

## БИОФИЗИКА ЗРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗАТОРА: ОТ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГЛАЗА К ПРИНЦИПАМ КОРРЕКЦИИ И УВЕЛИЧЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ.

**Махсуд Рахматов**

*Доцент Самаркандского Университета Zarmed*

**Расулова Суғдиёна Фурқатовна**

*Студентка 2-ого курса направления Лечебного дела*

**Аннотация:** В данной статье рассмотрены биофизические механизмы зрения человека и принципы оптической коррекции. Описаны формирование изображения светопреломляющей системой глаза, структура сетчатки и фототрансдукционный каскад с участием родопсина в палочках и колбочках. Затронуты основные оптические дефекты (миопия, гиперметропия, катаракта) и приведена математическая оценка работы лупы для увеличения углового разрешения.

**Ключевые слова:** Биофизика зрения, зрительная рецепция, светопреломляющая система глаза, родопсин, палочки и колбочки, фоторецепторная мембрана, аметропия, миопия, гиперметропия, угловое увеличение, лупа.

**Abstract:** The paper reviews the biophysical mechanisms of human vision and principles of optical correction. It covers image formation by the refractive system of the eye, retinal structure, and the phototransduction cascade involving rhodopsin in rods and cones. The study also addresses common optical defects (myopia, hyperopia, cataracts) and provides a mathematical evaluation of the magnifier for enhancing angular resolution.

**Keywords:** Biophysics of vision, visual reception, refractive system of the eye, rhodopsin, rods and cones, photoreceptor membrane, ametropia, myopia, hyperopia, angular magnification, magnifier.

Биофизические основы зрительной рецепции. Общую проблему зрения можно разделить на три более простых и конкретных:

1. Как формируется изображение внешнего мира на сетчатке глаза?
2. Каким образом энергия света, поглощенного зрительным пигментом, превращается в фоторецепторный сигнал и нервный импульс?
3. Как перерабатывается полученная информация в зрительных центрах мозга и как возникает субъективный образ внешнего мира?

Решение третьего вопроса является предметом нейрофизиологии. Здесь же мы рассмотрим первую и вторую проблемы, т. е. вопросы о том, как формируется изображение предметов на сетчатке глаза, и каким образом световая энергия преобразуется в нервные импульсы, поступающие затем в зрительные центры головного мозга.

Светопреломляющая система глаза. Глазное яблоко имеет почти шаровидную форму диаметром около 24 мм и окружено тремя оболочками (рис.1). Наружная непрозрачная белковая оболочка – склера – имеет защитное значение, придает глазу форму и в его передней части переходит в прозрачную выпуклую роговицу. Через нее в глаз проходят лучи света. Через заднюю стенку склеры проходит глазной нерв и кровеносные сосуды. К склере прилегает сосудистая оболочка, которая состоит из сети мелких кровеносных сосудов, питающих внутренние структуры глаза. В сетчатой оболочке (сетчатке) расположены фоторецепторы – палочки и колбочки.

Место вхождения зрительного нерва в глазное яблоко называется слепым пятном, т. к. здесь нет светочувствительных клеток. Недалеко от слепого пятна находится желтое пятно, выстланное очень плотно упакованными колбочками. В его центральной части имеется углубление, называемое центральной ямкой. Желтое пятно и в особенности центральная ямка являются зонами наилучшей разрешающей способности сетчатки (при дневном зрении).



Рис. 1. Горизонтальный разрез правого глаза человека (вид сверху):

ОО' – главная оптическая ось глаза (штриховая линия);

КК' – зрительная ось (штрихпунктирная линия);  $\gamma$  – угол между осями.

Светопреломляющая система глаза, формирующая изображения предметов окружающего мира на сетчатке, состоит из роговицы, передней камеры, хрусталика и стекловидного тела. Преломляя световые лучи, эти среды обеспечивают формирование на сетчатке действительного, уменьшенного и перевернутого изображения рассматриваемого предмета. На рис.1 перед глазом помещен элемент таблицы Сивцева – буква К. Ее действительное, уменьшенное и перевернутое изображение формируется в центральной ямке желтого пятна сетчатки.

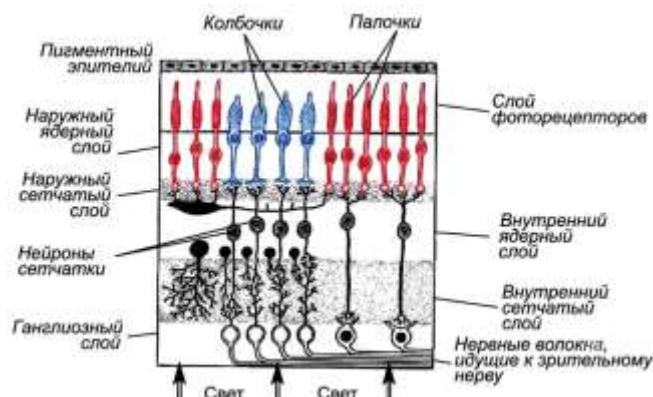
Прямая, проходящая через геометрические центры роговицы и хрусталика, называется главной оптической осью глаза.

