

УДК 617.7:612.844.2:617.751.073.581

Оптические особенности прохождения света через преломляющие структуры глаза

И. Н. Кошиц¹, генеральный директор; О. В. Светлова², д-р мед. наук, профессор,
М. Г. Гусева³, врач-офтальмолог, Д. В. Певко⁴, выпускающий редактор;
М. Б. Эгембердиев⁵, канд. мед. наук, зав. офтальмологическим отделением

¹ ООО «Питерком – Сети / МС»,
Санкт-Петербург

² ФГБОУ ВО «Северо-
Западный государственный
медицинский университет
им. И.И. Мечникова»,
Санкт-Петербург;

³ Диагностический центр ГУП
«Водоканал Санкт-Петербурга»;

⁴ Журнал «Глаз», Москва;

⁵ Чуйская областная
объединенная больница,
Бишкек (Киргизия)

Рассмотрены особенности преломления света в переднем отрезке глаза и после дисперсии на задней поверхности роговицы. Показано, что роговица преломляет свет, как слабо рассеивающая линза. Сделан вывод о том, что оптическая система глаза по сути представляет собой своеобразный природный телескоп. Основной задачей переднего отрезка глаза является оптическое сжатие приходящего из окружающего пространства светового излучения в пучок (тоннель) света диаметром 1,8–2,5 мм, который сможет пройти к foveola даже через узкий зрачок. Введено понятие «световой тоннель».

Задачей хрусталика является эффективное оптическое управление в «световом тоннеле» тремя базовыми дисперсионными полосами синего, зеленого и красного цветов (СЗК-полосами). Это оптическое управление осуществляется с помощью двух мини-линз, расположенных по центру передней и задней поверхностей хрусталиковой капсулы. Возможно, главный механизм хрусталиковой аккомодации – изменение кривизны этих мини-линз при взгляде вблизи или вдаль.

Исполнительным механизмом «тоннельной» аккомодации является изменяющееся давление внутри хрусталика, которое максимально при взгляде вблизи, когда эластичная капсула хрусталика мало растянута и способна наиболее сильно обжимать хрусталиковые массы.

С учетом физиологических особенностей путей доставки и удаления водянистой влаги, необходимой для поддержания метаболизма внутренних структур хрусталика, сделан практический вывод о возможной скорости развития катаракты у гиперметропов и миопов в условиях неправильно подобранной оптической коррекции. Даются рекомендации по рациональной оптической коррекции.

Ключевые слова:

оптика глаза, световой тоннель, аккомодация, мини-линзы хрусталика, катаракта

Введение. Традиционные представления об оптике человеческого глаза сегодня являются общепринятыми и даже вошли в школьные учебники. Считается, что оптический тракт глаза изучен досконально и не требует серьезных исследований. Однако остается множество «неудобных» вопросов, на которые пока нет ответа. В частности, до сих пор было не совсем понятно следующее:

- как боковые лучи света попадают на периферию хрусталика и преломляются при узком зрачке, а не задерживаются при этом радужкой?
- как могут преломляться лучи света, расположенные вблизи оптической оси хрусталика, где кривизна передней и задней поверхностей его капсулы по сравнению с периферией может быть сравнительно мала?

- где происходит дисперсия белого света – внутри роговицы или на ее задней поверхности?

- каков вид оптического сигнала, приходящего в сетчатку – круги или полосы светорассеивания синего, зеленого и красного цветов (СЗК-полосы), которые могут обнаружить колбочки макулы?

- как работает система «бинокулярного наведения» обоих глаз на рассматриваемый предмет и как работает их индивидуальный «оптический прицел»?

- какой вклад в «собирающую» оптическую систему переднего отрезка глаза вносит роговица, являющаяся слабо рассеивающей линзой?

© И. Н. Кошиц, О. В. Светлова, М. Г. Гусева, Д. В. Певко,
М. Б. Эгембердиев, 2017

- что следует считать фокусом глаза, когда в принципе невозможно одновременно совместить на какой-то общей фокальной плоскости фокусы трех волновых СЗК-фронтов из-за наличия оптической осевой аберрации?

- какой высоконадежный оптический сигнал должны сформировать в макуле исполнительные механизмы аккомодации для того, чтобы мозг смог «отследить» момент точного наведения глаза на выделенное пространство или настроить предметную резкость?

- какие параметры СЗК-полос, сформированных оптической системой глаза, должна уметь фиксировать макула в целом и ее fovea в частности, для формирования в мозгу сигнала обратной связи на управление ресничной мышцей и системой аккомодации в целом?

- каким образом, например, изменяют топографию и преломляющую способность роговицы ортокератологические линзы ночного ношения? «Оптическое выключение» каких физиологических адаптационных механизмов делает ОК-линзы самыми эффективными в борьбе с приобретенной миопией?

Даже поверхностный взгляд на вышеперечисленные вопросы приводит к неутешительному выводу о том, что не все так прекрасно в «оптическом глазном королевстве» и что оптометрия – это пока слабо разработанная область знаний. Ведь количество таких «неудобных вопросов» может быть значительно больше, чем приведено. И с этим надо что-то делать, несмотря на то, что оптометрические «символы веры» часто существенно затрудняют движение вперед.

Первый ярчайший пример этому – отсутствие до настоящего времени общепринятой теории аккомодации. Хотя теория хрусталиковой аккомодации гениального Гельмгольца выдержала испытание временем и по своей сути не противоречит законам механики, но она может считаться только первым важным шагом в понимании того, как работает вся система аккомодации в целом.

Стоит отметить, что сегодня в глазу уже найдено большое количество дополнительных механизмов аккомодации и даже создана их классификация [14, 17-19, 24, 26, 29, 30, 33, 38-43]. Кроме того, оформлены первые гипотетические представления о выявленных новых исполнительных механизмах для получения резкого изображения за счет формирования на сетчатке такого оптического сигнала, который адекватен ее физиологическим возможностям [12, 13]. Однако множество нерешенных вопросов в оптике глаза, на наш взгляд, пока являются главным тормозом в создании адекватной законам оптики и механики теории аккомодации.

Второй яркий пример – это продолжительное отсутствие работоспособной теории миопии. Достаточно популярная сегодня теория изменения периферического дефокуса (ТИРД) противоречива, а ее гипотезы часто не имеют под собой внятных морфофизиологических оснований [21, 25]. Традиционные представления о приобретенной миопии как о болезни, а не как о

нормальном адаптационном процессе подбора длины оптической оси глаза под возросшие зрительные нагрузки в условиях «дисплейной» цивилизации, значительно осложняют задачу поиска реальных исполнительных механизмов удлинения ПЗО.

Предложенная в 2001 году И. Н. Кошицем и О. В. Светловой метаболическая теория адаптационной миопии частично ликвидировала этот пробел и уже успешно прошла клиническое подтверждение со сроками наблюдения 3, 5 и 7 лет [8, 9, 13, 31].

Стало также ясно, что на пути создания более эффективных средств оптической коррекции стоит непонимание основных особенностей функционирования оптической части общего зрительного тракта глаза, включающего и электрическую часть [1]. Учитывая, что человечество ждет самая массовая в его истории эпидемия – «пандемия близорукости», когда более половины населения Земли (5,5 млрд) к 2050 году станут миопами [13, 20, 37], углубленные исследования оптики глаза становятся особенно актуальными.

Также стоит отметить, что слабая проработка теоретических основ оптометрии заставила многих практикующих офтальмологов и оптометристов больше доверять своей интуиции при выборе оптической коррекции из-за явной противоречивости многочисленных «руководящих установок». Ведь начиная с 60-х годов прошлого века нашим оптометристам рекомендовалось в основном применять для миопов полную переносимую коррекцию для дали [6], затем к концу прошлого века произошел массовый разворот к неполной коррекции для дали [2-5].

И только сравнительно недавно нам стало ясно, что нужна рациональная оптическая коррекция, позволяющая использовать слабую перекоррекцию для дали и близи. А в случае продолжительной напряженной работы с дисплеями применять для близи полную коррекцию или слабую недокоррекцию с учетом возможной усталости ресничной мышцы [8, 9, 31]. Если внимательно рассмотреть особенности постепенного изменения в течение рабочего дня физиологического воздействия на рефракцию глаза ортокератологических линз ночного ношения (ОК-линз), то станет ясно, что именно эту нашу стратегию они и реализуют! Ниже мы рассмотрим все это более подробно.

Рациональная коррекция необходима для того, чтобы поддерживать определенный тонус ресничной мышцы и за счет водянистой влаги обеспечивать перенос по увеосклеральному пути достаточного количества ингредиентов для полноценного метаболизма коллагеновых структур средней и задней части склеры, чтобы предотвратить удлинение ее заднего полюса [11, 15, 16, 19, 23, 26-28].

Сказанное заставляет обратить пристальное внимание на оптику глаза как на первое звено в системе управления механизмами аккомодации. И это одна из причин появления данной статьи как логичного продолжения трех предшествующих [12, 13, 21].

