

УДК 617.753:617.755.1–092

Адаптационная миопия.**Часть 2. Новые представления о физиологических механизмах наведения глаза на резкость**И. Н. Кошиц¹, генеральный директор ЗАО «Питерком — Сети/МС», О. В. Светлова², д-р мед. наук, профессор¹ ЗАО «Питерком — Сети / МС»;² ФГБОУ ВО «Северо-Западный университет им. И. И. Мечникова» (Санкт-Петербург)

Ключевые слова. Адаптация, приобретенная миопия, метаболическая теория, ранняя рациональная коррекция, острота зрения, видеоэкология, регламент зрительной работы, полосы возбуждения в макуле, механизмы управления аккомодацией, длины глаза и наведения на резкость.

Подробный анализ гипотез и исполнительных механизмов удлинения оптической оси глаза в теории изменения ретинального дефокуса (ТИРД) был нами с соавт. изложен в предыдущем номере журнала [15]. Несмотря на то, что создание ТИРД в историческом плане было шагом вперёд, наш анализ выявил неполную обоснованность гипотез ТИРД в части предложенных исполнительных механизмов и показал отсутствие в ТИРД чётких физиологических критериев адекватного выбора оптической коррекции для эффективной борьбы с мировой пандемией близорукости [37]. В ТИРД, кроме того, осталось неясным, какова физиологическая сущность традиционного понятия «фокус изображения» и как с ним связаны площадь засвет-

Резюме. Рассмотрена морфофизиология макулярной зоны глаза и проведён адекватный законам оптики анализ приходящего в *foveola* входного оптического сигнала от лучей белого света, подверженных дисперсии (разложению в спектр) на внутренней поверхности роговицы: это не круги светорассеивания, а полосы возбуждения красных и зелёных колбочек в *foveola*, а также синих колбочек на её круговой периферии.

Подробно рассмотрена гипотеза авторов о наличии в *fovea* функционального механизма «сравнения расположения и интенсивности полей возбуждения красных, зелёных и синих колбочек». Такая организация входного оптического сигнала позволяет мозгу создать ответный сигнал управления тонусом ресничной мышцы для установки требуемой преломляющей способности хрусталика. Исполнительный механизм наведения глаза на резкость связан с функционированием в *fovea* оптического кольца-прицела, состоящего из синих колбочек в максимально возможной концентрации. Выявлены функциональные особенности взаимодействия колец-прицелов при бинокулярной работе обоих глаз.

Эта гипотеза, возможно, уже помогла обнаружить физиологические механизмы наведения глаза на резкость и, по-видимому, позволит в будущем разработать критерии видео-безопасности и регламент зрительной работы для борьбы с пандемией близорукости. Работа найденных исполнительных механизмов наведения глаза на резкость рассматривается авторами применительно к предложенным ими ранее гипотезам о метаболической теории адаптационной миопии (2001). До тех пор, пока отсутствует регламент зрительной работы, на первое место в борьбе с пандемией близорукости, безусловно, выходят проблемы видеоэкологии и тотальная профилактика приобретенной миопии.

ки сетчатки при фокусе или гиперметропическом / миопическом дефокусе.

Это заставило нас ускорить начатые 20 лет назад исследования по поиску ещё не открытых физиологических механизмов наведения глаза на резкость и их взаимосвязанного функционирования с исполнительными механизмами адаптационного удлинения переднезадней оси (ПЗО) глаза.

1. Представления о глазном фокусе.

Хорошо ли мы понимаем, что такое фокус глаза? Ведь традиционное **понятие фокуса** глаза в офтальмологии до настоящего времени является достаточ-

но интуитивным, поскольку чёткими физиологическими или численными критериями до сих пор не определено. В практической оптометрии до сих пор отсутствуют методы объективной диагностики *in vivo*, позволяющие точно установить, например, на каком расстоянии в долях миллиметра *перед* и *за* сетчаткой в данный момент находится фокус глаза.

В оптометрических наборах пробных очковых стёкол их дискретный шаг составляет 0,12 или 0,25 дптр, и возможно, он является слишком большим для точной установки местоположения фокуса в глазах, например, с индивидуальной глубиной зрения 1,25 дптр и выше. Ведь у этих глаз качество приёмника-сетчатки значительно выше, но мы не всегда это учитываем при подборе корректирующих линз. В оптометрической практике вообще понятие фокуса интуитивно соответствует одинаковой резкости изображения на красном и зелёном фоне, и это только аксиома.

На рисунке 1 представлено крайнее состояние оптической системы глаза, когда при чрезмерно напряжённой работе вблизи полностью округленный хрусталик уже не может скомпенсировать уход за сетчатку, например, красного волнового фронта при использовании всего функционального диапазона работы ресничной мышцы.

В случае чрезмерно напряжённой работы вблизи на сетчатке будет сформировано не перевёрнутое, а прямое изображение. Но мы по традиции считаем, что в глазу **всегда** формируется только **обратное** изображение, и тогда становится непонятным, что же происходит с изображением на сетчатке при уходе фокуса за неё.

А вот при попадании фокуса точно на сетчатку в макуле будет проецироваться не полоса или круг светорассеяния, а только одна точка, переходящая то в обратное, то в прямое изображение! А точка — это минимальный сигнал возбуждения, который не является в полной мере добротным. Надёжная зри-

тельная система обнаружения явно не сможет работать на основе такого слабого или неоднозначного входного оптического сигнала.

И это, возможно, означает, что оптометрическая мантра «лучи сходятся **до** или **за** сетчаткой» не выдерживает критики, и с этим придётся что-то делать. Так же как и с понятием «гиперметропический дефокус», что предполагает наличие в глазу прямого изображения. И если продолжить, то тогда и традиционное понятие «фокус за сетчаткой» в принципе становится бессмысленным: ведь традиционное перевернутое изображение можно сформировать только при нахождении фокуса перед сетчаткой даже в крайних фазах аккомодации!

Однако, мы все хорошо знаем, что всегда способны после непродолжительного привыкания анализировать даже перевернутое изображение в кино или в жизни. Значит, мозг не настроен на анализ только обратного изображения, а спокойно может анализировать и прямое. Эта простая мысль позволяет уйти в ряде случаев за «красные флажки» символа веры о наличии в глазу только обратного изображения. Конечно, можно предположить, что мозг способен определять момент перехода прямого изображения в перевернутое, и тогда, может быть, это и будет определять момент наступления чёткого изображения?!

Чуть позже мы подробно рассмотрим морфофизиологическое строение сетчатки, позволяющее глазу использовать дисперсию белого луча света на внутренней поверхности роговицы. А сейчас важно понять то, что, после дисперсионного разложения луча белого света в спектр, для глаза особенно важны дисперсионные полосы от лучей трёх базовых цветов, которые способны обнаружить колбочки макулы — это синий, зелёный и красный (**СЗК-полосы**).

Схема формирования дисперсионного фронта после прохождения через роговицу луча белого цвета показана на рисунке 2. Обращаем внимание читателя на то, что из всего спектра нами выделены только три базовые полосы: синяя, зелёная и красная, т.е. только те, которые могут обнаружить соответствующие им СЗК-колбочки макулы.

СЗК-полосы после прохождения через роговицу луча белого цвета (И. Н. Кошиц, 2014).

Из рис. 2 видно, что белый свет испытывает дисперсию на внутренней поверхности роговицы, а ширина частично наложенных друг на друга дисперсионных полос разного цвета, включая СЗК-полосы, по пути к хрусталику возрастает, т.к. роговица является, по сути, *рассеивающей* линзой. Поскольку хрусталик между крайними фазами аккомодации может заметно перемещаться вдоль оптической оси глаза от 0,3 до 1,2 мм, а при значительном напряжении ресничной мышцы дополнительно смещаться вниз на величину до 0,25–0,38

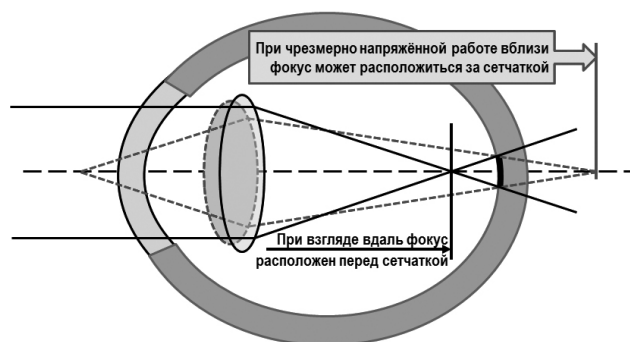


Рис. 1. Схема. Возможный крайний случай расположения фокуса оптической системы глаза за сетчаткой при чрезмерно напряжённой работе вблизи: в этом случае на сетчатке формируется прямое изображение, например, такого же размера, как и обратное при взгляде вдаль

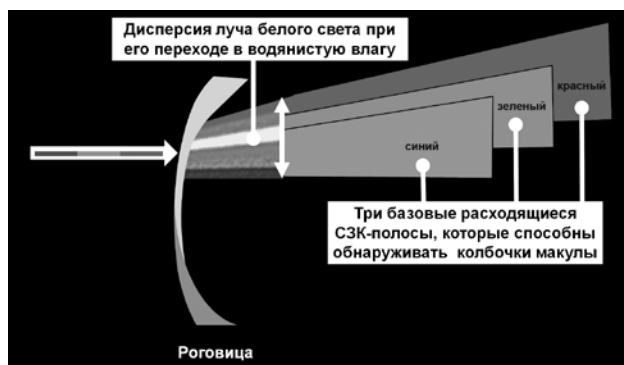


Рис. 2. Схема формирования дисперсионного фронта и трёх базовых расходящихся

мм [12,14,38], то ширина трёх базовых СЗК-полос, *приходящих* в хрусталик, будет при этом несколько изменяться.

