмечается, что продольные хроматические aberrации в зоне фовеа помогают мозгу быстрее реагировать на дефокус и включать механизм аккомодации, чтобы изображение снова стало резким.

Качество ретинального изображения может ухудшаться из-за патологий сетчатки. Но в первую очередь него влияют четыре вида размытия, снижающие резкость и контраст: 1) светорассеяние при прохождении через хрусталик и стекловидное тело, 2) зрачковая дифракция, 3) неточная фокусировка из-за ошибок аккомодации и аметропий, 4) aberrации глаза.

Влияние геометрии роговицы на aberrации

Вклад первой линзы оптической системы глаза в общую картину aberrаций связан с особенностями ее геометрии. Еще в начале 70-х годов XX века было установлено, что роговица **асферична**: радиус ее кривизны постепенно увеличивается от центра к периферии. По форме она напоминает не участок сферы, а вытянутый конец эллипсоида, наподобие мяча для регби. С тех пор многочисленные исследования позволили уточнить картину. Для описания точной формы роговицы используется наглядный метод корнеотопографии: концентрические световые кольца проецируются на роговицу, полученное изображение фотографируется, анализируется компьютером и преобразуется в карту рельефа – топограмму.

Асферичность более выражена на периферии (до 1 мм), чем в центре (всего 0,3 мм), где роговица почти сферична, а кривизна ее максимальна. За пределами центральной зоны диаметром 3–5 мм передняя поверхность роговицы постепенно уплощается по направлению к краю, причем асимметрично. Все это хорошо заметно на топограммах (рис. 9). Обычно роговица уплощается в темпоральную сторону сильнее, чем в назальную. Если асимметрия в пределах нормы, форма роговицы считается регулярной. Иррегулярная форма требует особого подхода к оптической коррекции, особенно контактной, из-за необходимости учитывать посадку линзы на глаз и корректировать сильные aberrации, в первую очередь выраженный неправильный астигматизм.

Другой важный геометрический параметр роговицы – **радиус центральной кривизны** ее поверхности, измеряемый специальными приборами – офтальмометром или кератометром. Аналогичная функция есть и в авторефкератометрах – приборах, совмещающих в себе автоматическое измерение рефракции глаза и геометрии роговицы. Радиус центральной кривизны – усредненное значение по одному из меридианов передней повер-

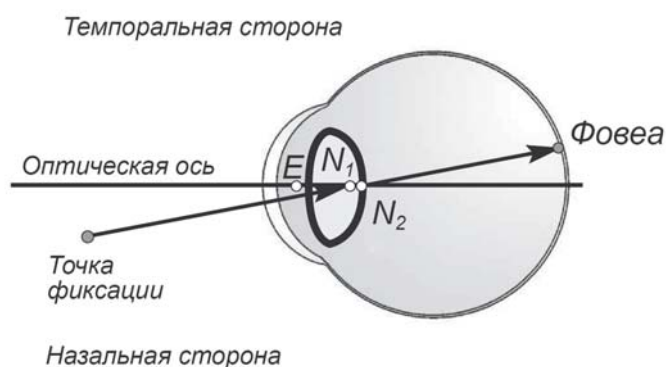


Рис. 8. Схема правого глаза в горизонтальном разрезе (вид сверху): оптическая и зрительная оси

хности на центральном участке диаметром 3–5 мм. Этим он отличается от апикального радиуса, измеряемого не на участке, а только в одной точке – вершине роговицы.

Вертикальный диаметр роговицы в среднем составляет 10,6 мм, горизонтальный – 11,7 мм. Вертикальный диаметр обычно меньше примерно на 1 мм. Этому соответствует и кривизна: вертикальный радиус кривизны меньше, чем горизонтальный, то есть в вертикальном меридиане роговица немного круче. Таким образом, роговица – не просто эллипсоид, а слегка сплюснутый эллипсоид, она имеет торическую форму. Величина торичности в центре и на периферии практически одинакова и не превышает 0,3 мм.

В пресбиопическом возрасте практически у всех людей корнеосклеральное кольцо, на которое опирается роговица, деформируется. В результате все меняется наоборот: кривизна роговицы в горизонтальном меридиане становится сильнее, чем в вертикальном.