1. Строение капсулы хрусталика и ее взаимодействие с волокнами ресничного пояска

Выдающиеся отечественные офтальмологи А.И. Горбань и О. А. Джалиашвили издали в 1993 году по-разительную книгу с собственными рисунками А. И. Горбаня, в которой нет ни одной ошибки с точки зрения законов механики [7]. Эта книга и сегодня совершенно не утратила своей актуальности, поскольку еще тогда явно опередила на десятилетия свое время. Некоторые авторы данной статьи имели честь лично обсуждать проблемы биомеханики хрусталика и механизмов аккомодации с А. И. Горбанем и О. А. Джалиашвили и могут засвидетельствовать их глубокое понимание не только законов механики, но и других законов природы, включая оптику. Оба обладали глубокими энциклопедическими познаниями. Именно это «природное междисциплинарное чутье» помогло им создать такой учебный шедевр. По их и нашим представлениям общее строение сумки хрусталика с местами прикрепления волокон ресничного пояска таково (рис. 1).

На рисунке 1 видны мощные круговые утолщения капсулы хрусталика в местах прикрепления передней и задней порций волокон ресничного пояска (РП). Это, по сути, своеобразная толстая круговая коллагеновая связка, кольцо которой мало подвержено растяжению во все стороны.

А вот порция т. н. «уздечковых» цилиозекваториальных волокон (ЦЭВ) под цифрой 4 на рис. 1В прикреплена к более тонкой экваториальной части сумки хрусталика и помогает удерживать хрусталиковые массы по центру оптической оси хрусталика при любом положении головы и даже в невесомости [30, 33].

Во всех фазах аккомодации хрусталик поджат мощной передней порцией волокон к стекловидной камере. Волокна РП максимально натянуты при взгляде вдаль и ослаблены (не расслаблены!) при взгляде вблизи. Это позволяет сумке хрусталика максимально округлиться и более мощно сжать внутрехрусталиковые массы (см. рис. 2) [26, 30, 33]. Прижатие хрусталика к стекловидной камере с помощью волокон РП и связки Вигера

Топография капсулы хрусталика на разрезе (А) и в общем плане (Б) [А. И. Горбань, О. А. Джалиашвили, 1993]

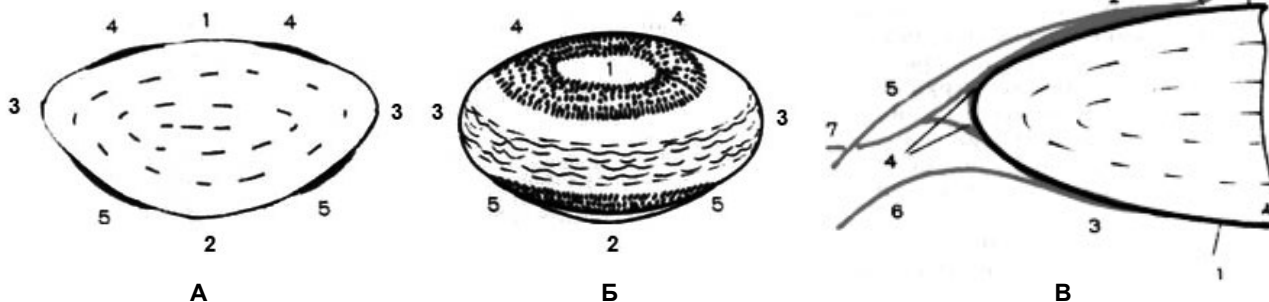


Рис. 1. Топография капсулы хрусталика на разрезе (А), в общем плане (Б) и с прикрепленными порциями волокон ресничного пояска (В) [7]. На схеме: 2 на А и Б – задняя мини-линза хрусталика; 1 на А и Б – передняя мини-линза хрусталика; 4 на А и Б / 2 на В – область прикрепления сегментов передней, самой мощной порции волокон ресничного пояска (РП); 5 на А и Б / 3 на В – область прикрепления задней порции волокон РП, равномерно покрывающей купол стекловидной камеры; 3 на А и Б / 4 на В – область прикрепления порции цилиозекваториальных волокон (ЦЭВ) РП, распределенных равномерно по экватору сумки хрусталика. Перекрещивание всех порций волокон отсутствует. Передняя и задняя порции волокон непосредственно силовым образом не прикреплены к ресничной мышце, а порция ЦЭВ имеет прямое прикрепление в углублениях ресничной мышцы [10, 17-19, 24, 29, 30, 33].

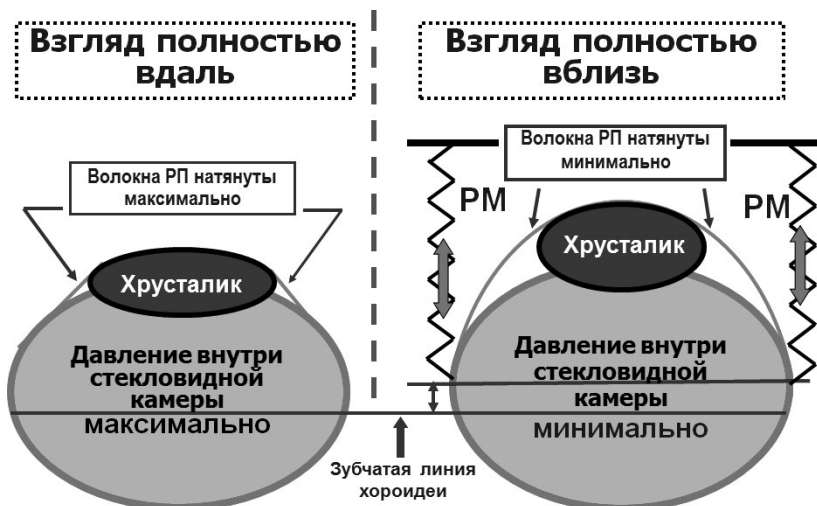


Рис. 2. Схема прижатия хрусталика к стекловидной камере волокнами ресничного пояска в крайних фазах аккомодации [26, 30, 33].

Давление внутри хрусталика при взгляде вблизи максимально, а при взгляде вдаль минимально.

осуществляется во всех фазах аккомодации и позволяет такому демпфирующему механизму не только надежно удерживать хрусталик в глазу, но и гасить его колебания при инерционных нагрузках.

Обобщенный рисунок коллагеновых структур хрусталика представлен в учебном курсе Американской академии офтальмологии (рис. 3). Хорошо видно, насколько мощными относительно структур капсулы хрусталика являются передняя и задняя порции волокон. Проф. В.В. Волков назвал их «вожжами», и это абсолютно точно характеризует их биомеханическую сущность. Также стоит обратить внимание на

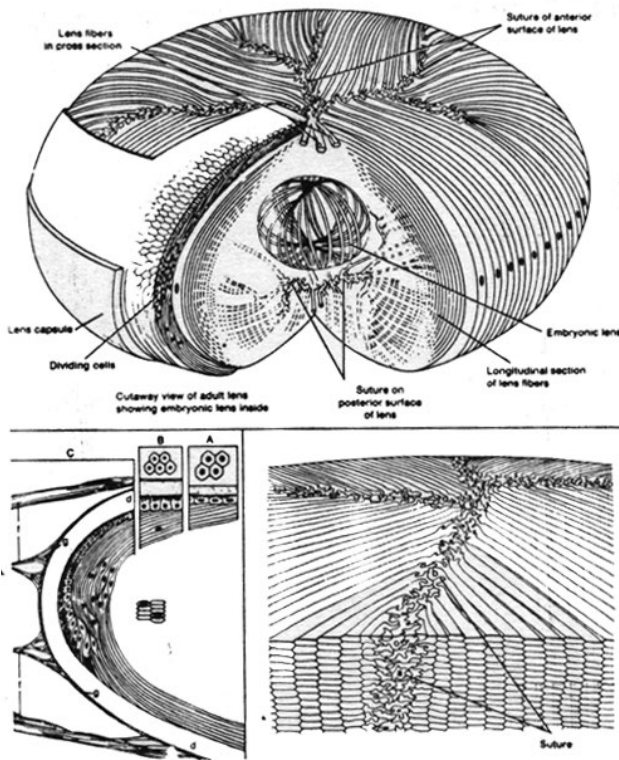


Рис. 3. Схема морфологического строения структур хрусталика [ААО, 1883]

то, что по экватору хрусталика, внутри его хрусталиковых масс, расположены эластические волокна (левая нижняя часть рисунка), помогающие округлить хрусталик при ослаблении натяжения волокон ресничного пояса.

Здесь же необходимо заметить, что хрусталик питается водянистой влагой из задней камеры с помощью хрусталикового эпителия, расположенного на его передней поверхности. Современное исследование путей и условий питания хрусталика, проведенное биофизиком Л.В. Степановой на многочисленных нативных хрусталиках разных животных и человеческого глаза, показало, что в хрусталике имеется один единственный путь прохождения водянистой влаги (ВВ) через его структуры [35]. ВВ попадает в хрусталик только и всегда через переднекапсульный эпителий, а после осуществления метаболизма отработанная ВВ удаляется из капсулы хрусталика в ретробульбарное пространство за счет диффузии через заднюю минилинзу толщиной 0,001 мм (рис. 4).

Если провести аналогию с фиброзной оболочкой глаза (ФОГ), имеющей функцию флуктуации, за счет которой ФОГ фактически обжимает и «выдавливает» наружу отработанную ВВ через биологические фильтры глаза с помощью процесса диффузии [32, 35], то следует признать, что хрусталик обладает также своеобразным «дыханием». В частности, при взгляде полностью вблизи, когда давление в хрусталике повышается, он лучше приспособлен для удаления отработанной внутрихрусталиковой ВВ в ретробульбарное пространство. При других фазах аккомодации внутрихрусталиковое давление становится меньше, и в эти моменты хрусталику, конечно, легче «принять» внутрь через эпителий свежую ВВ для поддержания метаболизма.