После преломления входящих лучей света на роговице и дисперсионного их разложения на её задней поверхности, дисперсионные цветные волновые фронты будут проходить через воднистую влагу обеих камер и через хрусталиковую линзу уже без разложения, но будут подвержены второму дополнительному угловому отклонению в хрусталике для каждой из СЗК-полос, соответственно её частоте и длине волны.

Согласно законам оптики, в глазу *плоскости фиксации* волновых фронтов от СЗК-лучей всегда отстоят друг от друга, и ближе к хрусталику всегда будет располагаться плоскость фиксации лучей синего цвета, а дальше всего — плоскость фиксации лучей красного цвета. Это явление называется осевой или продольной хроматической аберрацией.

Но по отношению к какой из этих трёх плоскостей фиксации СЗК-лучей глазу необходимо «выбирать» фокус? Ведь фактически это три «фокуса», а не один! И тогда традиционное представление о наличии в глазу одной общей фокальной плоскости, по крайней мере, некорректно: три разнесённые плоскости волновых фронтов нельзя совместить на одной плоскости фиксации «по определению», и эта продольная аберрация вдоль оптической оси глаза объективно существует и с её помощью, кстати, мы определяем на практике «точное» наведение глаза на фокус с помощью красно-зелёного оптометрического теста.

Но даже, если мы определим понятие фокуса, например, по одной из трёх плоскостей фиксации СЗК-лучей, то что же тогда будет означать *недо- и перекоррекция*?! И если мы традиционно предполагаем, что изображение в глазу перевёрнутое, то тогда следует признать, что выходящие по краям хрусталика СЗК-лучи могут отклоняться так сильно, чтобы пересечь оптическую ось глаза *до* сетчатки и затем, вполне вероятно, разойдутся в пространство,

не имея возможности попасть в область макулы. Выясним, где же будут реально располагаться фокусные плоскости волновых фронтов от СЗК-лучей на оптической оси глаза.

Роговица имеет коэффициент преломления $KП \approx 1,376$, хрусталик — 1,386, стекловидное тело и воднистая влага — 1,336 [24,38]. Это означает, что луч белого света, проходя из более плотной оптической среды (роговица) в более слабую (воднистая влага в передней камере), должен подвергаться на внутренней поверхности роговицы не только дисперсии, но и *первому угловому отклонению* каждой составляющей его спектра.

По Е. Ж. Трону [34] и А. И. Дашевскому [8], рефракция оптической системы глаза человека у взрослых колеблется в пределах 52,5–71,5 дптр, в среднем равна 60,0 дптр, а у новорожденных, по Е. И. Ковалевскому [10] составляет 77,0–80,0 дптр. Поэтому фокус оптической системы глаза даже у новорожденных минимально равен $F = 100 \text{ см} / 80 \text{ дптр} = 1,25 \text{ см}$ и может располагаться перед сетчаткой. По В. К. Вербицкому [3], преломляющая сила редуцированного глаза составляет 58,82 D, т.е. фокус редуцированного глаза равен $100 / 58,82 = 1,72 \text{ см}$. Это почти в 17,4 раза меньше длины ПЗО = 30 мм в глазу с ПМ высокой степени и в 14 раз меньше, чем в эметропическом глазу, например, с ПЗО = 24 мм.

Т.е., согласно традиционным представлениям, редуцированный фокус всего глаза в целом всегда располагается **перед сетчаткой**, и для того, чтобы он вышел за сетчатку даже в эметропическом глазу, нужна дополнительная рассеивающая линза с преломляющей силой не менее $D = 100 \text{ см} / 2,4 \text{ см} = 41,7 \text{ дптр}$. Очковые или контактные линзы с такой высокой оптической силой на практике не применяются. Отметим, что эти ранние представления обобщили многовековой опыт исследователей оптики глаза, позволили двигаться вперёд, а не остановили дальнейшую разработку теории оптометрии. Если эти представления глубоко и по-настоящему уважаемых нами авторов верны, то необходимо признать, что фокус всегда находится внутри глаза.

И тогда становится не праздным вопрос о справедливости выражения оптометристов «фокус находится за сетчаткой» или о том, хорошо ли мы осознаём, что такое вообще «фокус глаза». Может быть, в глазу следует рассматривать не традиционную геометрическую оптику прохождения СЗК-лучей при формировании обратного изображения, но и оптические закономерности расположения СЗК-полос возбуждения при прямом или обратном изображении, которые отличаются от луча тем, что имеют в области макулы заметную и изменяемую ширину и не связаны с понятием «фокус на сетчатке»? И эти наши новейшие «физиологические сомнения» су-

существенно помогут в дальнейших рассуждениях о справедливости понятия «фокус глаза».

Очевидно, что зрительная система обнаружения у человека способна либо нивелировать продольную аберрацию, либо использовать её. Оценим эти возможности, чтобы попытаться понять, что же такое *фокус глаза*. А вдруг использование в офтальмологической практике этого привычного для всех понятия не только некорректно, но и ошибочно? И вот этот вопрос сам по себе уже по-настоящему еретический. Но ведь на новом витке познания новое знание — это лучший лекарь от заблуждений.

2. Скорость распространения света внутри оптических структур глаза и отстояние друг от друга плоскостей фиксации СЗК-лучей.

В этом разделе мы должны точно выяснить следующее: попадает ли *волновой фронт* (ВФ) от каждого из СЗК-лучей в макулу одновременно при любой длине ПЗО или какие-то из них вообще не приходят в область *fovea* при крайних фазах аккомодации. Для менее дотошного читателя этот раздел с элементарными расчётами в рамках физической школьной оптики можно пропустить, но мы просим обратить внимание на важные выводы в конце раздела.

Скорость света в воде была измерена W. Weber и F. Kohlrausch в 1856 и уточнена J. C. Maxwell в 1856 г. [2]. Она оказалась в 4/3 раза меньше, чем в вакууме. Было установлено, что показатель преломления воды «*n*» для крайних красных лучей в спектре видимого света равен $n_k = 1,331$, для зелёного $n_z = 1,335$, а для крайних фиолетовых $n_{\phi} = 1,342$ [2,32,33,38].

Разница в скорости красного V_k и фиолетового V_{ϕ} лучей спектра с учётом формулы $V = c/n$, где скорость света в вакууме $c = 3 \times 10^8$ м/с, тогда составит следующую величину: $V_k = 3 \cdot 10^8 / 1,331 = 2,25 \cdot 10^8$ (м/с), а $V_{\phi} = 3 \cdot 10^8 / 1,342 = 2,235 \cdot 10^8$ (м/с), т.е.

$V_k - V_{\phi} = 0,015 \cdot 10^8$ (м/с). Именно с этой относительной скоростью ВФ лучей красного цвета будет «убегать» в глазу от фронта лучей фиолетового цвета при прохождении через водянистую влагу (ВВ) и стекловидное тело после дисперсии белого света на внутренней поверхности роговицы. А при прохождении через водные структуры глаза, ВФ зелёных лучей будет «убегать» от ВФ красных лучей, соответственно, с относительной скоростью $V_k - V_z = 2,25 \cdot 10^8 - 3 / 1,335 \cdot 10^8 = (2,25 - 2,247) \cdot 10^8 = 0,003 \cdot 10^8$ (м/с), т.е. почти в 5 раз медленнее, чем от фиолетового.