Асферичность и торичность роговицы, отсутствие идеальной осевой симметрии приводят к астигматизму, трейлоу и некоторым aberrациям высшего порядка. Но асферичность дает и важное преимущество. Линзы из оптически однородного материала со сферическими преломляющими поверхностями вызывают очень сильные сферические aberrации. Наглядный пример – объектив-монокуляр, самая старая оптическая схема в истории фотографии. Этот объектив, состоящий из одной линзы с помещенной перед ней диафрагмой, позволяет получать снимки с характерным эффектом размытия и свечения по краям объектов – очень живописно, но непрактично с точки зрения зрительных задач, стоящих перед человеком в повседневной жизни. Асферическая форма роговицы существенно снижает сферические aberrации, которые еще сильнее уменьшаются при прохождении света через хрусталик (см.

ниже). У здоровых людей средняя величина сферических aberrаций составляет около 0,1 мкм, что соответствует рефракционной ошибке всего в 0,12 дптр.

Асферичность роговицы в последние годы учитывается при производстве контактных линз, в том числе мягких (МКЛ). Раньше задняя поверхность МКЛ делалась сферической, и это давало сферические aberrации, особенно сильные при нехватке света, когда зрачок расширен. Они снижали контраст и разрешающую способность глаза, а в некоторых ситуациях вызывали серьезный зрительный дискомфорт. Например, водители вечером слепли из-за сияющих ореолов и гало вокруг каждого встречного источника света. Теперь практически все крупные производители выпускают МКЛ только с задней асферикой. Постепенно входит в моду и биасферика. Это улучшает посадку КЛ на глазах, уменьшает aberrации высших порядков и помогает линзе лучше встраиваться в природную оптику роговицы.

Зависимость aberrаций от диаметра зрачка

Будучи подвижной апертурой оптической системы глаза, зрачок существенно влияет на картину aberrаций. В нормальном состоянии он пропускает в глаз только центральный пучок световых лучей, тем самым уменьшая сферические и хроматические aberrации. Это повышает качество ретинального изображения и остроту зрения, особенно на ярком свете.

В оптической системе глаза, как и в объективах, разрешение и глубина резкости напрямую зависят от размера апертурной диафрагмы. Чем меньше диаметр зрачка, тем выше глубина резкости, разрешающая способность глаза и, следовательно, острота зрения. Наилучшая острота зрения достигается при 2–3 мм (обычный диаметр зрачка при дневном освещении). Aberrации, вызванные роговицей и хрусталиком, при этом практически исчезают. Хотя, если зрачок меньше 2 мм, качество ретинального изображения начинает падать из-за дифракции.

И наоборот, расширение зрачка всегда приводит к ухудшению качества зрения. В темноте глаз начинает работать как объектив с плохо исправленными aberrациями при максимально открытой диафрагме. Светосила глаза при зрачке 8 мм примерно соответствует значению диафрагмы $f/2$. Если в поле зрения попадают яркие источники света (фонари, автомобильные фары и т. п.), возникают оптические помехи – блики и отражения. Уже при расширении зрачка свыше 3 мм начинают проявляться сферические и хроматические

aberrации, ухудшается контрастная чувствительность, уменьшается глубина резкости. Лучи, проходящие через периферию расширенного зрачка, фокусируются не на сетчатке, а перед нею, что вызывает миопизацию до 0,3 дптр. Хроматические aberrации дают близорукость до 0,5 дптр. Чтобы компенсировать все эти отрицательные эффекты, цилиарная мышца напрягается. Расширение зрачков вносит заметный вклад в так называемую *ночную миопию*.

Кроме того, зрачки слегка смещены в назальную сторону – приблизительно на 0,5 мм. Это вызывает небольшую кому. Таким образом, зрачки вносят определенный вклад в aberrации волнового фронта глаза.

