

# НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ МЕХАНИЗМА ВИДЕНИЯ (часть I)

УДК 153.75

Поступила 30.04.2010 г.



**В.М. Треушников**, директор<sup>1</sup>;  
**Н.П. Паштаев**, директор<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НПП «Репер-НН», Н. Новгород;

<sup>2</sup>Чебоксарский филиал Межотраслевого научно-технического комплекса «Микрохирургия глаза» им. академика С.Н. Федорова, Чебоксары

Одной из задач микрохирургии катаракты является создание интраокулярных линз (ИОЛ), обеспечивающих видение на любых расстояниях без дополнительной коррекции. В природе эту задачу решают хрусталики, способные к аккомодации. На рынке офтальмологических услуг появились так называемые псевдоаккомодирующие мультифокальные ИОЛ. Качество их зависит от значительно большего числа параметров, чем в случае обычных монофокальных линз. В связи с этим возникает серьезная проблема, связанная с оптимизацией параметров мультифокальных ИОЛ. Следует признать, что без создания систем автоматизированного проектирования работ при решении такого рода задач не обойтись. В данном исследовании сделан первый шаг на пути разработки такой системы для офтальмологии.

**Ключевые слова:** концепции механизма видения, катарактальная микрохирургия, интраокулярные линзы, мультифокальные интраокулярные линзы.

## English

### New concept of the vision mechanism (part I)

**V.M. Treushnikov**, director<sup>1</sup>;  
**N.P. Pashtaev**, director<sup>2</sup>

<sup>1</sup>«Reper-NN» SPE, N. Novgorod;

<sup>2</sup>S.N. Fyodorov Cheboxary branch «Microsurgery of the eye», Cheboxary

A creation of intraocular lenses (IOL), providing a vision at any distances without additional correction, is one of the cataract microsurgery tasks. The lenses capable of accommodation are solving that task in nature. The so-called pseudo-accommodating multifocal IOL have appeared at the market of ophthalmologic services. Their quality depends on a greater number of parameters, than in a case of common monofocal lenses. Thus, a serious problem of the multifocal IOL parameter optimization appears. It should be recognized that we can't avoid a creation of the work automated projection systems at solving such tasks. A first step in creation of such system for ophthalmology is made in the given investigation.

**Key words:** concepts of vision mechanism, cataract microsurgery, intraocular lenses, multifocal intraocular lenses.

Отличительной особенностью нынешнего этапа развития катарактальной микрохирургии является осознание того, что дальнейший ее прогресс не представляет возможным без понимания механизма видения. Все

более значимым для лечения катаракты становится представление о передаче информации от различных структур глаза в головной мозг. При решении такого рода задач пресловутый подопытный кролик уже не

Для контактов: Треушников Валерий Михайлович, тел. раб. 8(831)229-60-39, тел. моб. +7 905-011-02-15; e-mail: reper\_nn@mail.ru.

помощник. Требуются совершенно иные подходы, и достойное место в их ряду должны занять методы, которые в технических отраслях принято называть САПР — системами автоматизированного проектирования работ. Создание САПР для офтальмологии не может быть осуществлено без понимания механизма видения, позволяющего формализовать знания о данном процессе в виде математической модели, с помощью которой рассчитываемые параметры можно сопоставить с экспериментом.

**Цель работы** — для создания математической модели видения определить основные измерения, которые выполняют глаза, с целью воспроизведения реальных предметов в головном мозге.

Основным принципом построения предлагаемой нами концепции механизма видения стало предположение о совершенстве в природе согласования между формой и ее содержанием, т.е. об оптимальности конструкции любого органа для осуществления предназначенной ему функции.

Определим сначала основные функции, которые выполняют глаза. Для зрения любого живого существа, в том числе человека, первоочередное значение имеют расположение в окружающем его пространстве всех объектов, их габариты (размеры), скорости и направления перемещения и, наконец, какие-то специфические особенности, необходимые для узнавания. Без постоянной оценки окружающего пространства и всех происходящих в нем изменений не возможно выживание ни одного животного вида в этом мире. В той или иной мере такой анализ проводят все животные, независимо от того, осознают они это или нет. Полагаем, что содержательная часть механизма видения должна прежде всего определить способы решения именно этих задач. Изложение возможных способов решения данных задач начнем с определения расстояния от животного (глаз) до объекта, без чего не могут быть решены все остальные задачи, перечисленные выше.

Из геометрической оптики известно, что четкое изображение какого-либо объекта на сетчатке глаза возможно при условии выполнения следующего равенства [1]:

$$1/F = 1/l + 1/L, \quad (1)$$

где  $L$  — расстояние от рассматриваемого объекта (предмета) до глаза;

$l$  — расстояние от хрусталика до сетчатки глаза (экрана в технической оптике);

$F$  — фокусное расстояние хрусталика.

В соответствии с этой формулой будем считать, что четкое изображение бесконечно удаленных объектов ( $L = \infty$ ) будет в случае  $F = l$ . Если  $L < \infty$  (реально  $< 3—5$  м), необходимо либо увеличить значение  $l$  (отодвинуть интраокулярную линзу (ИОЛ) от сетчатки), либо уменьшить у ИОЛ фокусное расстояние  $F$  (увеличить оптическую силу ИОЛ, диоптрийность). В технической оптике, например в фотоаппаратах, обычно «настройку на резкость» осуществляют за счет изменения  $l$  — конструктивно это значительно легче сделать, чем изменить  $F$ . В глазу человека такая настройка происходит за счет изменения  $F$ . Человек пока еще не создал такой меха-

низм настройки, какой дала нам природа, поэтому при разработках аккомодирующих ИОЛ, как правило, ищут такие конструкции, в которых так же, как и в фотоаппаратах, при «настройке на резкость» меняется расстояние  $l$ , а не оптическая сила линзы. В этом плане повторение реализованного природой решения остается пока еще мечтой.

Далее мы будем рассматривать только тот вариант настройки на резкость оптической системы глаза, который нам дала природа. Перепишем формулу (1) следующим образом:

$$F = 1 / (1/l + 1/L) \approx l(1 - l/L). \quad (2)$$

Здесь учтено, что  $l \ll L$ . Введем также следующие обозначения:

$$F(L) = F_\infty - \Delta F = l - \Delta F, \quad (3)$$

где  $F(L)$  — фокусное расстояние хрусталика, обеспечивающее четкое изображение на сетчатке объекта (предмета), находящегося на расстоянии  $L$  от глаза;

$F_\infty$  — фокусное расстояние хрусталика для дали;

$\Delta F$  — необходимое уменьшение фокусного расстояния хрусталика для обеспечения четкого изображения объекта на сетчатке при его приближении от  $\infty$  до расстояния  $L$ .