Это означает, что *отстояние* друг от друга плоскостей волновых фронтов лучей красного и зелёного цвета после прохождения через оптические среды глаза будет существенно меньше, чем красного ВФ от синего. Это также означает, что и *полосы возбуждения* (ПВ) от красного и зелёного ВФ всегда будут располагаться в области макулы ближе друг к

другу, чем полосы от красного и синего ВФ. Причём абсолютная *разность хода* ВФ лучей спектра, т.е. их относительное *отставание* от красного луча, связано только с разным коэффициентом их торможения в «составной» оптической среде глаза, т.е. со скоростью прохождения каждого из этих лучей вдоль оптической оси через переднюю и заднюю камеры, хрусталик, стекловидную камеру и толщину сетчатки. В дальнейших расчётах тормозящую способность структур *fovea* для ВФ от СЗК-лучей приравняем к водным средам глаза, что не нарушит общность рассуждений.

Заметим, что при прохождении СЗК-лучей от роговицы к макуле через влагу передней и задней камеры, а также через стекловидное тело, их волновые фронты тормозятся согласно индивидуальному коэффициенту преломления, а вот при прохождении через хрусталик они также будут тормозиться, но в большей степени из-за более высокого коэффициента преломления у хрусталика. Т.е. в общий путь торможения ВФ каждого из СЗК-лучей хрусталик может вносить заметную величину. Оценим её.

Нам не удалось найти результатов прямых исследований коэффициента преломления лучей красного и фиолетового цвета в хрусталике. Однако вычислить это оказалось возможным по результатам других экспериментов. В частности, известно, что показатель преломления красного света в стекле марки «тяжёлый флинт» равен $КП_{\text{ТФ красный свет}} = 1,6444$, а для фиолетового $КП_{\text{ТФ фиолетовый свет}} = 1,6852$ [33,45]. Также известно, что показатель преломления луча белого света для стекла марки «тяжёлый флинт» составляет $КП_{\text{ТФ белый свет}} = 1,6475$ [33], а показатель преломления луча белого света в хрусталике равен $КП_{\text{ХР белый свет}} = 1,386$ [38,45]. Отношение коэффициентов преломления для лучей белого света составляет $КП_{\text{ХР белый свет}} / КП_{\text{ТФ белый свет}} = 1,386 / 1,6475 = 0,84$. Это соотношение коэффициентов преломления должно сохраниться и для фиолетового, и для красного лучей как в хрусталике, так и в водных средах глаза.

Поэтому, зная показатели преломления СЗК-лучей в воде, мы легко вычислим их коэффициенты преломления в хрусталике. Тогда коэффициенты преломления красного, зелёного и фиолетового лучей в хрусталике составят, соответственно, $КП_{\text{хр.к}} = 1,331 / 0,84 = 1,584$; зелёного $КП_{\text{хр.з}} = 1,335 / 0,84 = 1,589$; а для крайних фиолетовых $КП_{\text{хр.ф}} = 1,342 / 0,84 = 1,597$. Это позволяет просто рассчитать максимальные величины «тормозного пути» непосредственно в хрусталике при крайних фазах аккомодации для каждого из волновых фронтов СЗК-лучей.

Скорость каждого из этих СЗК-лучей в хрусталике составит, соответственно, $V_{\text{хр.к}} = 3 \cdot 10^8 / 1,584 = 1,893 \cdot 10^8$ (м/с); $V_{\text{хр.з}} = 3 \cdot 10^8 / 1,589 = 1,888 \cdot 10^8$ (м/с), а $V_{\text{хр.ф}} = 3 \cdot 10^8 / 1,597 = 1,878 \cdot 10^8$ (м/с). Опуская рутинные расчёты, получаем, что после про-

хождения через структуры «округленного» при взгляде вблизи хрусталика с максимальной толщиной **5,0 мм**, разница тормозных путей между красным и зелёным волновыми фронтами составит: $5,0 \text{ мм} - 4,986 \text{ мм} = \mathbf{0,014 \text{ мм}}$, а между красным и фиолетовым ВФ, соответственно, $5,0 \text{ мм} - 4,958 \text{ мм} = \mathbf{0,042 \text{ мм}}$. При взгляде полностью вдаль, т.е. при «плоском» хрусталике толщиной **3,5 мм** эта разница между красным и зелёным ВФ составит, соответственно **0,01 мм**, а между красным и фиолетовым ВФ — **0,03 мм**. Т.е. тормозящая способность оптической среды хрусталика для волновых фронтов СЗК-лучей в крайних фазах аккомодации будет отличаться между красным и зелёным ВФ на величину 0,004 мм, а между красным и фиолетовым ВФ на величину 0,012 мм.

На наш взгляд, трудно создать в макуле такой высокочувствительный физиологический механизм, который будет способен достоверно оценивать относительно большие величины смещения волновых фронтов друг от друга вдоль оптической оси глаза при разных фазах аккомодации в диапазоне 0,004–0,012 мм: ведь линейный размер (высота) светочувствительного наружного сегмента колбочек, содержащего светочувствительные мембранные диски с йодопсином (это такой своеобразный биологический аккумулятор), составляет около 50 микрон = 0,0005 мм [46]. Следовательно, должен существовать другой высокочувствительный физиологический механизм оценки смещения волновых фронтов СЗК-лучей вдоль оптической оси глаза. Оценим такую возможность.

При средней длине оптической оси эмметропического глаза от поверхности роговицы до сетчатки $L_{\text{эГ}} = 24,0 \text{ мм}$ и максимальной толщине хрусталика 5,0 мм, длина пути оптического сигнала через переднюю и заднюю камеры и стекловидное тело составит 19,0 мм.

Красный ВФ пройдёт этот путь за время $T_k = L_{\text{эГ}} / V_k = 19,0 \cdot 10^{-3} \text{ (м)} / 2,25 \cdot 10^8 \text{ (м/с)} = 8,444 \cdot 10^{-11} \text{ [с]}$. За это время фиолетовый ВФ пройдёт расстояние $L_{\text{ф}} = T_k \cdot V_{\text{ф}} = 8,444 \cdot 10^{-11} \text{ (с)} \cdot 2,235 \cdot 10^8 \text{ (м/с)} = 18,87 \text{ мм}$. Тогда абсолютная разность хода (отставание) фиолетового ВФ относительно красного в эмметропическом глазу максимально составит: $0,042 \text{ мм (в хрусталике)} + 0,13 \text{ мм (в водных средах)} = \mathbf{0,172 \text{ мм}}$. Т.е. хрусталик может вносить до **25 %** разницы в длине тормозного пути фиолетового и красного волновых фронтов. И это немало, что, по-видимому, позволяет производить глазу тонкую настройку «на резкость».

Аналогично, для зелёного света, при длине его пути в водных средах эмметропического глаза $L_3 = T_k \cdot V_3 = 8,444 \cdot 10^{-11} \text{ (с)} \cdot 2,247 \cdot 10^8 \text{ (м/с)} = 18,97 \text{ мм}$ абсолютная разность хода, т.е. суммарное отставание зелёного ВФ относительно красного ВФ при прохождении через округленный хрусталик и во-

днные среды глаза составит: $0,014 \text{ мм (в хрусталике)} + 0,03 \text{ мм (в водных средах)} = \mathbf{0,044 \text{ мм}}$.

Здесь стоит обратить внимание на то, что изменение геометрии хрусталика участвует в реализации механизма аккомодации не только за счёт изменения угла преломления СЗК-лучей, но также и за счёт заметных изменений степени торможения волновых фронтов при изменении его толщины. Это, на наш взгляд, позволяет открыть, возможно, «новую главу» в конструкциях более современных ИОЛ, а также говорит о безусловной перспективности исследований О. Nishi по восстановлению рефракции и аккомодации в пресбиопическом периоде с помощью размещения в сумке хрусталика пресбиокапсулы, наполненной инертным преломляющим жидким содержимым [42,43]. Эта технология, возможно, позволит также сохранить способность наполняемого искусственного хрусталика к более тонкой настройке глаза «на резкость» по сравнению с жесткими ИОЛ за счёт дополнительной регуляции разницы тормозного пути у СЗК-лучей при изменении его толщины особенно в крайних фазах аккомодации.

В глазу с ПМ высокой степени, например, при ПЗО = 30 мм красный ВФ пройдёт путь ($30 \text{ мм} - 5 \text{ мм}$) = 25 мм вдоль оптической оси глаза через водную среду обеих камер и стекловидное тело за время $T_k = L_{\text{эГ}} / V_k = 25,0 \cdot 10^{-3} \text{ (м)} / 2,25 \cdot 10^8 \text{ (м/с)} = 11,111 \cdot 10^{-11} \text{ [с]}$. За это время фиолетовый ВФ пройдёт расстояние $L_{\text{ф}} = T_k \cdot V_{\text{ф}} = 11,111 \cdot 10^{-11} \text{ (с)} \cdot 2,235 \cdot 10^8 \text{ (м/с)} = 24,83 \text{ мм}$. Тогда абсолютная разность хода (отставание) фиолетового ВФ относительно красного в глазу с ПМ высокой степени максимально составит: $0,042 \text{ мм (в хрусталике)} + 0,17 \text{ мм (в водных средах)} = \mathbf{0,212 \text{ мм}}$. Аналогично, для зелёного света, при длине его пути в водных средах эмметропического глаза $L_3 = T_k \cdot V_3 = 11,111 \cdot 10^{-11} \text{ (с)} \cdot 2,247 \cdot 10^8 \text{ (м/с)} = 24,96 \text{ мм}$ абсолютная разность хода, т.е. суммарное отставание зелёного ВФ относительно красного составит: $0,014 \text{ мм (в хрусталике)} + 0,04 \text{ мм (в водных средах)} = \mathbf{0,054 \text{ мм}}$.