Если говорить просто, то в моменты работы на средних и дальних дистанциях эметропический глаз в норме «насыщает» внутрь хрусталика водянистую влагу, а в моменты работы на близких дистанциях удаляет отработанную ВВ наружу за счет диффузии че-

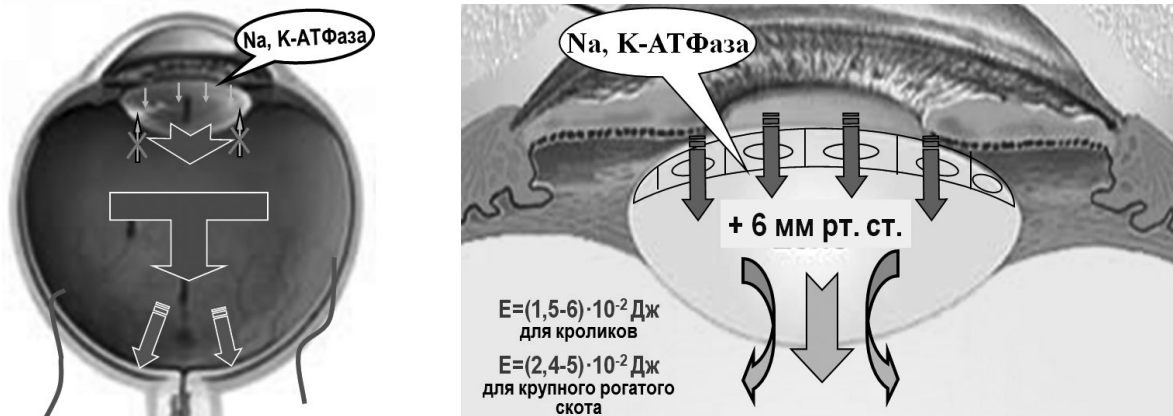


Рис. 4. Закономерность транспортных процессов водного обмена в нативном хрусталике и выход отработанной ВВ в ретробульбарное пространство и далее по клеточному каналу в стекловидную камеру

рез заднюю мини-линзу. Это мы называем «дыханием хрусталика».

Такие теоретические представления приводят к важным практическим выводам. В случае назначения для глаза с приобретенной миопией оптической недокоррекции ресничная мышца (PM) при взгляде вдаль и на средних дистанциях полностью или частично расслабляется, и количество производимой ее отростками водянистой влаги значительно снижается. Например, при взгляде вдаль количество ВВ, производимой отростками цилиарного тела, снижается в 3 раза по сравнению со взглядом вблизи (в PM приходит в 3 раза меньше крови) [2]. Это может существенно снизить количество ингредиентов, доставляемых для осуществления нормального внутривнутрихрусталикового метаболизма. Появляются весомые предпосылки для ускоренного развития катаракты у миопов при такой нерациональной оптической коррекции.

Наоборот, при слабой недокоррекции гиперметропии для зрения вдаль, остаточная гиперметропия на 0,12–0,25 дптр и при работе на средних дистанциях будет приводить к тонузу PM, близкому к среднему, когда производство ВВ в отростках цилиарного тела находится в норме. Это благоприятно для нормального питания хрусталика, поскольку дополнительно к этому давление внутри хрусталиковой сумки не будет максимальным, что облегчает «всасывание» через переднекапсульный эпителий свежей водянистой влаги. Физиологических условий для ускоренного развития катаракты нет. Поэтому такую рациональную переносимую бинокулярную коррекцию для обеспечения зрения вдаль целесообразно применять как у гиперметропов, так и у миопов.

Особенно важно в парных глазах с разной рефракцией выполнить рациональную оптическую коррекцию именно таким образом, чтобы оба глаза имели одинаковые значения остаточной слабой перекоррекции для обеспечения эффективной бинокулярной работы обоих глаз и профилактики экзофории. Но самое главное в искусстве рациональной коррекции – обеспечить возможность полной реализации всего функционального диапазона работы ресничной мышцы в норме, то есть обеспечить восстановление (проявление) всего физиологического объема аккомодации. И для надежной диагностики достижения этого ключевого физиологического состояния у офтальмологов уже есть прекрасный прибор – аккомодограф.

Именно так с точки зрения физиологии глаза корригируют миопию ортокератологические линзы ночного ношения, когда к утреннему эффекту наличия слабой гиперметропии добавляется продолжительный дневной эффект активации увеосклерального оттока, который обеспечивает полноценный метаболизм коллагеновых структур заднего полюса склеры и фактически останавливает развитие осевой приобретенной миопии за счет выключения исполнительного адаптационного механизма роста передне-задней оси глаза [8, 11–13, 15, 16, 20, 22, 23, 26–28, 31].

Теперь рассмотрим случай обеспечения комфортного зрения вблизи. И в этом случае нужно решать две задачи: обеспечить нормальное протекание метаболизма в хрусталике и в структурах средней и задней частей глаза для профилактики развития катаракты, миопии или дистрофических изменений в сетчатке при миопии высокой степени. Для этого необходимо направленно «выключить» обычный исполнительный механизм адаптационного подбора длины глаза под возросшую зрительную нагрузку [22, 23, 31].

Т. е. с помощью грамотной оптической коррекции необходимо вывести тонуз PM к состоянию, близкому к среднему, которое мы уже давно определяем как «предустановка аккомодации» [18, 19, 22, 26]. Физиологически это может достигаться слабой перекоррекцией для близи на 0,12–0,25 дптр как у гиперметропов, так и у миопов.

Но здесь стоит сделать особенно важное замечание. Количество интернет-пользователей в мире сегодня приблизилось к 3,5 млрд, что выводит проблему компьютерного зрительного синдрома (КЗС) и пандемии близорукости на принципиально новый уровень из-за необходимости постоянно пользоваться дисплеями. При длительных «дисплейных» зрительных нагрузках, достигающих у жителей мегаполисов от 5 до 12 часов в день, безусловно, будет возникать функциональная усталость PM, которая во многих развитых странах уже давно классифицируется как болезнь и приравнивается к страховому случаю. Речь идет о компьютерном зрительном синдроме. Для его профилактики пока есть только один эффективный способ: рациональная оптическая коррекция или профилактические очки для близи. Причем – специально подчеркиваем – даже для здоровых глаз.

Сегодня мы уже привыкли использовать дополнительную профилактическую оптическую коррекцию и/или желтые светофильтры для здоровых глаз часовщиков, рабочих на микросборке, врачей-хирургов, водителей-дальнобойщиков и т. п. В мире во многих фирмах и госструктурах сотрудники уже не стесняются работать с дисплеями в желтых светофильтрах, реально снижающих зрительные нагрузки. Это даже становится во многих структурах правилом распорядка, снижающим затраты на лечение и выплату страховых взносов по КЗС, а также увеличивающим производительность труда. Эти профилактические меры значительно уменьшают вероятность возникновения КЗС. Явно необходимо сделать следующий шаг и массово перейти к обычной и обязательной профилактической коррекции, учитывая скорость распространения «пандемии близорукости». И это достойная задача для оптометристов во всем мире.

Поэтому рациональная оптическая коррекция для продолжительной работы вблизи должна обязательно учитывать вероятную усталость PM к концу рабочего дня. Для «дисплейных фанатов» это можно сделать за счет применения сразу «нулевой коррекции» для бли-

зи на 0–0,12 дптр. Конечно, ее необходимо подбирать индивидуально, но такой подход, по нашим клиническим данным, эффективен для миопов [8, 9, 31] и, по видимому, может быть достаточно эффективным также для гиперметропов.

2. Оптика передней части глаза

Особенности оптики передней части глаза были подробно освещены в предыдущей статье [13]. Однако для более полного понимания проблемы, рассматриваемой в данной статье, необходимо «здесь и сейчас» еще раз пояснить следующее.

На входе в глаз находятся две плотно сопряженные линзы: выпукло-вогнутая слезная пленка с роговичным эпителием и выпукло-вогнутая роговица. По центру передней и задней поверхностей капсулы хрусталика имеются две собирающие мини-линзы: передняя мини-линза и задняя, изменяющие свою оптическую силу в зависимости от формы капсулы хрусталика, т. е. от тонуса ресничной мышцы. Мини-линзы обеспечивают максимальное преломление при взгляде полностью вблизи.

По центру задней поверхности капсулы хрусталика расположено ретролентальное пространство, ограниченное связкой Вигера и заполненное отработанной после метаболизма водянистой влагой, удаленной из хрусталика. Это пространство, по-видимому, дополнительно обеспечивает оптическую параллельность узкого пучка СЗК-полос для их попадания точно в *foveola*.

Мы привыкли считать, что входящие в глаз лучи света преломляются только роговицей. Однако это не так. Входящие лучи света сначала проходят через первую «жидкую» линзу – слезную пленку с эпителием, имеющим определенную толщину. И только потом через вторую линзу – роговицу. Между этими линзами воздушная прослойка отсутствует, и они фактически плотно контактируют, составляя своеобразную биологическую сборную оптическую систему: «слезная пленка + эпителий + роговица».