Сравнивая уравнения (2) и (3), находим, что

$$\Delta F \approx l^2/L. \quad (4)$$

Уравнение (4) означает не что иное, как связь изменения фокусного расстояния хрусталика с удаленностью объекта от глаз (с расстоянием  $L$ ). Далее изменение величины  $\Delta F$  можно непосредственно связать с сокращением цилиарных мышц. Если, как это обычно делается, принять, что для сжатия (удлинения) упругого тела на величину  $x$  (например, изменения длины тела) требуется приложить силу  $f$ , прямо пропорциональную  $x$ ,  $f = kx$ , то мы неизбежно придем к утверждению о существовании связи между изменением фокусного расстояния хрусталика, удаленностью объекта от глаз и величиной сокращения цилиарной мышцы:  $\Delta F \approx l^2/L$  соответствует сокращению

$$\Delta x = x(\Delta F) - x_0 = f/k, \quad (5)$$

где  $x_0$  — длина цилиарной мышцы в состоянии покоя;

$x(\Delta F)$  — длина цилиарной мышцы, обеспечивающей изменение фокусного расстояния хрусталика на величину  $\Delta F$ .

Что дают эти простейшие соотношения? Мы исключаем наличие у всех животных и человека в том числе каких-либо средств измерения непосредственно фокусного расстояния хрусталика, но не можем исключить существование у всех зрячих животных процессов управления и контроля за сокращением мышц, в противном случае они ничем бы не отличались от растений. Таким образом, уравнение (5) дает нам основание утверждать, что у животных есть возможность оценки удаленности от них каких-то объектов по величине сокращения цилиарных мышц. Оператору (таким оператором может быть наше сознание) нет смысла смотреть на объект, чтобы установить, на каком расстоянии он находится — вполне достаточно всего лишь определить величину сокращения цилиарной мышцы.

Определение расстояний по сокращению цилиарных мышц — это не единственное решение. Многие иссле-

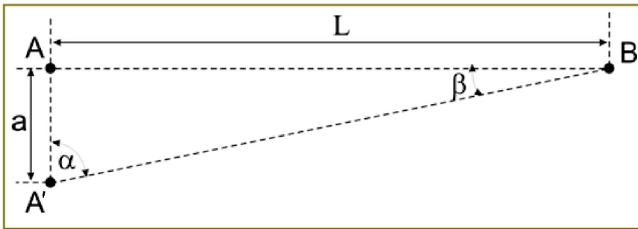


Рис. 1. Схема, поясняющая определение расстояния от глаз до объекта (вариант 1)

дователи связывают определение расстояния от глаз до объекта не с аккомодацией хрусталика, а с наличием бинокулярного зрения (видения двумя глазами, разнесенными на расстояние  $a$ ). Следует понять, что здесь заложено природой — дублирование ли одной и той же функции или дополнение одного метода измерений другим? То, что бинокулярное зрение с точки зрения формальной логики позволяет определять расстояния от глаз до объектов, следует из рис. 1.

Пусть  $A$  и  $A'$  — два глаза, расстояние между которыми равно  $a$ ;  $B$  — минимальный элемент объекта, изображение которого четко отображено на сетчатке глаза. Если треугольник  $AA'B$  — прямоугольный, то очевидно, что

$$L = a / \operatorname{tg} \beta \approx a / \beta$$

при  $a \ll L$ ;  $\beta \approx \pi/2 - \alpha$ . (6)

Здесь и далее считаем, что углы измеряются в радианах.

Смотреть на объект так, как показано на рис. 1, совсем не обязательно. Из геометрии известно, что если определены одна из сторон любого треугольника и прилегающие к ней углы, то могут быть вычислены и две другие стороны. Таким образом, при бинокулярном видении у животных есть объективные возможности определять расстояние от глаз до объекта. Осталось только выяснить: есть ли для этого соответствующие инструменты — один для измерения углов поворота глаз, второй — для наведения глаз на выбранную цель (элемент  $B$  на рис. 1, который ниже будем называть мишенью). Без этих инструментов и два глаза не могут решить данную задачу.

Уточним вопрос о том, какие углы нужно измерять? Вполне реалистично выглядит следующая картинка (рис. 2).

Из рисунка видно, что

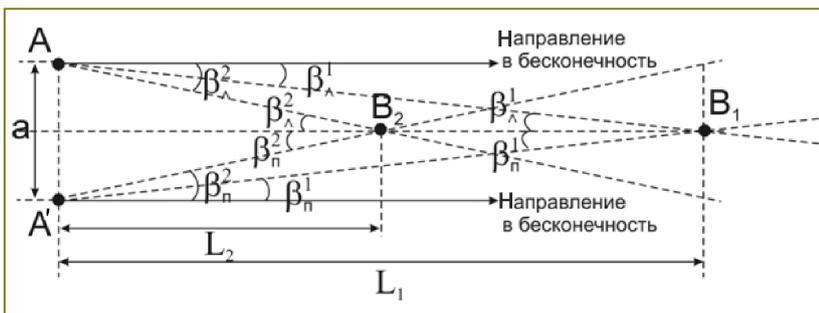


Рис. 2. Схема, поясняющая определение расстояния от глаз до объекта (вариант 2)

$$L = a / \operatorname{tg} \beta \approx a / \beta \approx a / (\beta_n + \beta_n). \quad (7)$$

Учтено, что  $L \gg a$  и углы измеряются в радианах;  $\beta_n$  и  $\beta_n$  — углы отклонений от направления в бесконечность левого и правого глаз, в случае симметричной картинки  $\beta_n = \beta_n = \beta/2$ . Здесь предполагаем, что когда человек смотрит в даль (бесконечность), углы  $\beta$  равны нулю — глаза находятся в состоянии покоя. Для того, чтобы сконцентрировать зрение на ближних предметах, необходимо при любых обстоятельствах увеличить угол сведения глаз — сумму углов  $\beta_n$  и  $\beta_n$ . Сумма углов  $\beta_n$  и  $\beta_n$  связана с удаленностью объекта от глаз; разность углов  $\beta_n$  и  $\beta_n$  — с угловым отклонением направления взгляда на объект относительно направления в бесконечность.