Приведённые расчёты означают, что вклад собственно толщины хрусталика оказывает значимое влияние на суммарную величину разности хода СЗК-лучей от роговицы до сетчатки как в эмметропическом глазу, так и при любой степени миопии. Однако и основная задача хрусталика — изменять **угол отклонения** СЗК-лучей за счёт изменения кривизны его передней и задней поверхностей — при этом также будет выполняться.

Подведём промежуточный итог. Максимальные величины *отставания* у плоскости фиксации фиолетового и зеленого волновых фронтов по отношению к красному ВФ составят при толщине хрусталика 5,0 мм в эмметропическом глазу (ПЗО = 24 мм) и при миопии высокой степени (ПЗО = 30 мм), соответственно, **0,172 мм / 0,044 мм и 0,212 мм /**

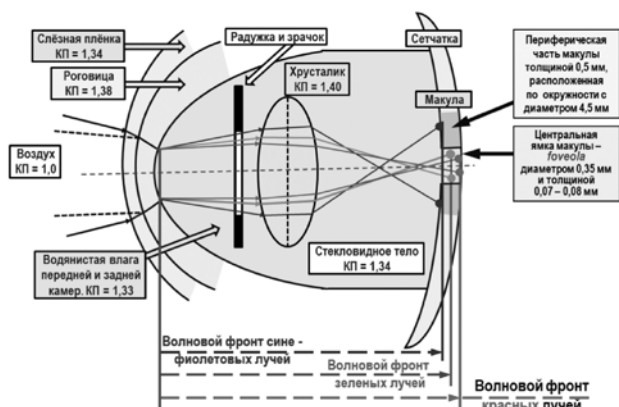


Рис. 3. Схема базового расположения фокусов волновых фронтов СЗК-лучей в фовеа в глазу с любой рефракцией.

0,054 мм. Т.е. в глазу с ПМ любой степени абсолютная величина отставания плоскости фиксации синего ВФ от красного не превышает значения **0,212 мм**, а зеленого ВФ от красного — **0,054 мм**. Схема расположения плоскостей фиксации волновых фронтов СЗК-лучей в макуле в эметропическом глазу и при миопии высокой степени представлена на рисунке 3.

В норме толщина *fovea* на периферии её центральной ямки — в *foveola* максимальна и составляет, как мы уже выяснили, 0,5 мм, а в центре — 0,07–0,08 мм. Это означает, что даже при *анормальной* длине ПЗО во всех случаях, когда лучи красного ВФ будут располагаться на задней поверхности кольцевой периферии *foveola* толщиной 0,5 мм, все три СЗК-составляющие спектра также обязательно попадут в область *fovea* (рис. 3). Поэтому, если в глазу человека на дальней границе по толщине *foveola* плоскость фиксации полосы красного цвета не «уйдет за сетчатку», то плоскость фиксации фиолетово-синего цвета всегда дойдет до внешнего, сравнительно толстого кольца вокруг центральной ямки сетчатки, а не расположится, например, перед ней.

То есть, при миопии даже высокой степени относительное расположение плоскостей волновых фронтов зеленого или красного света всегда будут одновременно проявляться в толщине *foveola*. Теперь стало ясно, что в нормальном или миопическом глазу при адекватной бинокулярной работе обоих глаз красные и зеленые полосы возбуждения присутствуют в центральной ямке макулы **одновременно и всегда**, что может являться четким входным сигналом управления при более точном наведении глаза «на резкость» за счёт управляющих процессом аккомодации команд мозга.

Проф. Л. И. Балашевичем была высказана гипотеза о том, что лучи разного цвета могут возбуждать колбочки на разных участках их анатомической длины, варьируя уровень выходного электрическо-

го потенциала. Ведь колбочки, по сути, состоят из набора «плоских биологических аккумуляторов», соединённых лишь с одним токопроводящим аксоном. Возможно также, что физиологический механизм более точной настройки глаза на резкость связан с разрешающей способностью *foveola*, т.е. с диаметром и количеством расположенных в ней колбочек для красного и зеленого цвета. Как мы уже говорили, около 30 % людей имеют остроту зрения больше 1,25, а у некоторых людей отмечена острота зрения 2–2,5. У ряда птиц этот показатель, как известно, в разы выше.

Как мы выяснили выше, в эметропическом и слабомыопическом глазу «отстояние» плоскостей фиксации красного и зеленого волновых фронтов друг от друга не превышает 0,05 мм. При толщине *foveola*, равной 0,07–0,08 мм, красная и зеленая полосы возбуждения будут обнаружены в ней всегда одновременно. Если вспомнить, что чувствительность зеленых колбочек, обеспечивающих дневное форменное зрение, в десятки раз выше, чем чувствительность красных и синих колбочек (рис. 4), то логично предположить, что зеленая полоса возбуждения является в глазу **базовой**, и именно она принимается за «полосу отсчёта» при наведении глаза на резкость.

Отметим также, что длина волны у луча синего света минимальная, а у красного — максимальная. Длина волны у зеленого света занимает промежуточное положение между ними. Синие лучи несут максимальную энергию, а красные минимальную. Поэтому при прохождении через линзу синие лучи преломляются сильнее, чем красные. Но важно также то, что разница в угле отклонения между красными и зелеными лучами меньше, чем между зелеными и синими из-за более близкого совпаде-

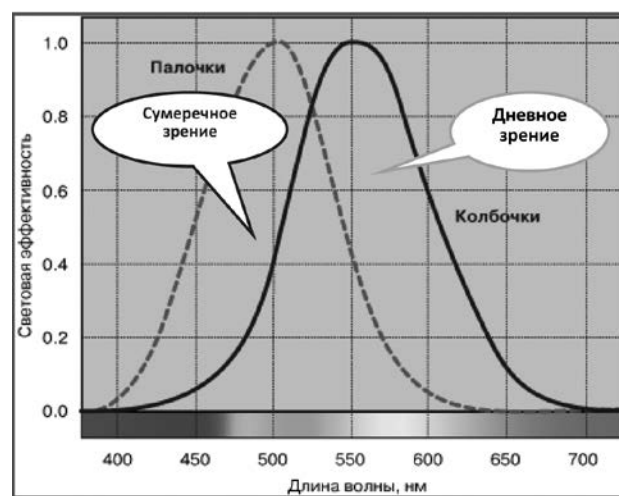


Рис. 4. Кривые спектральной чувствительности глаза, соответствующие светочувствительности палочек и колбочек сетчатки [9].

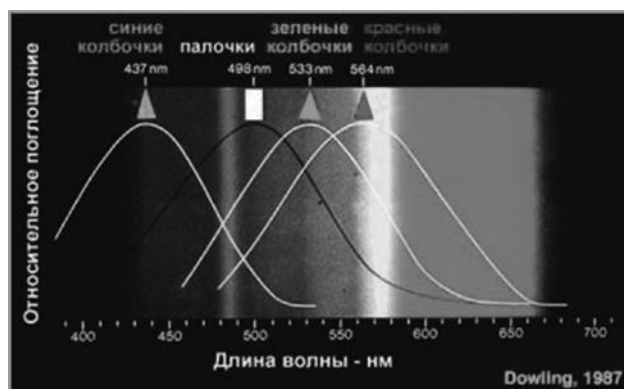


Рис. 5. Диапазоны длин волн СЗК-лучей и максимумы чувствительности синих, красных и зелёных колбочек макулы [46]. Промежуток между максимумом чувствительности красных и зелёных колбочек макулы составляет 31 nm, а синих и зелёных — 196 nm, т.е. в 6 раз больше.

ния диапазонов их длин волн (рис. 5). Т.е. *полосы за-светки* в макуле от красного и зелёного лучей света будут изначально находиться ближе друг другу, чем зелёная и синяя полосы.