Такая конструкция оптики передней части глаза позволяет произвести своеобразное «оптическое сжатие», т. е. «собрать» в глазу широкую картину зрительного пространства в узкий «оптический тоннель», как в телескопе. Ведь перед попаданием этих лучей на хрусталик нужно еще обеспечить возможность их прохождения даже через узкий зрачок. Поскольку слезная пленка тесно контактирует с роговицей (без воздушной щели), а коэффициент преломления роговицы выше, чем у слезной пленки, на 0,04, то попадающие в роговицу лучи, уже отклоненные и сжатые слезной пленкой в достаточно узкий пучок, будут испытывать внутри роговицы дополнительное сжатие (рис. 5) [13].

Напомним, что толщина роговицы в центре почти вдвое меньше, чем на периферии, что характерно для рассеивающей линзы. Роговица граничит с водянистой влагой передней камеры, имеющей на 0,05 меньший коэффициент преломления. Поэтому выходящие из роговицы лучи уже будут слабо расходящимися (рис. 5).

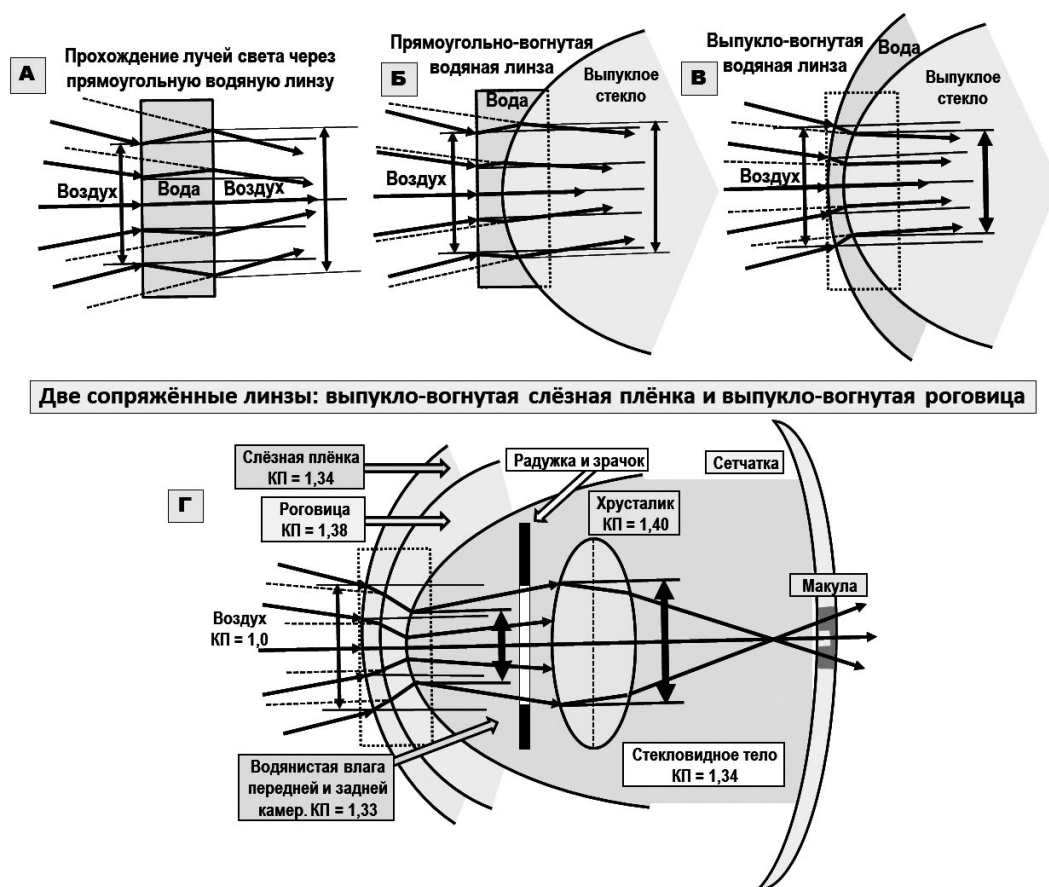
Поскольку роговица является слабо рассеивающей линзой, из рисунка 5 также видно, что при переходе из роговицы в водянистую влагу пришедшие снаружи цветные лучи в световом тоннеле будут претерпевать слабое рассеивание, а белые лучи света в этом световом тоннеле будут дополнительно подвержены еще и дисперсии. Такие свойства пограничной оптики глаза позволяют «прогнать» входящий широкой световой фронт даже через узкий зрачок и при необходимости эффективно задействовать оптическую часть периферии хрусталика (большая синяя стрелка). Т. е. внутри глаза всегда будут располагаться лучи всех цветов спектра. Это относится и к приходящим снаружи цветным лучам света, которые будут преломляться оптикой переднего отдела глаза, но уже не будут подвержены дисперсии.

Вывод. Сама по себе роговица граничит с менее плотной оптической средой – водянистой влагой – и работает как линза, обеспечивающая в глазу сначала дополнительное сжатие в «световой тоннель», а потом, на выходе из нее, – слабое рассеивание прошедших сквозь нее лучей света.

Поэтому белые лучи света будут подвержены дисперсии на задней поверхности роговицы и уйдут к передней поверхности хрусталика как слабо расходящиеся и расширяющиеся цветные полосы, включая и три базовые полосы: синие, зеленые и красные (СЗК-полосы), которые могут обнаружить колбочки макулы. Собственно, в этом и состоит особенность передней оптической части глаза, которая позволяет лучам света за счет своего строения пройти через узкий зрачок и выделить из него три базовые СЗК-полосы [12, 13].

Как подчеркивалось в более ранних наших публикациях, влияние толщины и топографии слезной пленки с эпителием роговицы на общую преломляющую способность глаза достаточно заметно. Ведь ортокератологические линзы ночного ношения в первую очередь изменяют пространственную геометрию, толщину и оптическую преломляющую силу достаточно вязкого эпителия, а значит, и оптическую силу связанной с ним менее вязкой слезной пленки за счет увеличения толщины эпителия по краям и снижения в центре. К концу дня эпителий и слезная пленка постепенно восстанавливают свою обычную топографию, т. е. восстанавливают способность более эффективно осуществлять сжатие приходящих в глаз лучей света в «световой тоннель».

При этом утром, после снятия ОК-линз, миопический глаз временно приобретает слабую гиперметропическую рефракцию, что и позволяет успешно тормозить или эффективно останавливать приобретенную миопию слабой и средней степени. Важно понимать, что ортокератология, не изменяя геометрию собственно роговицы, изменяет пространственную топографию и, соответственно, преломляющую способность эпителия роговицы и слезной пленки. Именно поэтому ортокератологию можно считать не только обратимым, но и щадящим воздействием.



Две сопряжённые линзы: выпукло-вогнутая слёзная плёнка и выпукло-вогнутая роговица

Рис. 5. Схема особенностей прохождения световых лучей в оптических системах разной конструкции и через пограничную оптическую систему глаза «слезная пленка + эпителий + роговица + водянистая влага» [13]. На схеме - случай Г. Входящие в глаз световые лучи имеют ширину фронта, обозначенную коричневой стрелкой. После их эффективного сжатия в цилиндрической «световой тоннель» пограничной оптической системой глаза, состоящей из «слезной пленки + эпителий + роговицы», диаметр этого сжатого пучка (малая синяя стрелка) существенно меньше, чем входящего пучка света (коричневая стрелка).

3. Обзор мнений офтальмологов о роговице как о возможно главной преломляющей структуре глаза

Теперь, после подробного рассмотрения особенностей оптики переднего отдела глаза, мы можем оценить фантастическую устойчивость среди части офтальмологов, оптометристов и даже оптиков мифа о роговице как о главной преломляющей структуре переднего отдела глаза.

Как мы уже выяснили, для любого, кто знаком с физической оптикой даже на уровне среднеобразовательной школы, вполне очевидно, что по своей форме роговица – рассеивающая линза, а не собирающая. Ведь это мениск, утолщающийся от центра к краям. Но почему-то по многим сайтам и справочным пособиям для офтальмологов кочует заблуждение о роговице как «сильной положительной линзе». Даже на официальном сайте одной из очень уважаемых нами офтальмологических российских клиник, к сожалению, опубликовано некорректное утверждение: «Роговица в оптическом смысле – это сильная собирающая линза».

Мы только что выяснили, что при рассмотрении оптической системы переднего отдела глаза речь должна

идти не о роговице как об изолированной линзе, а обо всей системе «слезная пленка – эпителий – роговица – влага передней камеры». Разумеется, оптическое действие роговицы необходимо рассматривать с учетом окружающих ее сред – эпителий и слезной пленки спереди и водянистой влаги сзади. Единственное упоминание об этой проблеме в отечественной научной литературе нам удалось найти лишь в небольшой монографии канд. техн. наук Р.М. Тамаровой «Оптические приборы для исследования глаза» (1982) [36].

Р.М. Тамарова пишет: «Роговица представляет собой оболочку почти равной толщины, лишь слегка утолщающуюся к периферии. Это означает, что изолированная роговица работает как слабая отрицательная (рассеивающая) линза, что на первый взгляд кажется несколько неожиданным».

Как показывает расчет, преломляющая сила изолированной роговицы усредненного глаза равна 5,48 дптр, а ее переднее и заднее фокусные расстояния $f=f'=-18,25$ мм. Эти цифры относятся только к изолированной роговице, окруженной с обеих сторон воздухом. В живом глазу роговица находится со-

всем в иных условиях. С воздухом граничит только ее передняя поверхность, задняя же соприкасается с водянистой влагой передней камеры, показатель преломления которой мало отличается от такового у роговицы. Вследствие этого падающие на глаз лучи, пройдя роговицу, отклоняющую их к оптической оси, при входе в водянистую влагу почти не изменяют своего направления.