Роль хрусталика в уменьшении сферических aberrаций

Если бы хрусталик был оптически гомогенной линзой, он вызывал бы значительную сферическую aberrацию. Однако хрусталик – линза неоднородная, многослойная. У разных слоев немного отличается рефракционный индекс и радиус кривизны. Самый высокий показатель преломления – в центре хрусталика, ядре; чем ближе к периферии, тем он слабее (разница достигает примерно 15%). В пределах ядра рефракционный индекс практически одинаков, самые заметные изменения происходят в кортикальных слоях. Это уменьшает сферическую aberrацию и тем самым улучшает качество изображения. Однако стоит отметить, что хрусталик может быть наклонен или децентрирован относительно роговицы.

Aberrации глаза и волновой фронт

Для идеальной остроты зрения необходимо, чтобы все множество входящих в глаз лучей собралось строго в фокусе на сетчатке. На практике этот идеал недостижим даже в оптических приборах, поскольку при самом точном производстве нельзя добиться идеальной центровки и формы оптических поверхностей. В природе не бывает идеальных математических

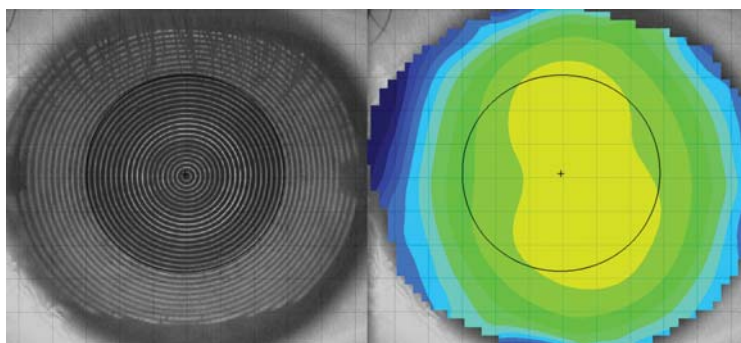


Рис. 9. Топограмма здоровой роговицы

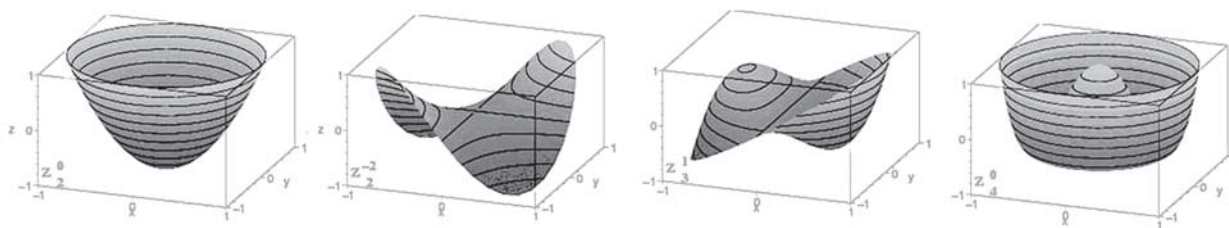


Рис. 10. Некоторые полиномы Цернике, имеющие практическое значение для оптометрии: **а** – дефокус; **б** – астигматизм; **в** – кома; **г** – сферическая аберрация.

форм. Кроме того, свет полихроматичен, а лучи с разной длиной волны нельзя собрать в одной точке. И, наконец, сделать это не позволяет сама волновая природа света: точка всегда будет в той или иной степени размыта из-за дифракции.

Из всего, что выше говорилось о несимметричности оптической системы глаза, очевидно, что она не может быть свободной от дефектов – аберраций, в той или иной степени искажающих ретинальное изображение. И в самом деле, в глазу есть все виды аберраций, которые встречаются во всех оптических системах. Вопрос лишь в том, насколько они сильны.

Для измерения аберраций глаза сейчас широко применяется **анализ волнового фронта**. Эта технология позволяет определить оптические искажения в каждой точке поля зрения и по сути является также очень точным объективным способом измерения рефракции. Неслучайно aberrometer Шака – Гартмана все чаще встраивается в современные авторефрактометры. Устройство посылает в глаз небольшой пучок лучей и с помощью сенсора анализирует их отражение от сетчатки глаза. Проходя через хрусталик и роговицу, лучи отклоняются от идеальной траектории. Эти отклонения фиксируются компьютерной системой и записываются в виде карты волнового фронта.