То есть, вполне вероятно, что на новом витке знаний понятие фокуса в его традиционном понимании в офтальмологической практике придётся пересматривать. И взамен вводить новое адекватное зрительной системе глаза понятие **плоскости фиксации** полос возбуждения, которая находится на постоянном расстоянии от роговицы во всех фазах аккомодации: это *foveola*, в которой и будут всегда располагаться не фокусы-точки, а ЗК-полосы! Почему полосы, а не круги светорассеивания, мы объясним в следующей статье.

Но если в глазу «нет фокуса», а есть плоскость фиксации, то как же тогда глаз наводится на резкость? И здесь явно должны быть включены какие-то другие, ещё не описанные физиологические механизмы. Тем более, что форменное бинокулярное зрение осуществляется двумя глазами. И совершенно ясно, что любые физиологические механизмы «наведения на резкость» зрительной системы человека, т.е. зрительные сигналы в плоскости фиксации обоих глаз, должны быть взаимосвязаны на уровне мозга.

3. Морфофизиология сетчатки и механизмы первичной обработки оптического сигнала фонового изображения.

Не случайно колбочки чувствительны к трём цветам спектра: синему (440–480 nm), зелёному (510–550 nm) и красному (620–770 nm). И это помогает нам создать качественную цветовую гамму изображения. Но важно и другое. В центральной ямке *fovea* расположены только красные и зелёные колбочки, а синие колбочки, расположенные в её периферийной зоне, необходимы не только для полноценного цветного зрения, но, по-видимому,

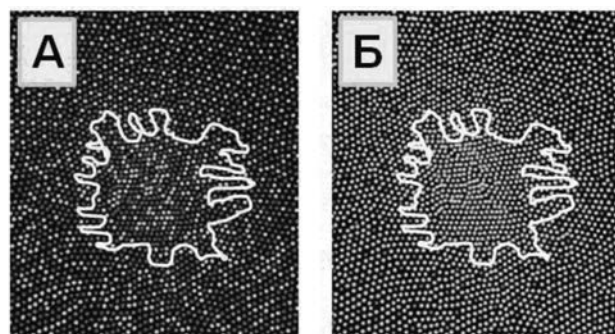


Рис. 6. Электронная микроскопия. Центральная ямка (*fovea centralis*) и периферийная область макулы в нормальном глазу (А) и в глазу дальтоника (Б) [46].

А. В норме внутри центральной ямки — в *foveola* (белая огибающая, выполнена нами) расположены только красные и зелёные колбочки. **Б.** У дальтоника внутри центральной ямки (белая огибающая) расположены только зелёные колбочки и нет красных и синих.

Чувствительность зелёных колбочек в разы превышает чувствительность красных. Однако количество красных колбочек в макуле значительно больше по сравнению с зелёными и синими колбочками. Поэтому зрительный аппарат глаза наиболее адаптирован к работе в красной части спектра и особенно чувствителен к вечернему солнечному спектру и к условиям слабой освещённости. Эти качества нашего зрения хорошо помогали в ночной охоте на более ранних витках эволюции человека.

также могут участвовать в работе общей системы обеспечения качественного зрения как резервная подсистема, увеличивающая надёжность управления аккомодацией в сумерках и ночью (рис. 6, с нашим очерчиванием той области *foveola*, где нет синих колбочек).

Отметим, что по кольцу с диаметром около 4,5 мм (стерео-угол 18°) вокруг центральной ямки *fovea* диаметром 2,2 мм имеется *пик плотности* фоторецепторов синих колбочек — примерно в 100 раз больше, чем красных и зелёных, а толщина кольцевой периферии вокруг *foveola* здесь составляет 0,5 мм [46]. Это кольцо, по-видимому, играет ведущую роль в физиологическом механизме наведения глаза на резкость, и мы ниже рассмотрим его работу. Кроме того, в сетчатке имеются горизонтальные клетки в наружном и амакриновые клетки во внутреннем плексиформном слое, которые обеспечивают поддержание **горизонтальных связей** между всеми **полями возбуждения** колбочек и палочек сетчатки.

Это означает, что в макуле имеется высокочувствительный **механизм определения** взаимного расположения, а также относительных размеров СЗК-полей возбуждения на её куполе и в макуле. Если говорить просто, то сетчатка умеет оценивать цвет, расположение и размеры «зайчиков» от лучей света, приходящих в глаз от детали общего зрительного фона, выделенной мозгом для рассмотрения.

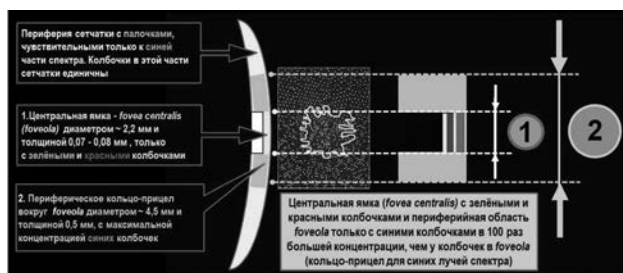


Рис. 7. Схема морфофункциональной организации оптического центра сетчатки.

1 — *foveola* диаметром 2,2 мм и толщиной 0,07–0,08 мм с красными и зелеными колбочками. **2** — периферическое кольцо вокруг *foveola* диаметром 4,5 мм и толщиной 0,5 мм с синими колбочками, имеющими концентрацию в этой зоне в 100 раз выше, чем у зелёных и красных колбочек.

Схема организации оптического центра сетчатки, показанная на рис. 7, будет нам очень полезна для понимания организации входного оптического сигнала при функционировании работы системы управления аккомодацией. Ведь такое морфологическое строение *fovea* как будто создано для функционирования высокоэффективного физиологического механизма сравнения расположения, площади и интенсивности полей возбуждения с колбочками синего, зелёного и красного света по площади *fovea*!

К настоящему времени установлено, что в первичной зрительной коре каждого полушария головного мозга кроме контралатеральной (противоположной) половины поля зрения (ПЗ) представлена и часть ипсилатеральной. Вследствие этого информация из центральных частей ПЗ глаз поступает в оба полушария. Ширина этой области «двойного» представительства на центральном горизонтальном меридиане ПЗ глаза составляет 2–4 угл. град. у приматов и человека и увеличивается до 30–40 угл. град. на крайней верхней и нижней периферии [38, 41, 44]. Такая организация проекций обеспечивается зоной назо-темпорального **перекрывтия** (ЗНТП) на сетчатке, в которой расположены как ипсилатерально, так и контралатерально проецирующиеся ганглиозные клетки.

Такое взаимосвязанное функционирование сетчаток обоих глаз подробно описано в работе д.м.н. С. В. Алексеенко (2014), которая обнаружила, что подобный механизм оценки взаимного расположения полей возбуждения используется в природе — в организации бинокулярных нейронов зрительной коры у кошек (рис. 8) [1]. Расстояние между входными клетками этих нейронов обуславливает их настройку на оценку глубины в пространстве. Причем, настройка на объекты, расположенные в плоскости фиксации, осуществляется бинокулярными нейронами, входы которых располагаются рядом друг с другом, т.е. практически соприкасаются. Это

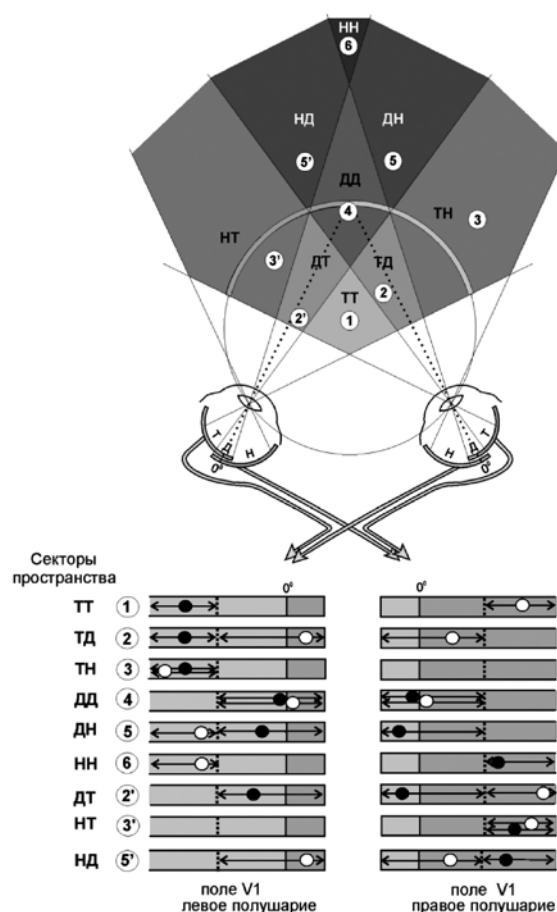


Рис. 8. Схематическое представление локализации в первичной зрительной коре проекций точечных объектов (1, 2, 2', ...), расположенных в разных участках зрительного пространства [1].