В этих условиях роговица работает как сильная положительная (собирающая) линза, при этом её переднее и заднее фокусные расстояния различаются: $f = -17,055$ мм, а $f' = 22,785$ мм. Преломляющая сила роговицы как составляющей оптической системы глаза (D_r) равна 43,05 дптр [выделено нами]. То, что переднее фокусное расстояние отрицательно, а заднее положительно, указывает, что линза действует как положительная» [36, с. 6–7]. Далее автор иллюстрирует важность окружающей среды якобы наглядным примером изменения рефракции глаза при плавании под водой без очков.

Возникает впечатление, что автор испугалась неизбежного практического вывода о слегка расходящемся (или менее сходящемся!) пучке света на выходе из роговицы и попыталась оправдать широко распространенную противоположную точку зрения, превратив чудесным образом роговицу в собирающую линзу при помощи «святой воды» – водянистой влаги и наукообразных цифр.

При этом автор делает еще одну характерную ошибку: полностью игнорирует важнейшую роль слезной пленки с эпителием роговицы. Ведь роговица плотно граничит с ними спереди без воздушной прослойки. Тонкая слезная пленка вместе с эпителием – это первая линза оптической системы глаза. И этот положительный мениск мощно собирает лучи приходящего в глаз рассеянного света в пучок («оптический тоннель»).

Именно поэтому слезную пленку в зоне роговицы стоило бы называть «слезным мениском» в точном физическом (оптическом) смысле этого термина. Однако в мировой офтальмологии выражение «слезный мениск» (англ. tear meniscus) почему-то принято употреблять как синоним слезной призмы – скопления слезы возле нижнего века. Это яркий пример неудачного термина, ведущего к подмене понятий: грамотное оптическое понятие некорректно перенесли в сферу

физиологии слезной пленки, причем сам «слезный мениск» превратился из двояковогнутой линзы в призму у края века.

В зарубежных учебниках и справочниках для офтальмологов и оптометристов всегда указано, что роговица – рассеивающая линза и что на выходе из нее в переднюю камеру глаза собранный пучок лучей слегка рассеивается (при суммарной положительной силе всей оптической системы «слезная пленка – роговица – водянистая влага»). В популярнейшем американском учебном пособии Ричарда Снелла и Майкла Лемпа «Клиническая анатомия глаза» [40, с. 144] приведены правильные параметры роговицы (см. табл. 1).

Подробное объяснение этих данных приводится в статье М. Талу и соавторов (2011) (перевод наш): «Центральная диоптрическая сила роговицы (43 D) – результат суммирования диоптрийных сил трех оптических поверхностей (воздух – слезная пленка = +43,6 D, слезная пленка – роговица = +5,3 D, роговица – водянистая влага = -5,8 D). Роговица представляет собой типичный пример рассеивающего мениска в контакте с прозрачными средами, имеющими разные показатели преломления» [45, с. 252]. Еще раз подчеркнем: речь идет не о единой «сильной собирающей линзе», а о суммарной преломляющей силе трех разных оптических поверхностей, последняя из которых рассеивающая.

Иногда от некоторых офтальмологов и оптометристов можно услышать необоснованные утверждения, будто разница в рефракционном индексе роговицы и водянистой влаги пренебрежительно мала, а значит, эти среды работают фактически как «единая линза». Это легко опровергнуть вычислением преломляющей способности роговицы, которое приводится в американском справочном пособии «Введение в клиническую оптику для офтальмологического медицинского персонала: руководство по законам, формулам, расчетам и их применению в клинической практике» [44, с. 145]:

Коэффициент преломления роговицы $n_1 = 1,376$, коэффициент преломления водянистой влаги $n_2 = 1,336$. Оптическая сила преломляющей поверхности рассчитывается по формуле P (дптр) = $1000 \times (n_1 - n_2) : r$ [мм], где r – её радиус.

Тогда P (дптр) = $1000 \times (1,336 - 1,376) : 6,8 = -40 : 6,8 = -5,8$ дптр.

Таблица 1. Важнейшие параметры роговицы [40]

Толщина, нм На периферии – 700 В центре – 540	Радиус кривизны, мм Передняя – 7,7 Задняя – 6,9
Рефракционный индекс Воздух – 1,00 Слеза – 1,336 Роговица – 1,376 Водянистая влага – 1,336	Центральный радиус кривизны и преломляющая сила Воздух – слеза 7,7 мм = +43,6 D Слеза – роговица 7,7 мм = +5,3 D Роговица – водянистая влага 6,9 мм = -5,8 D Суммарная преломляющая сила в центре = 43,1 D

Автор этого пособия – Аарон Шукла, адъюнкт-профессор и руководитель программы по офтальмологической технике Университета св. Кэтерины (США, г. Сент-Пол), подчеркивает, что основной вклад в положительную оптическую силу вносит граница между воздухом и слезой, а без слезной пленки сухая роговица дает размытое изображение. Именно поэтому пациенты с синдромом сухого глаза часто жалуются на нечеткое зрение: «Когда поверхность [слезной пленки] нарушена, теряется значительная часть положительной силы (+43 D), что ведет к размытому зрению из-за индуцированной гиперопии. Моргание или инстилляционная свободно продающихся препаратов искусственной слезы восстанавливает криволинейную поверхность с ее мощной рефракцией» [44, с. 145–146; выделено нами].

Три промежуточных вывода:

1. Первой «сильной собирающей линзой» с оптической силой плюс 43,6 дптр является граничащий с воздухом составной оптический слезный слой на поверхности роговицы, состоящий из собственно слезы и прозрачного роговичного эпителия.

2. Из-за отсутствия воздушной прослойки между первой собирающей линзой и передней поверхностью роговицы лучи проходящего света, сжатые первой собирающей линзой в пучок, претерпевают дополнительное сжатие на передней границе роговицы от второй составной биологической линзы (слезная пленка

+ эпителий + роговица) с оптической силой плюс 5,3 дптр до уровня «светового тоннеля» цилиндрической формы диаметром 1,8-2,5 мм.

3. На границе перехода от задней поверхности роговицы к водянистой влаге передней камеры (это третья биологическая линза переднего оптического отрезка глаза) белый свет подвергается дисперсии и преломляется. Приходящие из окружающего пространства цветные лучи здесь также преломляются, но уже не подвергаются дисперсии. При этом сама роговица, как ей и положено по геометрической форме, работает как слабая рассеивающая линза с оптической силой минус 5,8 дптр, контактирующая с более слабой оптической средой – водянистой влагой с меньшим на 0,04 коэффициентом преломления. На Западе это даже не предмет дискуссии, а хрестоматийные факты из академических учебников.

4. Оптические структуры хрусталика

Еще из курса школьной оптики мы знаем, что хрусталик представляет собой цельную собирающую линзу без других дополнительных преломляющих поверхностей в его капсуле. Однако это далеко не полное представление.

На рисунке 6 представлена конфигурация особенно важных оптических структур хрусталика – передней и задней мини-линз в крайних фазах аккомодации. Отметим, что их преломляющая сила (степень округлости) зависит от давления в хрусталике, которое, в свою оче-

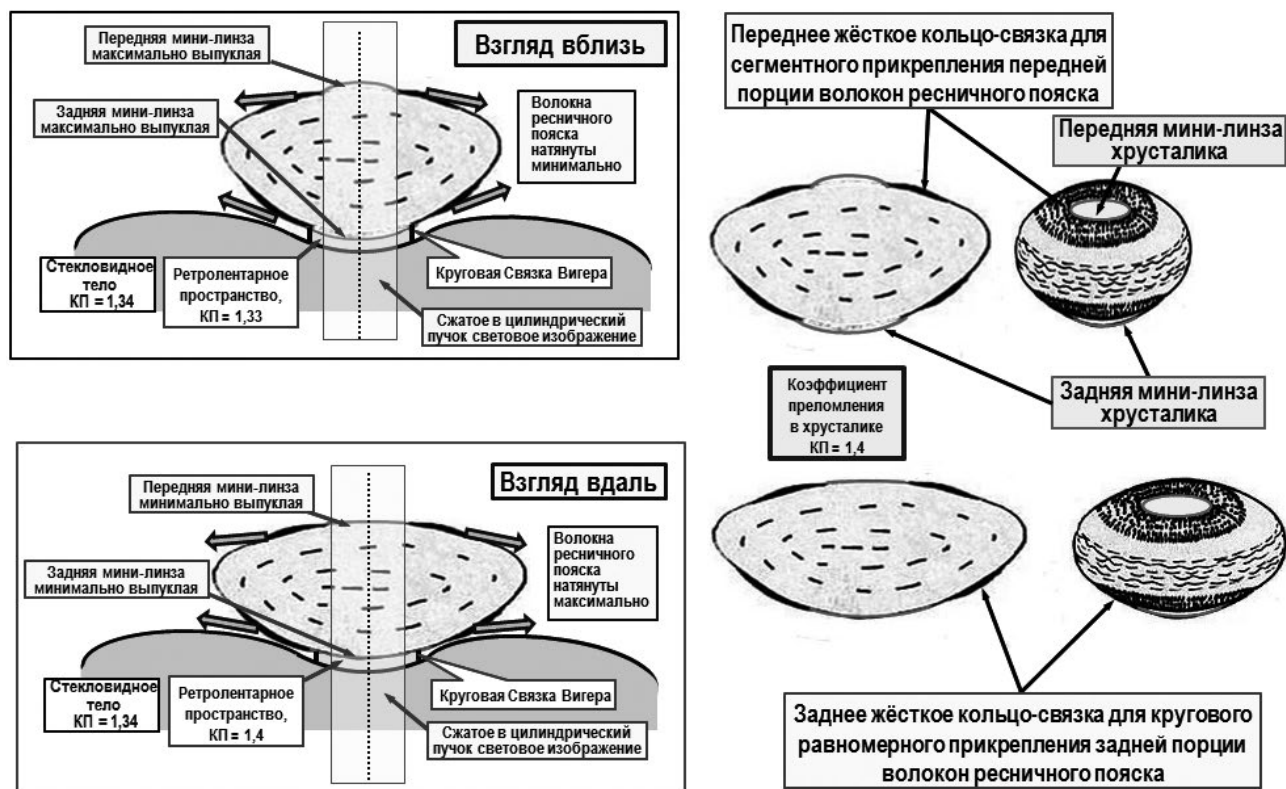


Рис. 6. Наибольшее округление передней и задней мини-линзы в момент аккомодации вблизи и наименьшее – вдаль (схема)