Угол  $\alpha$  (рис. 3) приблизительно равен  $(\beta_n - \beta_n)/2$ . В зависимости от того, где находится объект — слева или справа — у одного из глаз меняется направление разворота на противоположное по сравнению с симметричной картиной, что, естественно, при сложении и вычитании углов требует изменения знака ( $+ \leftrightarrow -$ ). Еще раз отметим, что столь простые соотношения верны только тогда, когда  $L \gg a$ .

Полагаем, что с углами мы разобрались. Для того, чтобы бинокулярное зрение выполняло обозначенные выше функции, необходимы глазные мышцы, обеспечивающие движение глазного яблока как влево-вправо, так и вверх-вниз! И мы опять, как и в случае с аккомодацией хрусталика, можем сказать, что наше сознание вполне может получать информацию обо всех рассмотренных выше углах, соответственно и о положении объекта относительно глаз, на основании совокупности растяжения и сжатия всех глазных мышц. Нашему главному оператору — сознанию — опять нет надобности смотреть непосредственно на объект! Смотрят глаза, а нашему мозгу прежде всего нужна информация от глазных мышц. Если у каких-то животных, например птиц, глаза неподвижны (нет глазных мышц), то при решении этой задачи могут быть использованы шейные мышцы — движения глаз происходят вместе с движением головы. Хуже дела обстоят у тех животных, у которых нет шеи и голова неподвижна, например у лягушек.

Теперь имеет смысл сравнить два механизма оценки удаленности объекта от глаз — аккомодацию хрусталика и ориентирование пары глаз на мишень (какой-то элемент объекта). Бесспорно, бинокулярное видение позволяет дать мозгу значительно больше информации о расположении объектов в пространстве

относительно глаз, оценить не только собственно расстояние от объекта до глаз, но и под каким углом относительно прямого направления глаз расположен данный объект.

Здесь мы находим полную аналогию с определением положения частицы в сферических координатах (рис. 4) — положение частицы задается радиус-вектором  $r$ , углами  $\varphi$  (диапазон изменения от 0 до  $2\pi$  в плоскости осей  $XOY$ ) и  $\theta$  (диапазон изменения от 0 до  $\pi$  в плоскости оси  $Z$  и проекции  $OB$  на плоскость  $XOY$ ).

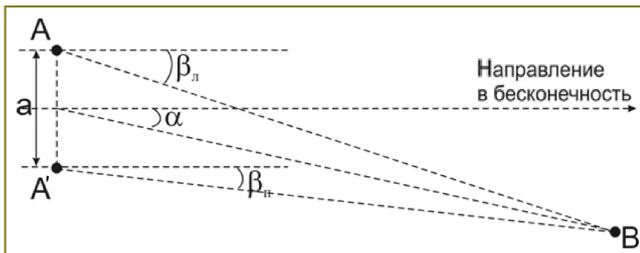


Рис. 3. Схема, поясняющая определение месторасположения объекта относительно глаз

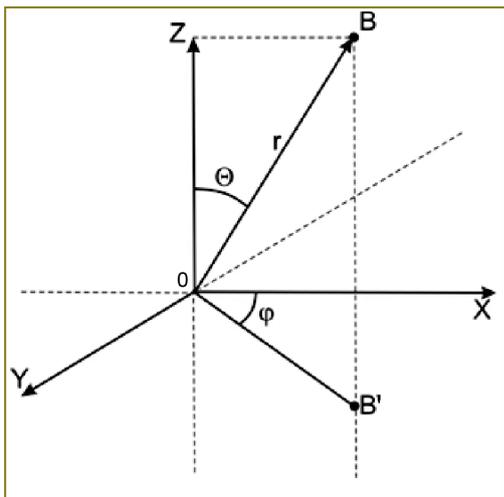


Рис. 4. Сферическая система координат (пояснение в тексте)

Аккомодация хрусталика позволяет оценить только величину  $r$ , но не  $\varphi$  и  $\theta$ . Бинокулярное зрение дает возможность оценить все координаты частицы.

Выше мы уже обсуждали следующий вопрос: чтобы перевести зрение из бесконечности до расстояния  $L < \infty$ , необходимо увеличить оптическую силу хрусталика на величину  $\Delta D(L)$ , которую можно определить следующим образом:

L, м	$\infty$	20	10	5	2	1	0,5	0,33	0,25	0,2	0,1
$\Delta D$ , дптр	0	0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	3	4	5	10

Из этих данных видно, что резкость изображения объекта на сетчатке глаза наиболее чувствительна к изменению расстояния до объекта при  $L \leq 2$  м. Если расстояние до объекта более 2 м, то нет смысла его измерять путем аккомодации. В этом диапазоне предпочтительнее оценивать расстояние до объекта с помощью бинокулярного зрения. При  $L \leq 2$  м определение расстояния до объекта с помощью бинокулярного зрения возможно только при одновременной настройке оптической системы глаза на резкость, естественно, что только с использованием способности хрусталика к аккомодации. Без аккомодации нет возможности в этом диапазоне расстояний  $L$  поймать мишень и, следовательно, определить величину  $L$  только на основании бинокулярного зрения. При этом, что важно, появляется возможность оценить значение  $L$  и на основе явления аккомодации. При  $L \leq 2$  м работают одновременно два механизма.

И это не случайно: животное входит в зону контакта с объектом. Что будет далее, в немалой степени зависит от точной и быстрой оценки поведения объекта.

Возвратимся к инструментам, необходимым для измерения расстояний. Для того чтобы измерять расстояние до объекта, как мы уже отмечали, нужны инструменты двух типов. Один тип инструментов мы нашли — это сокращение цилиарных и глазных мышц. Однако только этого недостаточно. Нужен еще один тип, который бы позволял точно наводить глаза (взгляд) на выбранную мишень (какой-то элемент объекта, обозначаемый на рисунках точкой B). Вот этим инструментом нам и предстоит сейчас заняться. Собственно его наличие достаточно легко обнаруживается при ознакомлении с анатомией глаза (рис. 5).