Н — назальная часть сетчатки, проецирующаяся в контралатеральное полушарие; Т — темпоральная часть сетчатки, проецирующаяся в ипсилатеральное полушарие; Д — центральная часть сетчатки, проецирующаяся в оба полушария. Местоположение проекций через левый (черный кружок) и правый (белый кружок) глаза показано на диаграммах выпрямленной поверхности коры. Длинная ось диаграмм приблизительно совпадает с проекцией горизонтального меридиана поля зрения. Граница представительства в коре области Д отмечена пунктиром. Бинокулярное зрение включается только при касании в коре головного мозга нейронных полей возбуждения от взаимосвязанных частей сетчаток обоих глаз. В каждой сетчатке можно выделить 3 части: назальную половину Н, часть темпоральной половины Д, которая является зоной назо-темпорального перекрывтия, и другую часть темпоральной половины Т. Части сетчатки Н, Д и Т представлены в разных отделах зрительной коры. Н — на территории полей контралатерального полушария, Д — в переходной зоне полей контралатерального полушария и в полях ипсилатерального полушария, Т — на территории полей ипсилатерального полушария, которые расположены за пределами области представительства зоны Д сетчатки. Таким образом, точечный стимул будет представлен в одном или в двух (в разных полушариях) участках входного слоя IV первичной коры, в зависимости от того, на какую часть сетчатки он проецируется. Более подробное морфо-функциональное описание представлено в исходной работе [1].

говорит о том, что в природе уже используются физиологические механизмы, настроенные *на распознавание расстояний* между полями возбуждений, возникающих при стимуляции разных глаз.

Повторное представительство в разных полушариях мозга сигналов от части колбочек, связанных «крест на крест» с сетчатками разных глаз, является важнейшей морфофизиологической особенностью зрительной системы человека и, по-видимому, позволяет использовать параметры назо-темпорального *перекрывтия* полей возбуждения от СЗК-лучей для бинокулярного наведения не только на резкость. Говоря простыми словами, *назальный полукупол* сетчатки одного глаза жёстко связан с *темпоральным полукуполом* сетчатки другого глаза, что известно давно.

И оценка в разных полушариях мозга повторно возникающих электрических полей возбуждения от полукуполов сетчатки каждого глаза приводит к адекватному взаимосвязанному сведению-разведению их оптических осей для получения возможности бинокулярного зрения, необходимого в первую очередь для того, чтобы точно определять расстояние до потенциальной опасности. Кроме того, такое функциональное взаимодействие разных *полукуполов* сетчаток обоих глаз позволяет получить большие углы обзора при функционировании периферического (не бинокулярного!) зрения и мгновенно обнаружить с «какого бока» пришла потенциальная опасность.

Стоит также отметить, что площадь бинокулярного поля зрения обоими глазами сориентирована в вертикальном меридиане и обычно всегда на 70–80 % меньше, чем площадь полей зрения у каждого глаза в отдельности (см. рисунки в [1]). Понимание этого, на наш взгляд, особенно необходимо врачу-офтальмологу на ранней стадии обнаружения у пациента открытоугольной глаукомы, когда площадь бинокулярного поля зрения ещё находится в норме и фактически «маскирует» уменьшение собственной площади поля зрения в глазу с начальной глаукомой: больной прекрасно бинокулярно видит, и глаукомный процесс ещё незаметен, но уже начался.

Очень важно отметить, что морфофизиологическое строение сетчатки в области макулы существенно отличается от строения её дальней периферии. Обращаем внимание на то, что в центральной части сетчатки каждого глаза одновременно представлены секторы пространства от обоих полукуполов сетчатки, фиксирующих обозначенные жёлтым и синим цветом отражения внешнего зрительного кругового пространства. Т.е. в центре каждой сетчатки всегда и одновременно отражаются обе части кругового (купольного) зрительного пространства. Это можно схематично для наглядности представить в виде двухслойной модели: с двумя слоями

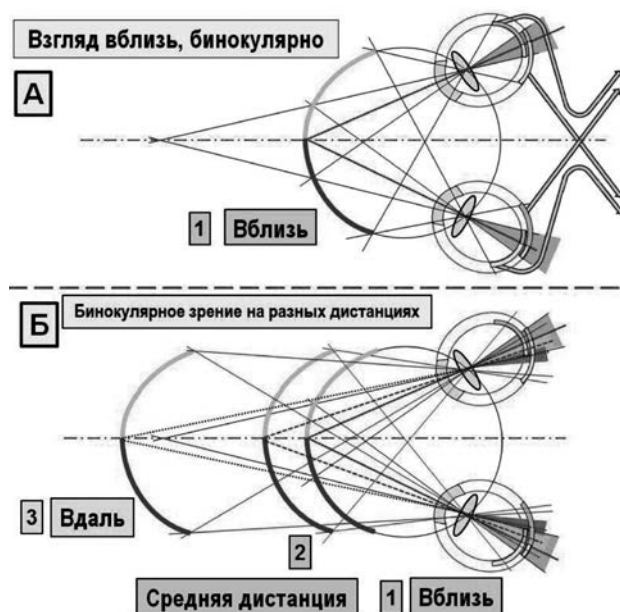


Рис. 9. Схема изменения расположения области наложения полей возбуждения в полусетчатках каждого глаза при бинокулярной работе на разных дистанциях.

палочек в макуле, хотя очевидно, что этих слоёв нет, а каждая из соседствующих палочек связана своим собственным аксоном с разными, но соседствующими нейронными полями возбуждения от разных полукуполов сетчатки (зеленоватая зона на рис. 9 А).

Максимальная область «перекрывтия» с наложением полей возбуждения палочек в *foveola* соответствует точному бинокулярному «наведению» обоих глаз на предмет, выделенный из зрительного фона для более подробного анализа (случай 1 А на рис. 9). Также из рисунка 9 видно, что, при постепенном удалении анализируемой части пространства вдаль, области «перекрывтия» сужаются (случаи 2 и 3 Б на рис. 9, отмеченные жёлтым и фиолетовым цветом), области возбуждения на периферии сетчатки сокращаются, что приводит к снижению общего уровня электрического возбуждения полей колбочек в макуле и палочек на периферии сетчатки.

И конечно, мозгом будет дана команда управления экстраокулярным мышцам на соответствующий взаимосвязанный поворот обоих глаз для достижения максимальной области перекрывтия, т.е. для получения управляющего сигнала максимального уровня. Вывод: обеспечение бинокулярности зрения предполагает наличие физиологического механизма наведения на резкость в виде своеобразного «оптического прицела»! Но что это за прицел и как он работает?!

Мы предположили, что мощный сигнал возбуждения от синих колбочек, расположенных по

кольцу вокруг *foveola* и имеющих там самую высокую концентрацию, является пограничным сигналом «обнаружения» для начала функционирования исполнительного механизма более тонкого наведения глаза «на резкость»: мозг понимает, что при таком расположении границы фиксации в глазу *fovea* способна «уловить» все СЗК-полосы после дисперсии белого света на роговице. И тогда, после выполнения первоначального «прицеливания», можно включать процесс более точного уже бинокулярного наведения глаз на резкость в трёхмерном пространстве за счёт анализа входного сигнала в *foveola* от ЗК-лучей в «двуслойном пироге». Можно определить эту круговую границу фиксации синих лучей как **механизм предварительного поиска и прицеливания**.

На рис. 10 показана схема работы механизма *поиска и прицеливания* при удалении предмета фиксации от глаза. На нём более подробно, чем на рис. 9, представлены именно сдвиги и уменьшения сектора засветки на периферии сетчатки и в макуле полей возбуждения в *foveola* при переводе взора от близки к дали. Хорошо видно, как синхронно работает бинокулярный пространственный «оптический прицел», размещённый в сетчатке каждого глаза в виде периферического кольца вокруг *foveola* и имеющий максимальную концентрацию синих палочек, реагирующих на самую мощную часть спектра — синюю полосу возбуждения.

Такое морфофункциональное строение макулы позволяет надёжно производить «прицеливание» даже в условиях слабой освещённости, когда в приходящем свете присутствует самая мощная фиолетово-синяя часть спектра. Эволюционный выбор синей части спектра для надёжного функционирования при любой освещённости и в любое время суток говорит о том, что, по-видимому, глаза человека и животных были первоначально великолепно приспособлены к ночному зрению, включая слабо освещённые верхние слои океана.

Также отметим, что именно две **области перекрытия** оптического сигнала в «слоях» центральной ямки макулы, по-видимому, в первую очередь ответственны за более точное наведение глаза на резкость: для наилучшего зрения уровень возбуждения зелёных и красных палочек, принадлежащих наложенным концентричным «слоям» *foveola*, должен быть максимальным. Для этого мозг с помощью системы обратной связи должен синхронно подать адекватные электрические управляющие сигналы на ресничную и экстраокулярные мышцы.