Волновой фронт глаза – условная поверхность, геометрическое место точек, до которых к заданному времени дошел процесс распространения световой волны. При обследовании не существующего в природе «идеального» глаза эта поверхность получилась бы плоской, но в реальности она имеет сферическую форму со множеством микроскопических изгибов и ямок. На экранах современных приборов карта волнового фронта может быть представлена либо в виде плоской

фронтальной проекции, либо в виде объемной фигуры, где зоны оптических искажений выделяются разными оттенками спектра. Зеленый цвет означает, что искажений практически нет; синий – что на данном участке волнового фронта лучи запаздывают; красный – что они приходят раньше. Интенсивность цвета указывает на величину ошибки волнового фронта.

Полученные поверхности удобно распределить по типам в зависимости от их формы. В большинстве aberromетров предусмотрена возможность подобной сортировки на основе полиномов Цернике. Сами по себе полиномы Цернике – математические функции, с которыми условно можно соотносить формы аберраций волнового фронта, типичные для оптических систем, в том числе для глаза. Каждый полином представляет одну элементарную аберрацию вроде комы или трейфола. Некоторые из них показаны на рис. 10.

Карта волнового фронта – наглядное отображение разницы между «идеальным» и реальным глазом. Хотя средний уровень аберраций у разных людей очень похож, карта волнового фронта так же уникальна, как отпечатки пальцев. Анализ волнового фронта стал для офтальмологов и оптометристов совершенным инструментом измерения аберраций всех типов. Это позволило впервые обратить пристальное внимание на аберрации высших порядков. Долгое время оптометристы под-

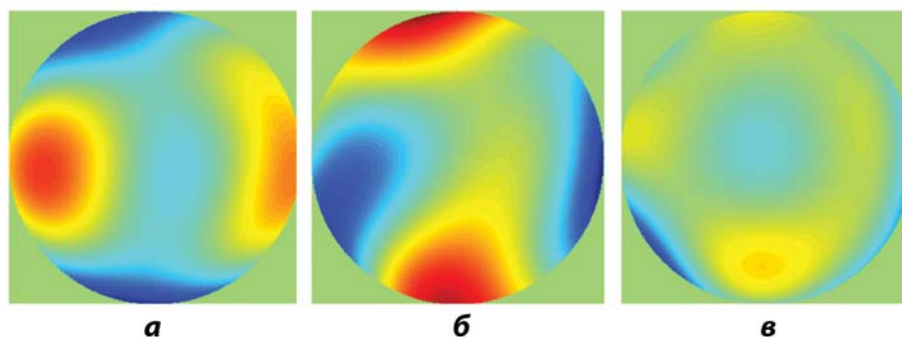


Рис. 11. Компенсация аберраций роговицы аберрациями хрусталика в здоровом глазу при ширине зрачка 5 мм: **а** – карта волнового фронта аберраций роговицы; **б** – карта аберраций хрусталика; **в** – итоговая суммарная карта [цит. по работе Artal P. и соавт. Compensation of corneal aberrations by internal optics in the human eye // J. Vis. – 2001. – Vol. 1. – № 1].

бирали только сферическую и цилиндрическую коррекцию aberrаций второго порядка. Пионерами в борьбе с aberrациями высших порядков стали офтальмохирурги.

Предполагалось, что полная лазерная коррекция всех aberrаций должна обеспечить пациенту так называемое суперзрение – остроту зрения 2,0 и больше. Практика показала, что это не так. Сама структура рецептивных полей сетчатки накладывает ограничения на зрительное разрешение. Более того, как отмечают С.Э. Аветисов и В.М. Шелудченко, aberrации высших порядков играют положительную роль, увеличивая глубину фокусной области [1].

Не стоит преувеличивать значение aberrаций высшего порядка. Для здорового глаза при нормальном освещении их влияние на остроту зрения очень невелико. Несмотря на все свои оптические недостатки, глаз человека работает почти как апланатическая система. У здоровых молодых людей при расслабленной аккомодации наблюдается сферическая aberrация $Z_4^0 \approx 0,13$ мкм. Она приводит к пренебрежительно малой рефракционной ошибке в 0,12 дптр.