Для того, чтобы иметь возможность строго ориентировать глаза вдоль линий  $AB$  и  $A'B'$ , как и в случае использования пистолета, винтовки и другого стрелкового оружия, необходимо иметь специальное прицельное устройство, в простейшем варианте состоящее из двух образований точечного типа, через которые при нужной ориентации глаз можно провести прямые:  $AB$  для одного глаза и  $A'B'$  — для другого. Роль первого из таких образований в глазу, естественно, выполняет его оптическая система, состоящая из роговицы, радужки и хрусталика, — через эту систему свет от мишени B проходит в глаз и попадает на сетчатку. Второе образование должно быть на сетчатке (нет иных структур в глазу, где могли бы дополнительно располагаться рецепторы, реагирующие на действие света). С геометрической точки зрения такое образование должно находиться в точке (в окрестности точки очень малого диаметра) пересечения главной оптической оси хрусталика с поверхностью сетчатки глаза. Интересно, что в указанном месте сетчатки действительно располагается центральная ямка, которую принято называть сейчас фовеолой. Диаметр фовеолы не превышает 300—400 мкм, вдоль нее можно разместить около 70 колбочек. Дно ямки утоплено относительно остальной поверхности сетчатки на глубину 100—120 мкм. Относительно указанного диаметра центральной ямки эта глубина представляется достаточно большой — по высоте ямки может быть уложено 20—24 колбочки. Таким образом, в области фовеолы на боковых стенках ямки должно быть не менее 5000 рецепторов, а на дне — не более 4000 рецепторов. Эти цифры получаем для случая, когда стенки ямки вертикальны. При меньшем угле наклона стенок площадь дна уменьшается, а площадь стенок возрастает.

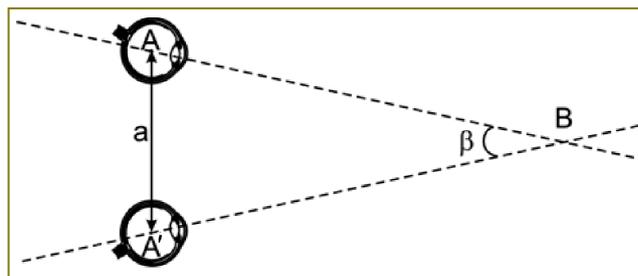


Рис. 5. Схема, поясняющая ориентацию глаз при взгляде на объект

ет. Центральная ямка по геометрическим характеристикам вполне может играть роль одной из составляющих «прицела». Однако только в одном случае: если рецепторы в области фовеолы по своему функциональному назначению отличаются от всех других рецепторов, покрывающих оставшуюся часть сетчатки, на которой находятся 125 млн рецепторов. Удивительно, но и это требование выполнено. Структура сетчатки в области фовеолы сильно отличается от структуры основной ее части. Только в зоне фовеолы каждая колбочка связана с одной ганглиозной клеткой, от которой идет в головной мозг нервное волокно. Как и везде, связь рецепторов с ганглиозными клетками осуществляется через биполярные клетки, т.е. в области фовеолы структура сетчатки имеет следующий вид (рис. 6).

Несколько сложнее, чем на фотопленке или ПЗС-матрице цифрового фотоаппарата, но решается одна и та же задача — зафиксировать место падения кванта света и далее либо необратимо запомнить это место (фотопленка, фотобумага и т.д.), либо передать информацию об этом месте другому запоминающему устройству (ПЗС-матрица цифрового фотоаппарата, сетчатка глаза). На сетчатке глаза только в области фовеолы есть такая прямая связь. На оставшейся части имеем совершенно иную картину — от 125 млн рецепторов в головной мозг идет всего лишь около 1 млн нервных волокон (загадочное соотношение 125:1). За пределами фовеолы на одну ганглиозную клетку в среднем замыкается 125 рецепторов, но опять неравномерно (дальше от фовеолы — больше, ближе — меньше). Связь рецепторов с ганглиозной клеткой за пределами фовеолы

также осуществляется через биполярные клетки, но здесь они образуют ансамбль клеток, связанных друг с другом горизонтальными и амакриновыми клетками, что исключает прямую связь рецептора с ганглиозной клеткой, а следовательно, и любой структурной составляющей головного мозга (рис. 7).

Различие в структуре этих участков сетчатки не случайно. Они и функционируют (реагируют на свет) по совершенно разным законам. Различие состоит в следующем. Если свет направить в область фовеолы, то для соответствующих ганглиозных клеток это будет приказом генерировать в головной мозг нервные импульсы. Если же пучок света направить (создать равномерную освещенность) на совокупность рецепторов, завязанных на одну ганглиозную клетку (рецептивное поле) за пределами фовеолы, то никакой генерации нервных импульсов не будет. Генерация нервных импульсов будет только в том случае, когда какая-то часть рецептивного поля освещается, а другая часть — не освещается, т.е. только тогда, когда по рецептивному полю проходит граница «свет-тьнь». Можно сказать, что рецептивные поля реагируют не на свет как таковой (не имеет значения, яркий он или нет), а на градиент (производную по координате освещенности на поверхности сетчатки).

Вышеизложенные отличия в устройстве сетчатки в области фовеолы от остальной ее части вызывают законный вопрос о целесообразности размещения рецепторов, имеющих однозначную связь с ганглиозными клетками, в центральной ямке (размещение в другой плоскости, на другом расстоянии от хрусталика). С точки зрения геометрической оптики [см. формулу (1)] не лучше ли было разместить все рецепторы на одном удалении от хрусталика? Вопрос этот принципиален. Ответ на него можно дать достаточно легко, если исходить из предположения, что основное назначение фовеолы — это вместе с оптической системой глаза играть роль прицела. Точному наведению взора каждого из глаз на мишень соответствует строго перпендикулярное направление светового потока на поверхность сетчатки в области фовеолы. В этом случае, очевидно, должны иметь место равномерное освещение поверхности боковых стенок центральной ямки и наибольшая освещенность дна ямки. Эти закономерности нарушаются при отклонении потока света от указанного направления. Таким образом, при отведенной роли для фовеолы выполнение ее в виде ямки на поверхности сетчатки — это стремление увеличить точность наведения взора глаз на выбранную мишень.