Конечно, для того чтобы этот физиологический механизм мгновенно и надёжно работал, необходимо подать на него входной оптический сигнал, организованный наилучшим образом. Традиционные представления предполагают, что это *круги светорассеивания*. Но так ли это, и оптимальна ли

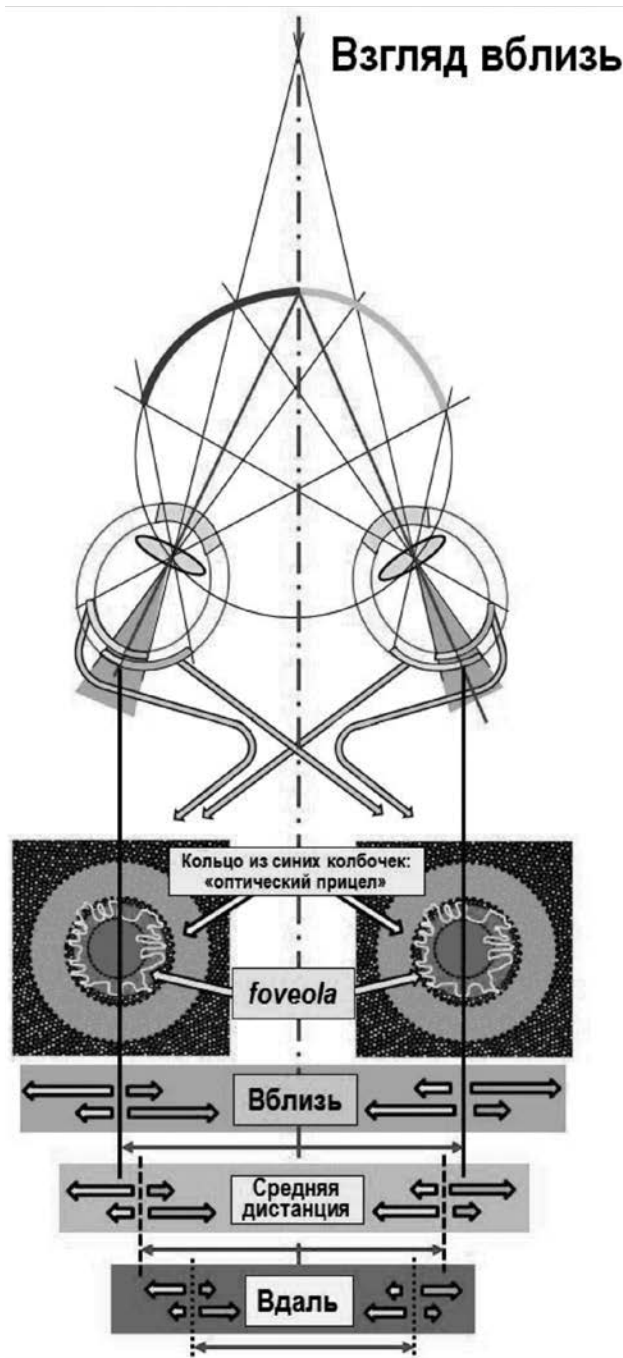


Рис. 10. Схема работы механизма поиска и прицеливания при постепенном удалении предмета фиксации от глаза (И. Н. Кошиц, 2015).

такая форма входного оптического сигнала для его предварительной оценки в макуле и на периферии сетчатки? Это потребовало специального анализа.

По гипотезе И. Н. Кошица, за счёт горизонтальных связей между полями возбуждённых ЗК-колбочек и возможности сравнения их площади и интенсивности оптического возбуждения в *fovea*, сетчатка, видимо, в состоянии различать случаи *касания, наложения или расхождения* приходящих в

глаз СЗК-полос возбуждения в моменты работы на дальних, средних и близких дистанциях.

Для понимания физиологических особенностей функционирования механизма обратной связи, обеспечивающего наведение глаза на резкость за счёт команд на изменение тонуса ресничной мышцы, нам необходимо знать расположение границ и цвет входного оптического сигнала, приходящего в макулу в виде СЗК-полос.

Обратим внимание на то, что при переходе электромагнитной волны из одной оптической среды в другую частота ω (и период T) остаются неизменными, а изменяется только длина волны λ . В частности, при переходе света из вакуума в среду с показателем преломления n длина волны уменьшается в n раз [32].

На рис. 11 представлена схема *отстояния, контакта или перекрытия* полей возбуждения в макуле при разных фазах аккомодации. Морфофизиологическое строение макулы позволяет высококачественно и практически мгновенно оценивать расположение полос возбуждения по отношению друг к другу для выработки мозгом команды обратной связи для создания в ресничной мышце соответствующего тонуса.

Обратим внимание на то, что не «резкость изображения», а предварительная оценка *взаимного*

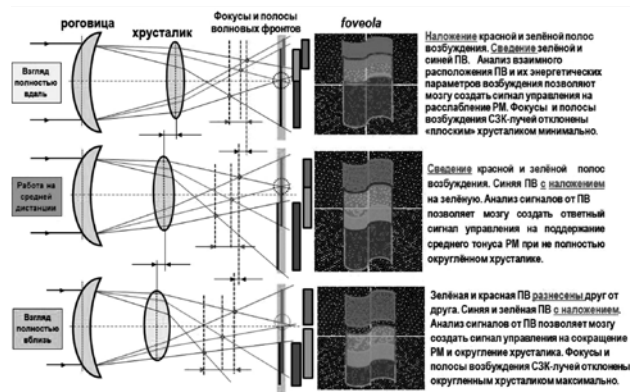


Рис. 11. Схема отстояния, контакта или перекрытия полос возбуждения (ПВ) в макуле при разных фазах аккомодации.

расположения СЗК-полос возбуждения в макуле является качественным и высокочувствительным входным сигналом для функционирования всей системы управления аккомодацией. Оптические и физиологические особенности этого сигнала мы обсудим в следующей статье, а также покажем взаимосвязь этого входного оптического сигнала с нашей метаболической адаптационной теорией приобретенной миопии (2001).

Литература

1. Алексеев С. В. Организация бинокулярной системы для отображения трехмерного зрительного пространства // Глаз. — 2014. — № 1(95). — С. 28–30.
2. Вафиадис В. Г., Попов Ю. В., Скорость света и ее значение в науке и технике. — Минск, 1970. — 43 с.
3. Вербицкий В. К. Оптические свойства глаза / Глазные болезни. — Л.: Практическая медицина, 1930. — С. 75–94.
4. Волков В. В., Котляр К. Е., Кошиц И. Н., Светлова О. В., Смольников Б. А. Биомеханические особенности взаимодействия аккомодационной и дренажной регуляторных систем глаза в норме и при контузионном подвывихе хрусталика // Вестн. офтальмол. — 1997. — № 3 (113). — С. 5–7.
5. Гусева М. Г. Анализ спектральных характеристик света, отраженного от глазного дна при некоторых его заболеваниях // Тез. докл. научн.-практич. конф. молодых ученых ЛИЭТИНа. — Л., 1992. — С. 37.
6. 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.
7. 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.
8. Дашевский А. И. Рефракция и аккомодация глаза / Руководство по глазным болезням / Кн.1— М.: Медгиз, 1962. — С. 252–263.
9. Дейнего В. Н., Капцов В. А., Балашевич Л. И., Светлова О. В., Макаров Ф. Н., Гусева М. Г., Кошиц И. Н. Профилактика глазных заболеваний у детей и подростков в учебных помещениях со светодиодными источниками света первого поколения. Аналитический обзор // Росс. детск. офтальм. — 2016. — № 2. — С. 57–72.
10. Ковалевский Е. И. Офтальмология. Учебник. — М.: Медицина, 1995. — 480 с.
11. 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.
12. Кошиц И. Н., Светлова О. В. Онтогенез формирования необходимой длины глаза в детстве и метаболическая теория патогенеза миопии // Глаз. — 2007. — № 6 (58). — С. 16–31.
13. Кошиц И. Н., Светлова О. В. Развитие теории аккомодации Гельмгольца по результатам исследований исполнительных механизмов аккомодации // Вестник РАМН. — 2003. — № 2. — С. 3–12.
14. Кошиц И. Н., Светлова О. В. Современные представления о теории аккомодации Гельмгольца: учебное пособие. — СПб.: ИД СПбМАПО, 2002. — 30 с.
15. Кошиц И. Н., Светлова О. В., Гусева М. В., Балашевич Л. И., Макаров Ф. Н. Исполнительные механизмы роста передне-задней оси глаза в теории изменения ретинального дефокуса // Офтальмол. журн. — 2016. — № 6. — С. 44–57.
16. Кошиц И. Н., Светлова О. В., Гусева М. В., Макаров Ф. Н. Приоритетные направления борьбы с приобретенной миопией: теория и практика // Глаз. — 2013. — № 6 (82). — С. 12–17.