Столь низкий уровень сферической aberrации в глазу объясняется взаимодействием двух несовершенных оптических компонентов – роговицы и хрусталика. Сегодня общепризнано, что хрусталик компенсирует умеренный роговичный астигматизм и сферическую aberrацию (рис. 11). Недавние исследования показали, что хрусталик может компенсировать и кому. Но с возрастом, когда хрусталик начинает стареть и терять эластичность, оптическое равновесие между ним и роговицей нарушается, и суммарные aberrации растут. Поэтому молодой глаз более апланатичен, чем старый. Начиная с возраста 30 лет aberrации высших порядков начинают усиливаться, и к 60 годам их общая величина удваивается.

Кроме возраста, на величину сферической aberrации влияют диаметр зрачка и уровень освещенности, рефракция, степень напряжения аккомодации (чем сильнее аккомодирует глаз, тем выше сферическая aberrация) и даже моргание или смена направления взора. Такая изменчивость aberrаций высшего порядка заставляет задуматься, насколько вообще возможно исправлять их оптическими средствами коррекции.

В 2000-е годы технологию волнового фронта начали применять для изготовления контактных и очковых линз по индивидуальным заказам. Не-

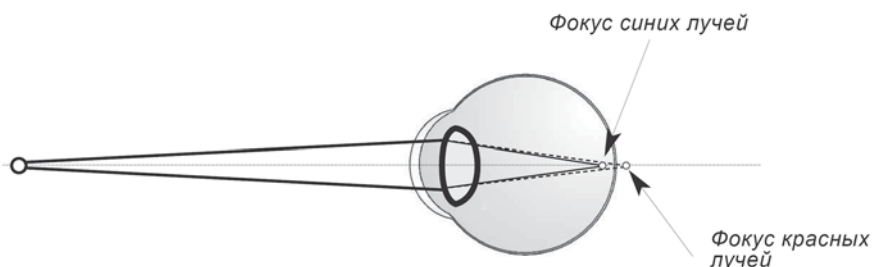


Рис. 12. Дисперсия света в глазу человека: разноцветные лучи, идущие от наблюдаемого объекта, фокусируются на разном расстоянии от сетчатки.

которые ведущие производители представили свои варианты линз, исправляющих aberrации высшего порядка. Разумеется, если оптический дизайн линзы точно подогнан под картину волнового фронта глаза, ее подвижность нужно максимально ограничить. Иначе при малейшем сдвиге очковой оправы или ротации контактной линзы возникнет масса новых, индуцированных aberrаций.

Такие индивидуальные линзы по-настоящему необходимы лишь в некоторых случаях. При выраженной иррегулярности формы роговицы уровень aberrаций очень велик, так как оптическая поверхность сильно искажена. Линзы с учетом данных волнового фронта также помогают пациентам с повышенным уровнем сферических aberrаций. Вечером, когда зрачок расширен, у таких людей заметно падает острота зрения.

Итак, сферическими aberrациями высших порядков в большинстве случаев можно пренебречь. А вот продольные хроматические aberrации довольно заметно влияют на рефракцию. При прохождении света через хрусталик наблюдается дисперсия: лучи разного цвета преломляются по-разному (рис. 12). В результате фокусное расстояние глаза возрастает вместе с длиной волны. Разница в силе рефракции между крайними границами видимого диапазона – фиолетовыми и красными лучами достигает 2 дптр! При эметропии точный фокус на сетчатке образуют именно лучи из желто-зеленой части спектра. Красные лучи фокусируются за сетчаткой, а синие – перед ней. Очки и контактные линзы корректируют глаз с учетом только одной длины световой волны. Однако в повседневной жизни мы постоянно сталкиваемся с разноцветными объектами, и испускаемые ими световые волны не могут фокусироваться на сетчатке одновременно.

Сейчас считается, что исправлять хроматические aberrации не стоит. Они стимулируют аккомодацию, помогая быстрее сфокусировать глаз на нужном объекте. Однако необходимо учитывать, что окрашенные линзы влияют на рефракцию. Например, достоверно установлено, что желтые све-

тофильтры улучшают остроту зрения, контрастную чувствительность и зрительную работоспособность. Напротив, использование фиолетовых светофильтров приводит к заметной миопизации до 0,75 дптр. Влияние светофильтров на рефракцию используется в спектральной коррекции зрения.