Многие исследователи считают, что направленный взор проецируется именно в область фовеолы [2, 3]. Это соответствует нашей концепции. Некоторые также считают, что только на основании изображения в области фовеолы происходит детальная оценка формы и цвета объекта [2, 3]. Такую точку зрения мы считаем маловероятной, прежде

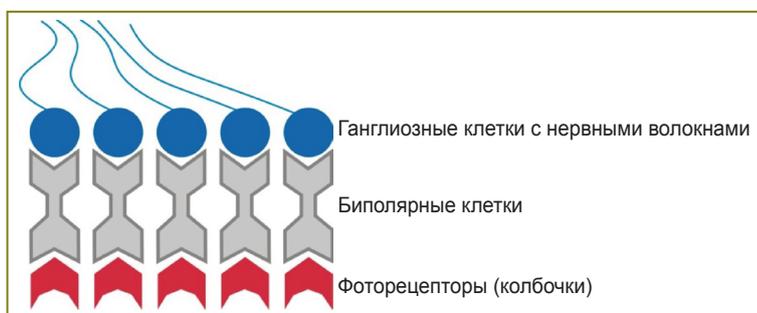


Рис. 6. Схема устройства сетчатки в области фовеолы

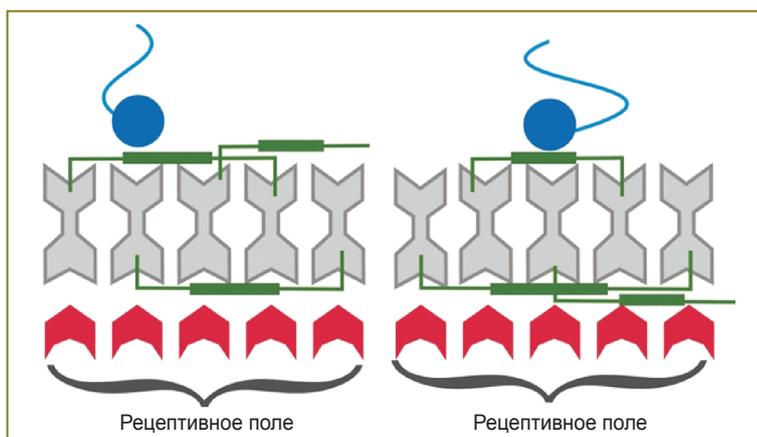


Рис. 7. Схема устройства сетчатки в области рецептивного поля

всего из-за малости как площади фовеолы, так и количества рецепторов на ней (см. ниже).

Чтобы двигаться далее в понимании механизма функционирования глаза, необходимо усложнить задачу. Если мы до сих пор обсуждали вопрос оценки только удаленности объекта от глаз, то сейчас нас будет интересовать: как можно определить габариты (размеры) объекта? На первый взгляд, для решения этой задачи можно вполне обойтись теми инструментами, которые были обозначены выше. Действительно, данное утверждение подтверждает рис. 8.

Пусть габариты объекта по фронту ограничены двумя мишенями  $B_1$  и  $B_2$ . Как было показано выше, с помощью глаз легко определяется расстояние  $L$ . Длина отрезка  $B_1B_2$ , очевидно, будет равна  $L\alpha$ . Угол  $\alpha$  можно рассматривать как угол разворота пары глаз (у птиц угол поворота шеи) с мишени  $B_1$  к мишени  $B_2$ . Как видим, данная задача действительно вполне может быть решена рассмотренными выше средствами измерений.

Однако такое решение нельзя признать идеальным. Во-первых, нужно отметить, что при определении габаритов объекта таким способом нужны всего два основных инструмента — то, что мы назвали выше прицелом, и устройством, обеспечивающее сканирование объектов глазами (глазные мышцы). Глаза действительно сканируют объект, что, естественно, обеспечивают глазные мышцы, при этом получаемая траектория движений взгляда по объекту чуть ли не вырисовывает контуры объекта и его интересные, отличительные места. Фотографии записей таких траекторий приведены, в частности, в работе [4]. Данный факт свидетельствует в первом приближении в пользу высказанного предположения, но только если не учитывать следующее. Возникает вопрос: если для этой цели на сетчатке достаточно только тех рецепторов, которые находятся в области фовеолы, то зачем тогда нужны остальные 125 млн? Во-вторых, данный способ определения габаритов объекта не решает задачи поиска последующих мишеней. Имеется в виду следующее. Если в момент времени  $t_1$  взгляд находится на мишени  $B_1$ , то переход к  $B_2$  через какое-то время  $\Delta t$  (движение глаз происходит по типу скачков — задержка на любой мишени, как правило, происходит в течение не более 0,5 с, за которой следует неумовимо быстрый переход к другой мишени) может быть только чисто случайным. Вероятность попадания в область конкретной, заданной мишени  $B_2$  при таком процессе можно считать близкой к нулю. В связи с этим считаем, что для решения задачи об оценке габаритов

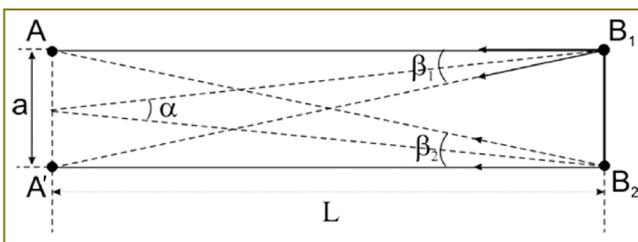


Рис. 8. Схема, поясняющая определение длины отрезка  $B_1B_2$  (вариант 1)

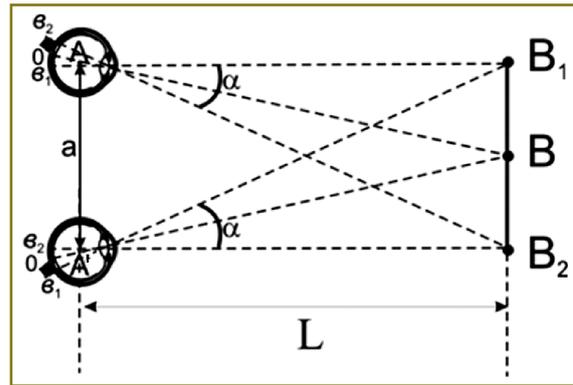


Рис. 9. Схема, поясняющая определение отрезка  $B_1B_2$  (вариант 2)

объекта требуется совершенно иной инструмент, который бы позволил прежде всего осознанно, а не случайно выбирать мишень для последующего скачка взгляда глаз. Последнее предполагает, что, когда глаз смотрит на одну мишень, он видит и другие, из которых каким-то образом выбирает наиболее предпочтительную для перевода взгляда. Такое решение допускает следующая схема (рис. 9).