редь, зависит от тонуса РМ, адекватного зрительной нагрузке. При взгляде вблизи давление в хрусталике и преломляющая способность мини-линз максимальны, а при взгляде вдаль минимальны. Это связано с тем, что при взгляде вблизи капсула хрусталика наименее растянута ресничным пояском и поэтому наиболее мощно обжимает внутрехрусталиковые структуры.

Наличие в капсуле хрусталика передней мини-линзы толщиной 0,05 мм и задней мини-линзы толщиной 0,001 мм не подвергается сомнению. Хорошо известно заблуждение этих структур хрусталика в виде развития лентиконуса (рис. 7) [46, 47].

Но для чего же присутствуют в хрусталике эти мини-линзы с регулируемой преломляющей способностью? Мы уже выяснили здесь и ранее, что оптическая система глаза устроена таким образом, что приходящий в глаз пространственный световой поток сжимается в цилиндрическую трубку – «оптический тоннель» диаметром 1,8–2,5 мм, который схематично представлен на рисунке 6 в виде цилиндрической трубки со сжатым в пучок световым изображением. И это сжатое оптическое изображение необходимо точно доставить в плоскость макулы для его последующего анализа.

На рисунке 8 (см. 3 страницу обложки) этот путь представлен в виде схемы прохождения через узкий зрачок при взгляде вблизи сжатого в цилиндрический «световой тоннель» потока света, приходящего снаружи глаза от хорошо освещенного окружающего пространства.

Этот сжатый световой поток проходит, как по тоннелю, через переднюю и заднюю мини-линзы хрусталика и преломляется в них таким образом, чтобы макула могла воспринять это изображение в виде трех базовых СЗК-полос [12, 13]. Обратим внимание также на область клеточного канала, в который выходит из ретролентального пространства отработанная хрусталиковая ВВ с продуктами метаболизма внутренних структур хрусталика.

На рис. 9 (см. 3 страницу обложки) представлена схема работы оптической системы глаза вблизи при широком зрачке, т. е. при слабой освещенности. Мы специально «собрали» на схеме фокусы проходящих через хрусталик лучей каждого цвета в одну точку, как принято в школьных учебниках. Но это упрощенное представление явно ошибочно. Ведь толщина капсулы хрусталика везде разная, и, значит, степень торможения каждого из СЗК-фронтон будет максимальна в центре и минимальна на периферии хрусталика.

То есть, фронты красных и зеленых лучей будут «убегать» как друг от друга, так и от синего фронта в центральной части хрусталика больше, чем на периферии. Возникнет дополнительная осевая, но уже хрусталиковая аберрация. И производители ИОЛ могут и должны убирать эту негативную составляющую аберрации за счет оптимизации конструкции контактных линз и ИОЛ с помощью плавного уменьшения их оптической плотности от периферии к центру. Фактически это могут быть ИОЛ нового поколения.

На рисунке 9 мы имеем максимально широкий зрачок – 8,0 мм. Видно, что периферические лучи света уже не попадают в макулу. Глаз способен обнаруживать только достаточно близкие объекты со сравнительно большей освещенностью, которые расположены по центру оптической оси. Такое «туннельное зрение» позволяет различать только ближайшие объекты. Это состояние в оптометрической практике называется «ночной миопией».

При этом хрусталик осаживается кзади, уплощен и плотно прижат к стекловидной камере (СК). Объем хрусталиковых масс постоянен, капсула хрусталика максимально растянута. Внутри хрусталика давление минимальное. Его передняя и задняя мини-линзы имеют минимальный радиус кривизны. При взгляде вдаль натяжение волокон ресничного пояса максимальное. Т.е. при взгляде вдаль задняя порция волокон сильнее сдавливает СК, давление в которой в этой фазе аккомодации максимально [19].

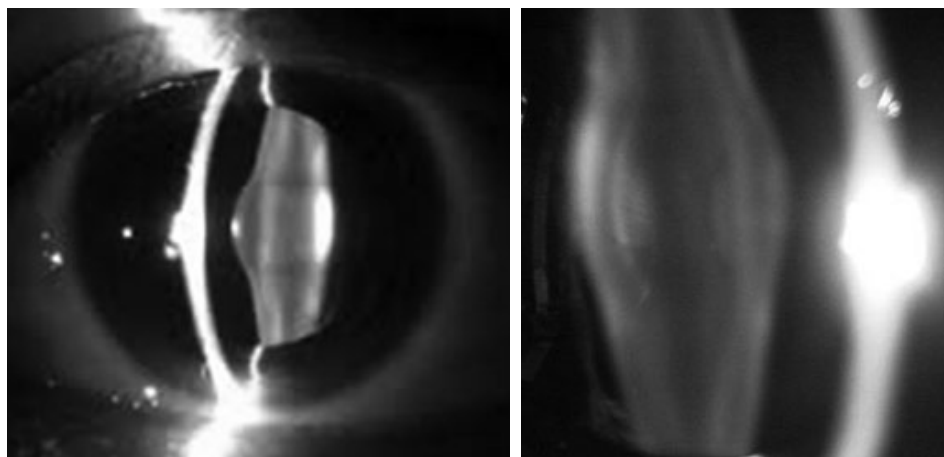


Рис. 7. Лентиконус [44, 47]

Еще одна из ярких особенностей этого случая заключается в том, что СЗК-лучи, проходящие через периферию капсулы хрусталика, могут вообще не попасть в макулу и не смогут усилить электризацию ее колбочек. Кроме того, за счет разной толщины хрусталиковых масс в центре и на периферии хрусталика взаимное отставание СЗК-волновых фронтов будет разным, что увеличит мощность продольной осевой аберрации. В этих условиях организовать эффективную наводку на резкость всей оптической системы глаза будет достаточно трудно.

На рисунке 10 (см. 3 страницу обложки) представлена схема работы глаза вдаль при широком зрачке. Желтыми кружками схематично отмечены фокусы волновых фронтов, приходящих от периферических областей хрусталика. Чтобы убрать эти дополнительные фоновые аберрации, необходимо удалить этот неблагоприятный фон от периферии хрусталика. Вот почему стали так популярны желтые светофильтры: они снижают интенсивность хрусталиковой и общей аберрации, «отсекая разброс» периферических лучей. При этом глубина резкости, безусловно, возрастает, что придает большую комфортность при продолжительной зрительной работе.

Вывод. Взгляд вдаль создает минимальную хрусталиковую аберрацию по сравнению со взглядом вблизи.

Для практикующего оптометриста это понимание особенно важно, поскольку для обеспечения более качественного зрения целесообразно назначать такую рациональную оптическую коррекцию, которая будет по возможности уплощать хрусталик. А это возможно только при слабой недокоррекции. О физиологической несостоятельности постоянной сильной недокоррекции как способа торможения адаптационной приобретенной миопии мы ранее говорили в статьях, пособиях и монографиях [8, 9, 11, 15, 16, 19, 22, 23, 26, 31]. Но здесь практически важно то, что при подборе оптической коррекции «ошибаться» в сторону слабой недокоррекции лучше, чем в сторону сильной перекоррекции. И это в полной мере относится и к планированию рефракционных операций на роговице. На практике это означает, что рациональная оптическая перекоррекция при работе на различных зрительных дистанциях должна быть минимальной: сегодня при стандартном наборе пробных стекол не должна превышать 0,12–0,25 дптр, а с появлением более чувствительных способов определения изменений в зрительном восприятии, возможно, и меньше: 0,05–0,07 дптр.

Заметим, что на принципе измерения уровня хрусталиковой оптической аберрации вблизи/вдаль могут быть построены высокочувствительные оптометрические тестовые приборы нового поколения для определения остроты зрения и эффективного подбора оптической коррекции. Разумеется, эффективность подбора рациональной оптической коррекции должна контролироваться на аккомодографе, позволяющем объективно подтвердить достижение такого состоя-

ния, когда задействован весь индивидуальный физиологический объем аккомодации.