Заключение

Еще раз кратко перечислим особенности оптической системы глаза человека, влияющие на общую картину aberrаций.

Факторы, вызывающие aberrации:

- оптические поверхности глаза не осесимметричны;
- поверхности роговицы и хрусталика не идеально сферичны, их форма в той или иной степени неправильна;
- роговица всегда имеет торическую форму, а значит, в любом глазу есть астигматизм;
- зрительная ось не совпадает с оптической, так как зона фовеа на сетчатке отклонена от оптической оси примерно на 5° в височную сторону;
- апертура глаза (зрачок) также слегка децентрирована в противоположную, назальную сторону;
- при диаметре зрачка более 3 мм сферические и хроматические aberrации начинают отрицательно влиять на качество зрения; это особенно заметно при расширении зрачка до 5 мм;
- оптическая система глаза – аналог широкоугольного фотообъектива с фокусным расстоянием примерно 23 мм, а значит, она вызывает дисторсию;
- дисперсия света при прохождении через хрусталик вызывает хроматические aberrации.

Факторы, уменьшающие aberrации:

- асферичность роговицы существенно снижает сферические aberrации;
- хрусталик оптически неоднороден, его преломляющая сила максимальна в центре и падает к периферии; это еще более снижает сферические aberrации;
- сферические aberrации, вызванные роговицей, как правило, компенсируются хрусталиковыми aberrациями;
- при обычном диаметре зрачка до 3 мм в дневное время величина aberrаций пренебрежимо мала, а при диаметре от 2,5 до 3,2 мм (по разным данным) они совершенно не влияют на качество изображения;
- дисторсия не замечается, поскольку для зрительного анализатора имеет значение только центральная часть поля зрения;

- так же успешно зрительный анализатор «исправляет» незначительные сферические и хроматические aberrации, попросту не замечая их.

Список литературы

1. Аветисов С.Э., Шелудченко В.М. Нужно ли нам суперзрение? Aberrации глаза // Клиническая физиология зрения: очерки. – 2-е изд., перераб. и доп. – М., 2002. – С. 488–501.
2. Балашевич Л.И. Диагностика и коррекция оптических aberrаций глаза // Международный медицинский журнал. – 2003. – Т. 9. – № 3. – С. 62–69.
3. Вит В.В. Строение зрительной системы человека. – Одесса: Астропринт, 2003.
4. Герман И. Физика организма человека /Пер. с англ. – Долгопрудный, 2011.
5. Ландсберг Г.С. Оптика. – Изд. 5-е, перераб. и испр. – М.: Наука, 1976.
6. Луизов А.В. Глаз и свет. – Л., 1983.
7. Можаров Г.А. Основы геометрической оптики: Учеб. пособие. – М., 2006.
8. Офтальмология: национальное руководство /Под ред. С.Э. Аветисова, Е.А. Егорова, Л.К. Мошетовой, В.В. Нероева, Х.П. Тахчиди. – М., 2008.
9. Розенблюм Ю.З. Оптометрия (подбор средств коррекции зрения). – Изд. 2-е, испр. и доп. – СПб., 1996.
10. Справочник медицинского оптика, часть первая. Основы физической оптики. Физиология зрения. Контактная коррекция. Очковые линзы /Певко Д.В., Кушель Т.К., под ред. В.Г. Бахтина. – СПб., 2016.

E-mail для связи с автором: mag_glaz@yahoo.com.

weboptica.ru
ОПТИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК

СОЛНЕЦАЗАЩИТНЫЕ ОЧКИ

ОПРАВЫ

МАГАЗИНЫ, САЛОНЫ ОПТИКИ

ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИНЫ

ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

КАЛЕНДАРЬ СОБЫТИЙ

КОНТАКТНЫЕ ЛИНЗЫ

КЛУБ ОЧКАРИКОВ

КОНКУРСЫ

ОЧКИ

www.weboptica.ru