Здесь взгляд глаз направлен на мишень  $B$ . Именно от мишени  $B$  свет проходит через глаз таким образом, что он попадает в область фовеолы. Условие наведения глаз на цель  $B$  осуществлено. С точки зрения оптики свет в глаза должен, естественно, попадать и от мишеней  $B_1$  и  $B_2$ , но уже не в область фовеолы, а в окрестности точек  $v_1$  и  $v_2$ . Из данного рисунка также видно, что

$$(v_1, v_2)/(B_1, B_2) = l/L, \quad (8)$$

где  $l$  — расстояние от хрусталика до сетчатки глаза,

$$(B_1, B_2) \approx L \tan \alpha \approx L \alpha \approx l/(v_1, v_2). \quad (9)$$

В данном случае нет необходимости измерять угол  $\alpha$ . Оценить расстояние между мишенями  $B_1$  и  $B_2$  можно на основании отрезка  $(v_1, v_2)$ , отмеченного на сетчатке глаза. Эта схема замечательна также тем, что она одновременно позволяет измерять расстояние  $L$  (по наведению на мишень  $B$ , см. выше) и габариты объекта (по отметкам  $v_1$  и  $v_2$  на сетчатке глаза). Но возникает следующий вопрос: есть ли у глаза инструменты для определения положения точек  $v_1$  и  $v_2$  на сетчатке глаза?

Удивительно, но складывается такое ощущение, что природа при конструировании сетчатки глаза именно эту цель и преследовала. Благодаря работам Хьюбела и его сотрудников [4], за что в свое время им была дана Нобелевская премия, мы теперь знаем, что за пределами фовеолы рецепторы сгруппированы в рецептивные поля. Как следует из указанного выше соотношения 125:1, таких рецептивных полей на сетчатке глаза около 1 млн — столько, сколько нервных волокон идет от сетчатки в головной мозг. Различают on- и off-рецептивные поля. Как в случае тех, так и других максимальная частота нервных импульсов, генерируемых ганглиозной клеткой, завязанной на конкретное рецептивное поле, возникает тогда, когда 50% рецепторов освещены светом, а другие 50% — нет. Различие между on- и off-ре-

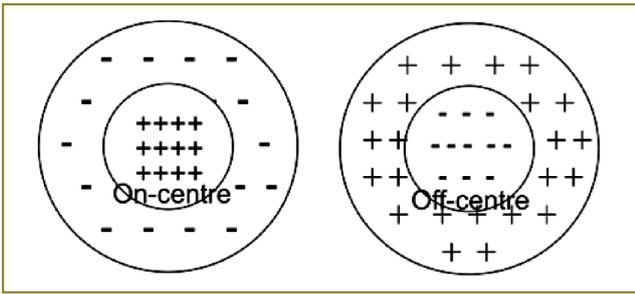


Рис. 10. Условное обозначение on- и off-рецептивных полей

цептивными полями состоит в пространственном расположении в пределах рецептивного поля рецепторов, активирующих и тормозящих генерирование нервных импульсов ганглиозной клеткой [2]. Условно можно сказать, что у одних «тормозящие» рецепторы находятся в центре рецептивного поля, тогда как у других — на периферии (рис. 10). Вероятно, могут быть рецептивные поля и с другим расположением этих рецепторов. Следует отметить, что активирование и торможение генерирования нервных импульсов определяется не собственно рецепторами, а структурой связей биполярных клеток, находящихся в пределах одного рецептивного поля, образованной горизонтальными и амакриновыми клетками.

Из вышеизложенного понятно, что независимо от того, освещено рецептивное поле или нет, никакой передачи нервных импульсов в головной мозг не происходит. Сигналы будут идти только от тех рецептивных полей, которые освещены частично, т.е. на которых проецируется граница объекта (контур). На нашей схеме сигналы могут идти только от рецептивных полей, находящихся в точках  $v_1$  и  $v_2$  на сетчатке глаза. Именно такое устройство сетчатки позволяет выделить новые мишени на объекте, в данном случае  $v_1$  и  $v_2$ . Мишенью всегда будет только та часть объекта, где происходит достаточно резкое изменение интенсивности света. Там, где этого нет, сетчатка это не фиксирует, поскольку она реагирует не на освещенность, а на градиент освещенности на поверхности сетчатки. В итоге следует констатировать, что нервные импульсы могут идти в головной мозг только из трех точек на сетчатке:  $O$  (из фовеолы),  $v_1$  и  $v_2$ . В случае нашей схемы других вариантов нет.

До сих пор мы не говорили о том, что нас окружает мир трех измерений, если, конечно, не считать время. Ничего принципиально нового не требуется, чтобы изложенные выше средства измерений приложить к реальному трехмерному миру. Основная идея вытекает из необходимости учитывать следующие обстоятельства. Как и в реальном мире, образы в головном мозге также представлены как имеющие объемные измерения. Парадокс здесь в том, что считывание реального трехмерного мира происходит через сетчатку глаза, представляющую собой двухмерную поверхность. Идеальный трехмерный образ реального мира в связи с данным обстоятельством может быть получен только путем постоянной передачи в головной мозг различных сечений реального мира (изображений, снимаемых при различных значениях  $L$ ) и их суммирования там. Если учесть изложенное, становится очевидным, что вместо двух точек  $v_1$  и  $v_2$ , отражающих на сетчатке глаза отрезок  $B_1B_2$  будет достаточно большое множество таких точек ( $v_1, \dots, v_n$ ), отражающих контур (или контуры) какого-то (каких-то) объекта (объектов). Если представить, что те ганглиозные клетки, которые генерируют нервные импульсы, светятся и можно каким-то образом следить за состоянием сетчатки глаза, то мы увидели бы один за другим постоянно сменяющиеся контуры каких-то объектов. Так, например, при взгляде на квадратный щит, в котором вырезано круглое отверстие, мы увидели бы следующее (рис. 11): это две гирлянды «светящихся» клеток — бусинок, одна из которых уложена в виде квадрата, другая — в виде круга, внутри которого звездочкой обозначены «светящиеся» ганглиозные клетки в области фовеолы.