Особо обращаем внимание практикующих оптометристов на то, что комфортная зрительная работа также предполагает, что «дисплейным фанатам» и пациентам с ослабленным зрением необходимо всегда использовать при зрительной работе максимально переносимый уровень фоновой освещенности около дисплея для уменьшения диаметра зрачка, снижения уровня аберраций и увеличения глубины резкости. Эти простые рекомендации должны стать обязательными в практической работе любого оптометриста для профилактики зрительного утомления и/или адаптационной миопии.

Такие «световые» рекомендации будут также полезны как глаукомным больным, так и при других глазных патологиях. При этом важно использовать только те видео-безопасные источники освещения, имеющие спектр излучения, близкий к солнечному (на который, собственно, и настроены колбочки и палочки сетчатки).

Но особенно осторожно следует относиться к применению современных энергосберегающих светодиодных источников света с опасной повышенной дозой синего в спектре, заполонивших сегодня мировой рынок и приводящих к высокому «световому загрязнению» в мегаполисах и даже в районных центрах [1, 13]. Появление сегодня на Земле «заповедников света», где запрещено применять сильное искусственное освещение и где можно увидеть во всей красе звездное небо, говорит о безусловной необходимости ускоренной разработки регламента зрительной работы, которого нигде в мире пока нет.

Вполне возможно, что оптическая система двух мини-линз – это главный механизм хрусталиковой аккомодации, который делает мини-линзы более выпуклыми при взгляде вблизи и более плоскими при взгляде вдаль. Исполнительным механизмом «тоннельной» аккомодации является изменяющееся давление внутри хрусталика, которое максимально при взгляде вблизи, когда эластичная капсула хрусталика мало растянута и способна наиболее сильно обжимать хрусталиковые массы.

Все вышесказанное, по-видимому, может быть важным для теории и практики оптометрии. Учитывая полученные нами клинические результаты с длительными сроками наблюдений, подтверждающие наши теоретические представления, мы предлагаем для практикующих оптометристов рассмотреть следующие примеры использования рациональной оптической коррекции адаптационной миопии при имеющемся наборе пробных стекол с шагом 0,25 дптр. Если есть пробные стекла с шагом 0,12 дптр, заменяем коррекцию 0,25 дптр на это значение. К сожалению, пока массовое изготовление очковых линз с градацией 0,12 дптр зачастую затруднено.

5. Примеры коррекции адаптационной миопии

Задача индивидуальной оптической коррекции состоит в следующем физиологическом воздействии: установка мышечного равновесия, активация увеосклерального пути оттока при работе вдаль / вблизи и нивелирование последствий возможной физиологической усталости ресничной мышцы при продолжительной напряженной работе от 6 до 12 часов в день.

Пример 1

Миопия минус 5,0 дптр.

Используем слабую перекоррекцию вдаль и вблизи на 0,25 дптр. в очках для постоянного ношения. В случае профессиональных требований пациента обеспечить возможность постоянной напряженной работы вблизи от 6 до 12 часов в день используем со второй половины дня дополнительные профилактические очки с нулевой или слабой недокоррекцией, учитывающие возможную физиологическую усталость ресничной мышцы.

Рекомендуемая в этом случае рациональная коррекция для всех пациентов: постоянная слабая перекоррекция для дали и близи минус 5,25 дптр.

Для пациентов с постоянной напряженной работой вблизи от 6 до 12 часов в день – дополнительные профилактические очки с нулевой или слабой недокоррекцией для ношения со второй половины дня: минус 4,75–5,0 дптр.

Nota bene! Именно таким образом осуществляется днем физиологическое воздействие ОК-линз ночного ношения. По мировой статистике, ОК-линзы дают минимальный уровень прогрессирования приобретенной миопии даже у людей, которые длительно работают вблизи во время работы и после нее.

Пример 2

Миопия минус 5,0 дптр с эзофорией 4 (до 5) пр. дптр.

Дополнительная приоритетная физиологическая задача – нивелировать и затормозить развитие эзофории.

Используем слабую перекоррекцию на 0,25 дптр. Рекомендуемая в этом случае рациональная коррекция: минус 5,25 дптр постоянно для дали и близи.

Пример 3

Миопия минус 5,0 дптр с эзофорией 3 (до 5) пр. дптр.

Дополнительная приоритетная физиологическая задача – нивелировать и затормозить развитие эзофории.

Рекомендуемая рациональная коррекция – прогрессивные очки: в зоне для дали минус 5,0 дптр с аддидацией в зоне для близи 1,5–2,0 дптр.

Выводы

1. Оптическая передняя область глаза представляет собой составную биологическую линзу из трех локальных линз, в которую входят следующие преломляющие структуры: слезная пленка с роговичным эпителием, собственно роговица и водянистая влага.

2. Основная задача передней оптики глаза – эффективно сжать в «световой тоннель» диаметром 1,8–2,5 мм проходящий в глаз снаружи световой поток, чтобы пропустить его даже через узкий зрачок. Это своеобразный природный телескоп.

3. При переходе из ткани роговицы в водянистую влагу передней камеры, имеющую меньший, чем роговица, коэффициент преломления, проходящие лучи белого цвета подвергаются дисперсии – разложению в спектр. Из этого спектра могут быть выделены три базовые полосы синего, зеленого и красного цвета (СЗК-полосы), которые могут быть обнаружены колбочками макулы.

4. Сама роговица является слабо рассеивающей линзой. Поэтому лучи света, разложенные в спектр на границе с водянистой влагой передней камеры, претерпевают слабое отклонение наружу на задней поверхности роговицы. Это позволяет им частично попасть даже на периферию хрусталика при узком зрачке. Проходящие в глаз извне цветные лучи света подвергаются только преломлению, но не дисперсии.

5. По центру оптической оси в капсуле хрусталика имеются две собирающие мини-линзы – передняя и задняя, которые изменяют свою кривизну (преломляющую силу) в разных фазах аккомодации из-за изменения давления в хрусталике при разном тоне ресничной мышцы.

6. При широком зрачке дополнительные хрусталиковые аберрации максимальны, а при узком – минимальны. Светофильтры позволяют частично отсеять хрусталиковую аберрацию, увеличить глубину резкости и сделать зрительную нагрузку более комфортной.

7. Профилактика миопии, катаракты, глаукомы и других глазных патологий заключается в поддержании процессов метаболизма во всех структурах глаза за счет выбора рациональной оптической коррекции, обеспечивающей близкий к среднему тону ресничной мышцы, достаточный уровень продукции водянистой влаги и увеосклерального оттока.

8. Эффективными дополнительными средствами профилактики компьютерного зрительного синдрома и адаптационной миопии в здоровых глазах являются переносимая повышенная освещенность искусственными источниками света со спектром, близким к солнечному, и/или светофильтры, позволяющие повысить комфортность выполнения зрительной работы за счет увеличения глубины резкости.