17. Кошиц И. Н., Светлова О. В., Горбань А. И. Физиологические особенности работы исполнительных механизмов аккомодации и развитие теории аккомодации Гельмгольца. (Монография). — Изд. Дом СПб. МАПО, 2014. — 93 с.
18. 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». — Москва, 2011. — С. 104–106.
19. Кошиц И. Н., Светлова О. В., Макаров Ф. Н. Приобретенная миопия как классический случай преобладания аккомодации над оттоком // «Бинокулярные и глазодвигательные нарушения»: Сб. стат. научно-практ. конф. МНИИ ГБ им. Гельмгольца. — Москва, 2007. — С. 135–137.
20. Кошиц И. Н., Светлова О. В., Макаров Ф. Н. Современные представления об исполнительных механизмах аккомодации и теории Гельмгольца. Часть I. Физиологические и биомеханические особенности функционирования системы аккомодации // Глаз. — 2012. — № 2 (84). — С. 11–20.
21. Кошиц И. Н., Светлова О. В., Макаров Ф. Н., Гусева М. В. О физиологических и биомеханических постулатах новых теорий аккомодации // Глаз. — 2013. — № 3 (82). — С. 15–21.
22. Кошиц И. Н., Светлова О. В., Макаров Ф. Н. Метаболическая теория прогрессирующей миопии // Мат. 12 съезда офтальмологов Украины. — Одесса, 2010. — С. 257.
23. 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.
24. Ландсберг Г. С. Оптика. 6-е изд., стереот. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 848 с.
25. Светлова О. В. Функциональные особенности взаимодействия склеры, аккомодационной и дренажной систем глаза при глаукомной и миопической патологии. — Автореф...дисс. д.м.н. — М., 2010. — 55 с.
26. Светлова О. В., Кошиц И. Н. Биомеханические аспекты возможных общих причин наследственной и приобретенной миопии // Труды междунар. симп. «Близорукость, нарушение рефракции, аккомодации и глазодвигательного аппарата». — М.: МНИИ ГБ им. Гельмгольца, 2001. — С. 77–78.
27. Светлова О. В., Кошиц И. Н. Взаимодействие основных путей оттока внутриглазной жидкости с механизмом аккомодации: учебное пособие. — СПб.: ИД СПбМАПО, 2002. — 50 с.
28. Светлова О. В., Кошиц И. Н. Классификация и взаимодействие механизмов аккомодации глаза человека // Биомеханика глаза—2002: сб. науч. тр. III сем. — М.: МНИИ ГБ им. Гельмгольца, 2002. — С. 117–119.
29. Светлова О. В. Биомеханизм регуляции увеосклерального оттока в глазу человека. — «Офтальмология на рубеже веков»: сб. научн. тр. — ВМА. — СПб. — 2001. — С. 207–208.
30. Светлова О. В., Кошиц И. Н., Дроздова Г. А. Патфизиологические особенности взаимодействия механизмов оттока водянистой влаги и аккомодации при миопии и глаукоме. (Монография). — Изд. Дом СПб. МАПО. — 2014. — 170 с.
31. Светлова О. В., Кошиц И. Н., Кутлеев А. А. Физиологические особенности работы ресничной мышцы при направленных рефракционных вмешательствах // Тез. докл. 7 съезда офтальмологов России, ч. 1. — Москва, 2000. — С. 287.
32. Сивухин Д. В. Общий курс физики. — Издание 3-е, стереотипное. — М.: Физматлит, МФТИ, 2002. — Т. IV. Оптика. — 792 с.
33. Тейлор В., Паркер В., Лангенберг Д. Фундаментальные константы и квантовая электродинамика, пер. с англ., М., 1972.
34. Трон Е. Ж. Изменчивость элементов оптического аппарата глаза и ее значение для клиники. — Л., Изд. ВМА, 1947. — 280 с.
35. Шаповалов С., Шелепин Ю. Е., Милявская Т. И. и др. Пособие по диагностике, экспертизе, восстановлению нарушений зрительной работоспособности у лиц летного и диспетчерского состава гражданской авиации. — М.: Воздушный транспорт, 1990. — 104 с.
36. Шаповалов С. Л., Милявская Т. И., Игнатьев С. А. Формирование и течение близорукости у взрослых. — М.: МИК, 2012. — 199 с.
37. Brien A. Holden et al., 2016, American Academy of Ophthalmology; www.aaajournal.org.
38. Gullstrand A. Einführung in die Methoden der Dioptrik des Auges des Menschen. — Leipzig: S. Hirzel Verlag, 1911.
39. Hess C. Die Refraction und Akkommodation des menschlichen Auges und Anomalien // Albrecht von Graefes Arch. Ophthal. — 1901. — Vol. 52. — P. 143–174.
40. Fukuda Y, Sawai H, Watanabe M, Wakakuwa K, Morigawa K. Nasotemporal overlap of crossed and uncrossed retinal ganglion cell projections in the Japanese monkey (*Macaca fuscata*) // J. Neurosci. — 1989. — Vol. 7(9). — P. 2353–2373.
41. Marzi C. A., Mancini F., Sperandio I., Savazzi S. Evidence of midline retinal nasotemporal overlap in healthy humans: A model for foveal sparing in hemianopia? // Neuropsychologia. — 2009. — Vol. 3 (47). — P. 3007–3011.
42. Nishi Okihito, Nishi Kayo. Accommodation Amplitude After Lens Refilling With Injectable Silicone by Sealing the Capsule With a Plug in Primates // Arch. Ophthalmol. — 1998. — Vol. 10 (116). — P. 1358–1361.
43. Nishi Okihito, Yamamoto Naoki, Nishi Kayo, Nishi Yutaro. Contact inhibition of migrating lens epithelial cells at the capsular bend created by a sharp-edged intraocular lens after cataract surgery // Cataract Refract Surg. — 2007. — Vol. 33 (6). — P. 1065–1070.
44. Reinhard J., Trauzettel-Klosinski S. Nasotemporal overlap of retinal ganglion cells in humans: a functional study // Invest Ophthalmol. Visual Sci. — 2003. — V. 44. — P. 1568–1572.
45. <http://www.nkj.ru/archive/articles/6674/> (Наука и жизнь, замедленный свет).
46. https://traditio.wiki/Центральная_ямка_сетчатки_глаза

Адаптаційна міопія. Частина 2. Нові уявлення про фізіологічні механізми наведення ока на різкість

І. М. Кошиць, О. В. Светлова

ЗАТ «Питерком-Сети/МС»,¹; ² ФГБОУ ВО «Північно-Західний університет ім. І. І. Мечникова» (Санкт-Петербург)

Розглянуто морфологію макулярної зони ока і проведений адекватний законам оптики аналіз вхідного оптичного сигналу від променів білого світла, що приходить в foveola, схильного до дисперсії (розкладання в спектр) на внутрішній поверхні рогівки: це не кола світлорозсіювання, а смуги збудження червоних і зелених колбочок в foveola, а також синіх колбочок на її круговій периферії.

Докладно розглянуто гіпотезу авторів про наявність в fovea функціонального механізму «порівняння розміщення і інтенсивності полів збудження червоних, зелених і синіх колбочок». Така організація вхідного оптичного сигналу дозволяє мозку створити відповідний сигнал управління тонусом війкового м'яза для установки необхідної заломлюючої здатності кришталика. Виконавчий механізм наведення ока на різкість пов'язаний з функціонуванням в fovea оптич-

ного кільця-прицілу, що складається з синіх колбочок в максимально можливій концентрації. Виявлено функціональні особливості взаємодії кілець-прицілів при бінокулярній роботі обох очей.

Ця гіпотеза, можливо, вже допомогла виявити фізіологічні механізми наведення ока на різкість і, мабуть, дозволить в майбутньому розробити критерії відеобезпеки і регламент зорової роботи для боротьби з пандемією короткозорості. Робота знайдених виконавчих механізмів наведення ока на різкість розглядається авторами стосовно запропонованих ними раніше гіпотез про метаболічну теорію адаптаційної міопії (2001). Доти, поки відсутній регламент зорової роботи, на перше місце в боротьбі з пандемією короткозорості, безумовно, виходять проблеми відеоекології і тотальна профілактика придбаної міопії.

Ключові слова. Адаптація, придбана міопія, метаболічна теорія, рання раціональна корекція, гострота зору, відеоекологія, регламент зорової роботи, смуги збудження в макулі, механізми управління акомодациєю, довжиною очі і наведення на різкість.

Поступила 16.01.2017