Прокомментируем полученный результат. Если область фовеолы рассматривать как перекрестие осей  $X$  и  $Y$ , получаем декартову систему координат, в которой фовеола играет роль начала (центра) координат. В такой системе координат легко определяются положения всех точек и расстояния между ними. Доказательством того, что это соответствует действительности, служат следующие факты. В офтальмологии известно, что при отслойке сетчатки в области фовеолы человек перестает что-то различать, т.е. видеть. Это очень интересный момент: из 125 млн колбочек и палочек исчезают всего-то не более 0,004 млн (0,003%) колбочек (казалось бы, ничего), но человек перестает видеть. Данный факт свидетельствует об особой роли фовеолы, которой

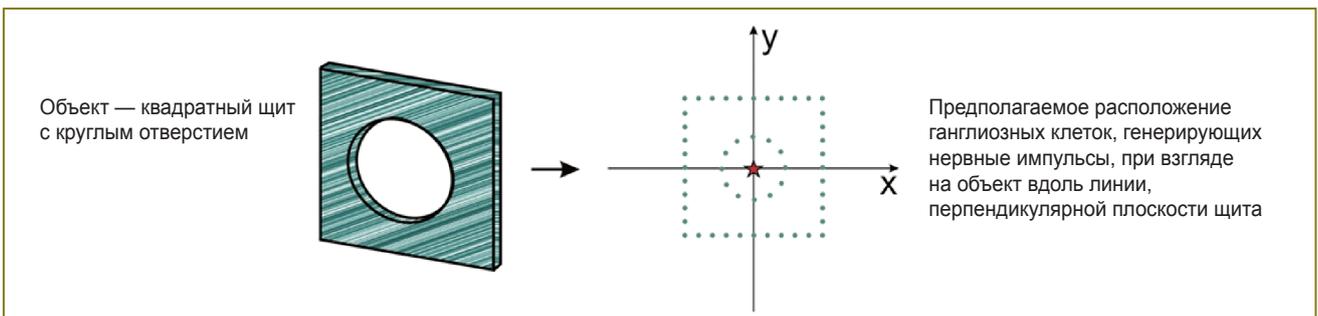


Рис. 11. Объект и его расположение на сетчатке глаза



б) о степени сжатия (сокращения) глазных мышц, отвечающих за ориентацию направления взгляда глаз в каждый конкретный момент времени;

в) о виде матрицы, определяющей контуры и размеры рассматриваемого объекта относительно «креста» на сетчатке, в пересечении которого находится фовеола.

Качественное видение возможно только при наличии всех трех потоков информации. С потерей качества видения можно обойтись без первого потока, но только не без двух остальных. Дадим краткий комментарий к работе этих каналов передачи информации.

1. Передача информации в головной мозг происходит дискретно, не реже, чем через каждые 0,5 с. Это связано с тем, что глаз, как это уже отмечалось выше, постоянно меняет «мишень» для взора. Остановка для рассмотрения «мишени» длится не более 0,5 с, после чего неуловимо быстро идет перескок на другую «мишень». Мы полагаем, что только такой механизм позволяет воссоздать в головном мозге объемное изображение внешнего мира и постоянно отслеживать любые перемещения объектов, находящихся в поле зрения. О процессе воссоздания мы ничего не знаем. Допускаем, что данный процесс можно представить как расстановку рассмотренных выше матриц вдоль какой-то оси, пусть  $Z$ , в соответствии с найденными расстояниями  $L$  от мишеней до глаз и их угловыми координатами (углами  $\Theta$  и  $\varphi$ ) в сферической системе координат. При списывании с сетчатки глаза одного «сечения» внешнего мира за другим и расстановке их в соответствии с вышеизложенным логически представляется вполне допустимым воссоздание из светящихся клеток «объемного» изображения внешнего мира в каком-то масштабе на уровне нейронов головного мозга. Здесь главное допущение состоит в следующем: если запись информации на сетчатке глаза происходит в двухмерном массиве, то в головном мозге — в трехмерном массиве, причем с объемом «памяти» несравнимо большим, чем на сетчатке глаза.

2. Выше отмечали неоднократно, что на дне центральной ямки находится не более 4000 колбочек, а в области одного рецептивного поля — в среднем 125 рецепторов. Но возникает вопрос: почему в области фовеолы расположено такое число колбочек? Если фовеола играет роль «точки отсчета», то не слишком ли велико это число? Казалось бы, что для обозначения «точки» вполне могло хватить и одной колбочки. Дело в том, что, как хорошо известно, все рецепторы под действием света обесцвечиваются. При поглощении одного кванта света происходит некоторое химическое превращение, и до тех пор, пока в результате темновых реакций не будет восстановлено исходное состояние, данный рецептор не может реагировать на свет. В связи с этим общее количество рецепторов на сетчатке и количество рецепторов, способных реагировать на свет, — это не одно и то же. Количество «живых» рецепторов ( $n$ ) можно найти из уравнения:

$$dn/dt = -En + I/r(N_0 - n) = 0; \quad n = N_0 / (1 + \tau E), \quad (13)$$

где  $N_0$  — общее число рецепторов;

$\tau$  — время восстановления рецептора в области фовеолы после поглощения кванта света;

$E$  — интенсивность света, падающего на сетчатку в области фовеолы.

Из уравнения (13) непосредственно следует, что число «живых» рецепторов зависит от интенсивности света  $E$ : чем больше  $E$ , тем меньше  $n$ . Возможно полное «ослепление» фовеолы, если  $\tau E \geq N_0$ , что, вероятно, и происходит, когда мы на машине в ясную погоду рано утром на открытой местности выезжаем строго на восток, а вечером — на запад. Поскольку глаз человека способен воспринимать свет, отличающийся по интенсивности не менее чем в  $10^8$  раз, то вряд ли следует считать 4000 колбочек для фовеолы слишком большим числом. Однозначно, что для воспроизведения изображений объектов это число слишком мало.