Литература

1. Дейнего В. Н., Капцов В. А., Балашевич Л. И. и др. Профилактика глазных заболеваний у детей и подростков в учебных помещениях со светодиодными источниками света первого поколения // Росс. детская офтальмол. – 2016. – № 2. – С. 57–72.
2. Аветисов Э. С. Близорукость. – М., 1999.
3. Аветисов Э. С., Ковалевский Е. И., Хватова А. В. Руководство по детской офтальмологии. – М., 1987.
4. Аветисов Э. С., Розенблюм Ю. З. Вопросы офтальмологии в кибернетическом освещении. – М., 1973.
5. Аветисов Э. С., Розенблюм Ю. З. Какой должна быть оптическая коррекция близорукости? (К итогам дискуссии) // Офтальмол. журн. – 1974. – № 3. – С. 72–78.
6. Галкин Н. Н. Пособие по подбору очков. – Л., 1980.
7. Горбань А. И., Джалишвили О. А. Микрохирургия глаза. Ошибки и осложнения. – СПб., 1993.
8. Гусева М. Г., Светлова О. В., Кошиц И. Н. О выборе физиологически обоснованной рациональной коррекции для стабилизации приобретенной миопии у детей // Глаз. – 2012. – № 1. – С. 12–17.
9. Гусева М. Г., Светлова О. В., Кошиц И. Н. Стабилизация приобретенной миопии с помощью контактных линз в свете метаболической теории миопии // Офтальмол. журн. – 2011. – № 6. – С. 29–37.
10. Кошиц И. Н., Макаров Ф. Н., Светлова О. В., Котляр К. Е. Биомеханические и морфологические особенности крепления и функционирования волокон ресничного пояска хрусталика – ключевого звена в исполнительном механизме систем аккомодации и оттока водянистой влаги // Биомеханика глаза – 2005: Сб. тр. науч. конф. – М., 2005. – С. 3–20.
11. Кошиц И. Н., Макаров Ф. Н., Светлова О. В. и др. Биомеханические особенности регуляции ресничной мышцей аккомодации и оттока водянистой влаги при направленных рефракционных или фармакологических вмешательствах // Биомеханика глаза – 2005: Сб. тр. науч. конф. – М., 2005. – С. 20–44.
12. Кошиц И. Н., Светлова О. В. Адаптационная миопия. Часть 2. Новые представления о физиологических механизмах наведения глаза на резкость // Офтальмолог. журн. – 2017. – № 1. – С. 38–50.
13. Кошиц И. Н., Светлова О. В. Адаптационная миопия. Часть 3. Новые механизмы наведения глаза на резкость и их взаимодействие с механизмами развития приобретенной миопии. – Офтальмолог. журн. – 2017. – № 2. – С. 36–57.
14. Кошиц И. Н., Светлова О. В. Глоссарий – функционарий: механизмы аккомодации. «РЕФРАКЦИЯ-2008»: Сб. тез. и докл. юбил. офтальмол. конф., посв. 45-летию Самарской клинич. больницы им. Т. И. Ерошевского и 15-летия центра коррекции зрения «Октопус». – Самара, 2008. – С. 54–62.
15. Кошиц И. Н., Светлова О. В. Механизм формирования адекватной длины глаза в норме и метаболическая теория патогенеза приобретенной миопии // Офтальмол. журн. – 2011. – № 5. – С. 4–23.
16. Кошиц И. Н., Светлова О. В. Онтогенез формирования необходимой длины глаза в детстве и метаболическая теория патогенеза миопии // Глаз. – 2007. – № 6. – С. 16–31.
17. Кошиц И. Н., Светлова О. В. Развитие теории аккомодации Гельмгольца по результатам исследований исполнительных механизмов аккомодации // Вестник РАМН. – 2003. – № 2. – С. 3–12.
18. Кошиц И. Н., Светлова О. В. Современные представления о теории аккомодации Гельмгольца: Учебное пособие. – СПб., 2002.
19. Кошиц И. Н., Светлова О. В., Горбань А. И. Функционирование исполнительных механизмов аккомодации и развитие теории аккомодации Гельмгольца. Нормальная физиология глаза: монография /2-е изд., испр. и доп. – СПб., 2016.
20. Кошиц И. Н., Светлова О. В., Гусева М. Г., Макаров Ф. Н. Приоритетные направления борьбы с приобретенной миопией: теория и практика. – Глаз. – 2011. – № 6. – С. 12–17.
21. Кошиц И. Н., Светлова О. В., Гусева М. Г. и др. Адаптационная миопия. Часть 1. Исполнительные механизмы роста оптической оси глаза в теории изменения ретинального дефокуса. – Офтальмолог. журн. – 2016. – № 6. – С. 45–58.
22. Кошиц И. Н., Светлова О. В., Макаров Ф. Н. Приобретенная миопия как классический случай преобладания аккомодации над оттоком // Близорукость, нарушения рефракции, аккомодации и глазодвигательного аппарата: Сб. тр. межд. симп. – М., 2007. – С. 234–236.
23. Кошиц И. Н., Светлова О. В., Макаров Ф. Н., Гусева М. Г. Рациональная коррекция – эффективный способ стабилизации приобретенной миопии. Тез. докл. IX Всеросс. научно-практич. конф. с междунар. участ. «Федоровские чтения». – М., 2011. – С. 104–106.
24. Кошиц И. Н., Светлова О. В., Макаров Ф. Н., Шилкин Г. А. Классификация исполнительных механизмов «предметной» аккомодации у человека // Росс. детская офтальмол. – 2012. – № 4. – С. 28–36.
25. Лагасе Ж. П. Теория изменения ретинального дефокуса и прогрессирование миопии // Вестник оптометрии. – 2011. – № 1. – С. 48–57.
26. Светлова О. В. Функциональные особенности взаимодействия склеры, аккомодационной и дренажной систем глаза при глаукомной и миопической патологии: автореф. дис. ... д-ра мед. наук. – М., 2010.
27. Светлова О. В., Кошиц И. Н. Биомеханические аспекты возможных общих причин наследственной и приобретенной миопии. – Близорукость, нарушение рефракции, аккомодации и глазодвигательного аппарата: Тр. межд. симп. – М., 2001. – С. 77–78.
28. Светлова О. В., Кошиц И. Н. Взаимодействие основных путей оттока внутриглазной жидкости с механизмом аккомодации: учебное пособие. – СПб., 2002.
29. Светлова О. В., Кошиц И. Н. Классификация и взаимодействие механизмов аккомодации глаза человека // Биомеханика глаза – 2002: сб. науч. тр. III сем. – М., 2002. – С. 117–119.
30. Светлова О. В., Кошиц И. Н. Современные представления о теории аккомодации Гельмгольца: Учебное пособие. – СПб.: СПбМАПО, 2002.
31. Светлова О. В., Кошиц И. Н., Гусева М. Г. Физиологические принципы рациональной оптической коррекции. Практические рекомендации. Нормальная физиология глаза: Учебное пособие. – СПб., 2015.
32. Светлова О. В., Кошиц И. Н. Физиологические функции фиброзной оболочки глаза и их исполнительные механизмы. Нормальная и патологическая физиология глаза: Учебное пособие. – СПб., 2014.

33. Светлова О. В., Макаров Ф. Н., Засеева М. В., Кошиц И. Н. Морфологические и функциональные особенности строения ресничного пояса хрусталика как ключевого исполнительного звена в механизме аккомодации глаза человека // Морфология. – 2003. – № 1. – С. 3–16.
34. Сердюченко В. И., Вязовский И. А. Исследование аккомодации в различных меридианах глаза и модифицированная методика лечения ее нарушений при гиперметропической амблиопии // Биомеханика глаза – 2004: Сб. тр. науч. конф. – М., 2004. – С. 33–37.
35. Степанова Л. В. Транспортные функции эпителия хрусталика (биофизические аспекты): автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Красноярск, 2005.
36. Тамарова Р. М. Оптические приборы для исследования глаза. – М., 1982.
37. Brien A. Holden и соавт., 2016; American Academy of Ophthalmology; www.aaojournal.org
38. Kotliar K. E., Svetlova O. V., Skoblikov A. S., Smolnikov B. A. Biomechanical modeling of the accommodative system based on some contemporary conceptions of lens supporting apparatus functioning // Vision Science and Its Applications. – Vol. 199. – С. 156–164.
39. Koshitz I. N., Svetlova O. V. Contemporary conceptions of the Helmholtz's accommodation theory // Ophthalmic Research. – 2003. – Vol. 35. – S.1. – С. 148.
40. Snell R. S., Lemp M. A. Clinical anatomy of the eye. – 2nd ed. – Blackwell Publish, 1998. – 2013.
41. Svetlova O. V., Koshitz I. N. Evolution, classification and execution of the primary and secondary accommodation mechanisms in human eye // Ophthalmic Research. – 2003. – S. 1. – № 35. – С. 44.
42. Svetlova O. V., Koshitz I. N., Krylova I. S., Kotliar K. E., Smolnikov B. A. Further elaboration of the Helmholtz conception of the accommodation on the base of biomechanical analysis of the contemporary clinical observation // Acta of Bioengineering and Biomechanics (Wroclaw). – 2002. – Vol. 4. – S. 1. – С. 719.
43. Svetlova O., Koshits I., Kotliar K., Smolnikov B., Makarov F. Classification and physiological principles of accommodation mechanisms in the human eye // Abstracts of 29th Conference on Visual Perception. – St. Petersburg, 2006. – С. 5.
44. Shukla A. V. Clinical optics primer for ophthalmic medical personnel: A Guide to laws, formulae, calculations, and clinical applications. – SLACK Incorporated, 2009.
45. Talu M., Talu S., Talu S.D., Shah R. On approximation of human corneal surface with superellipsoids // International Conference on Advancements of Medicine and Health Care through Technology. – IFMBE Proceedings. – 2011. – Vol. 36. – С. 252–255.
46. URL: <http://mosglaz.ru/blog/item/1416-lentikonus-i-lentiglobus>.
47. URL: <https://www.atlasophthalmology.net/atlas/photo.jsf>.

Поступила 04.05.2017

Оптичні особливості проходження світла через зломлючі структури ока

І. М. Кошиць, О. В. Светлова, М. Г. Гусєва, Д. В. Певко, М. Б. Егембердієв

Г«Питерком – Сети / МС»; ФГБОУ ВО «Північно-Західний державний медичний університет ім. І. І. Мечникова»;
Діагностичний центр ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»; Санкт-Петербург; Журнал «Глаз», Москва;
Чуйська обласна об'єднана лікарня; Бішкек (Киргизія)

Розглянуто особливості заломлення світла в передньому відділі ока та після дисперсії на задній поверхні рогівки. Зроблено висновок, що оптична система ока являє собою своєрідний природний телескоп. Основною задачею переднього відділу ока є оптичне стиснення світлового опромінення, що приходить з навколишнього простору, в пучок (тунель) світла діаметром 1,8-2,5 мм, який зможе пройти к фовета навіть через вузьку зіницю.

Задачею кристалика є ефективно оптичне управління в «світловому тунелі» трьома базовими дисперсійними полосами синього, зеленого та червоного кольорів (СЗК -полосами). Це оптичне управління здійснюється за допомогою двох мінілінз, що розташовані по центру передньої та задньої поверхні кристаликової капсули. Можливо, головний меха-

нізм кристаликової акомодатії - зміна кривизни цих мінілінз при погляді поблизу та удалу.

Виконавчим механізмом «тунельної» акомодатії є тиск у середині кристалика - максимальний при погляді поблизу, коли еластична капсула його мало розтягнута і здатна максимально стискувати кристаликові маси.

З урахуванням фізіологічних особливостей шляхів доставки та видалення водянистої вологи, необхідної для підтримки метаболізму внутрішніх структур кристалика, зроблено практичний висновок про можливу швидкість розвитку катаракти у гіперметропів та міопів в умовах неправильно підібраної оптичної корекції. Наведені рекомендації по раціональній оптичній корекції.

Ключові слова: *оптика ока, світловий тунель, акомодатія, міні р лінзи кристалика, катаракта*