3. Есть еще одна интересная особенность глаз, о которой мы не упомянули в статье. Из всего изложенного вполне логично сделать вывод о том, что при фиксации взгляда на какой-то мишени глаз находится в состоянии неподвижности. Однако это не соответствует действительности. Глаза в эти моменты времени не остаются в полном покое, а совершают непрерывные угловые микроколебания, называемые микросаккадами. Они совершаются несколько раз в секунду, их направление случайное, амплитуда таких угловых колебаний не превышает 1—2 угловых минут. Интересно проанализировать, в чем смысл этих микроколебаний, какую роль они играют в процессе видения? Выше мы уже писали, что рецепторы под действием света «выцветают». В связи с этим, казалось бы, объяснение лежит на поверхности — уйти от «выцветших» рецепторов к еще «живым», способным реагировать на свет. Такое объяснение на первый взгляд кажется вполне правдоподобным и, более того, «подтверждается» экспериментально. Если глаз зафиксировать жестко по отношению к точечному источнику света, то световое пятно от него, сначала хорошо видимое, быстро становится невидимым. Все дело тут в понятии «быстро», которое не определено точно. Если считать, что здесь «быстро» предполагает время порядка 1,5 с и более, то это не более быстро, чем время, за которое происходит смена переключений взгляда глаз с одной мишени на другую (не более 0,5 с). Другими словами, сканирование глаз по объекту попутно решает и проблему «выцветания» рецепторов. Дублирование этой функции не имеет смысла. В связи с этим считаем, что роль угловых микроколебаний состоит в чем-то другом, отличном от общепринятой точки зрения — компенсации «выцветания» рецепторов на сетчатке глаза.

Наше предположение о роли микросаккад также «лежит на поверхности» и является логическим выводом из вышеизложенного. Мы уже говорили, и эту точку зрения разделяют многие исследователи [2, 3], что для любого животного интерес прежде всего представляют изменения в его окружении, а не то, что консервативно «стоит» и не движется. Если это так, то должен быть «механизм» выделения движущихся объектов из всех наблюдаемых и, естественно, инструмент оценки скорости этих перемещений. Без этого не представляется возможной ни «погоня» одних животных за другими, ни наоборот.

В чем-то микросаккады напоминают работу метронома — прибора, отсчитывающего одинаковые по величине промежутки времени. При постоянных значениях периода таких колебаний есть все объективные основания определить скорость перемещений наблюдаемых объектов. Описанный выше способ определения матриц позволяет это сделать чрезвычайно эффективно. В самом деле, если для момента времени  $t_1$  контур изображений на сетчатке глаза будет определяться матрицей  $\{a_{i,j}\}^{(1)}$ , а в момент времени  $t_2=t_1+\Delta t$ , где  $\Delta t$  — время возврата взгляда в то же положение (в положение фовеолы, но не обязательно в тот же рецептор), что было при  $t_1$ , — матрицей  $\{a_{i,j}\}^{(2)}$ , то, вычитая из второй матрицы первую, получим третью, в которой исчезнут все элементы, не изменившие своего положения за это время, и останутся только те, положение которых изменилось. Расстояние между ганглиозными клетками на сетчатке глаза, конкретные номера которых определяет третья матрица, непосредственно коррелирует со скоростью перемещений соответствующих объектов или их частей. Правило вычитания матриц, как известно, состоит в том, что из каждого элемента первой матрицы вычитают элемент с такой же нумерацией второй матрицы. Именно это правило делает очевидным вышеизложенное. Может ли это быть реализовано на уровне сетчатки глаза или нейроновой части головного мозга? Нам кажется, что это вполне реально.

Предлагаемый нами способ записи матриц процессов на сетчатке глаза с процедурой их вычитания всегда будет приводить к тому, что будут выделены контуры движущегося объекта. Для этого требуется всего лишь наличие кратковременной памяти, хотя бы на время порядка 1 с. С точки зрения нейрофизиологии такое вполне вероятно. Если объект будет приближаться к глазам вдоль направления, определяющего взгляд, то матрицы, описывающие его контур в последовательности микросаккад в течение взгляда, будут сохранять подобие друг другу (форма контура неизменна), как и в случае удаления объекта от глаз вдоль того же направления. Однако если при приближении объекта размерность матрицы будет возрастать, то при удалении, наоборот, уменьшаться. Разность порядков двух любых следующих друг за другом матриц будет определять скорости приближения или удаления объектов от глаз. При движении объекта вдоль любой линии, отличной от линии, определяющей направление взгляда, матрицы, получаемые после процедуры вычитания, не будут по-

добны матрицам, определяющим контур движущегося объекта. При движении слева направо, как и наоборот, будет уменьшаться в матрицах число столбцов. При движении сверху вниз и наоборот — уменьшаться число строк в матрицах. Мы не считаем, что в качестве операции сравнения одной матрицы с другой используется только операция вычитания. Возможно, есть и другие. Процесс вычитания нам кажется вполне реальным, поскольку в нейрофизиологии основная роль принадлежит процессам не только возбуждения, но и торможения. По своей значимости они равноценны. Возбуждение и торможение — вот те два процесса, которые позволяют действия от разных элементов на любой другой либо складывать, либо вычитать.

Рассмотренное выше происходит в течение одного взгляда (не более 0,5 с). За это время глаза должны выбрать новую мишень и перевести взгляд на нее. Какую мишень выбирают глаза? Для этого у всех животных должна быть своя шкала приоритетов. Инстинкт самосохранения каждого животного на первое место из всех приоритетов должен поставить ту ситуацию, когда имеет место движение какого-то объекта прямо в глаза. В этом случае очередная мишень вероятнее всего должна быть в пределах контура приближающегося объекта, но ближе к глазам, с учетом поправки на скорость движения. От выбора приоритетов в значительной степени зависит выживание всех животных. Каких-либо иных механизмов (без привлечения микросаккад) для решения этой задачи мы не видим.

Таким образом, как нам кажется, определены все основные потоки информации от глаз в головной мозг и их содержательное наполнение, необходимые для воспроизведения идеального объемного образа реального мира. Насколько верны эти представления — предмет дальнейших обсуждений. Следующая задача, которую авторы поставили целью решить, — это провести анализ последствий в формировании информационных потоков после замены натуральных хрусталиков на псевдоаккомодирующие ИОЛ разных типов.

## Литература

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М: Наука; 1973.
2. Балашевич Л.И. Визит к офтальмологу 2008; 10: 43.
3. Глезер В.Д. Механизм опознания зрительных образов. М-Л; 1966.
4. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение. М: Мир; 1990.