Прямая, проходящая через центр хрусталика и желтого пятна, называется зрительной осью глаза. Зрительная ось совпадает с направлением наилучшей разрешающей способности глаза. Угол между главной оптической и зрительной

осями составляет примерно 5°.

Строение сетчатки и светочувствительных клеток. В основе зрения лежит способность глаза преобразовывать энергию света, формирующего изображение внешнего мира на сетчатке, в нервные импульсы, передаваемые в зрительные центры головного мозга.

Сетчатка толщиной около 0,5 мм имеет сложное строение и состоит из нескольких слоев. Ближе всего к свету расположены слои ганглиозных и



нервных

клеток, далее располагаются собственно фоторецепторы. За слоем фоторецепторов находится пигментный эпителий (рис.2).

Рис. 2. Схема строения сетчатки глаза.

При попадании света на поверхность роговицы 4 % светового потока отражается от роговицы, 50 % – поглощается оптическими средами глаза, 10 % – воздействует на фоторецепторы, 36% – поглощается в пигментном эпителии.

Таким образом, полезно используется только 10 % светового потока, падающего на роговицу глаза. Из рис.2 и сказанного выше ясно, что прежде чем попадать на фоторецепторы, свет проходит сквозь слой нервных клеток сетчатки, но этот слой прозрачен и практически не поглощает излучения. Пигментный слой поглощает свет, не взаимодействовавший с фоторецепторами, препятствуя его отражению и повторному воздействию на фоторецепторы. То есть роль пигментного слоя – избавить сетчатку от засветки лишним рассеянным светом.

Сетчатка содержит два вида фоторецепторов: палочки, являющиеся более чувствительными к свету и обеспечивающие зрение в сумерках и ночью (скотопическое зрение), и колбочки, обеспечивающие восприятие зрительных образов при ярком освещении и цветное зрение (фотопическое зрение).

Палочки имеют длину 63–81 мкм, диаметр – 1,8 мкм; для колбочек эти параметры равны соответственно 35 и 5–6 мкм (рис.3).



Рис. 3. Фоторецепторные клетки (изображение получено сканирующим электронным микроскопом).

На сетчатке глаза человека находится приблизительно 110–125 млн палочек и 6–7 млн колбочек. Палочки и колбочки расположены в сетчатке неравномерно: в центре, в области желтого пятна, находятся в основном колбочки, на периферии – палочки.

В фоторецепторах под воздействием квантов света возникает фоторецепторный потенциал, который преобразуется в нервные импульсы, передающиеся по волокнам зрительного нерва в мозг, где формируется зрительное ощущение.

Биофизика фоторецепции. Наилучшим образом механизм фоторецепции



изучен для палочек. Структурная организация палочки изображена на рис. 4.

Рис. 4. Схема строения палочки.

Палочка представляет собой клетку, которая имеет обычные органоиды: ядро, митохондрии и др. Она имеет два сегмента: внутренний (ВС) и наружный (НС), а также синаптический участок, через который возбуждение от палочки передается биполярной нервной клетке.

Цитоплазма НС заполнена своеобразными органоидами, называемыми мембранными дисками. В НС каждой палочки содержится от 700 до 1000 дисков, напоминающих сплюснутые шары. Диаметр каждого диска почти соответствует толщине НС (2 мкм), а толщина диска составляет 15–18 нм. Промежутки между ними не превышают 30 нм. Именно в дисках осуществляется первичный процесс восприятия света. Поэтому мембрану диска называют



фоторецепторной мембраной. Подобно всем биомембранам она состоит из липидов и белков. Ее основным белковым компонентом является зрительный пигмент – родопсин (рис.5).

Рис. 5. Поглощение светового кванта  $h\nu$  родопсином, встроенным в мембрану диска.

Родопсин – высокомолекулярное соединение, состоящее из двух основных компонентов: альдегида витамина А (ретинала) и белковой части (опсина). Именно ретиналь является хромофором (светочувствительной частью) – родопсина.

Недостатки оптической системы глаза и их устранение. Почти 90% информации из внешнего мира мы получаем благодаря органам зрения.

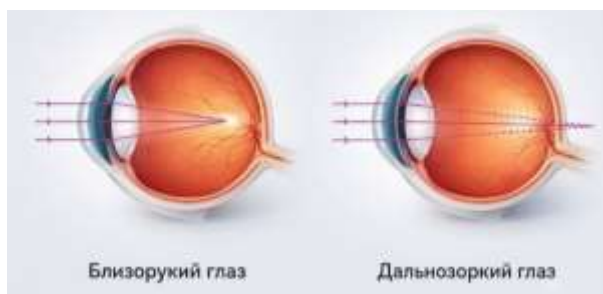
- Глаза - периферическая часть зрительного анализатора.
- Зрительные нервы - проводниковая часть.
- Центр зрения (затылочная часть коры больших полушарий)

Оптической системе глаза свойственны некоторые специфические недостатки. В

нормальном глазу при отсутствии аккомодации (кривизна хрусталика) задний фокус совпадает с сетчаткой -такой глаз называют эметропическим, и аметропическим, если это условие не выполняется.

Наиболее распространенными видами аметропии являются близорукость (миопия) и дальнозоркость (гиперметропия) (рис. 6). Близорукость - недостаток глаза, состоящий в том, что задний фокус при отсутствии аккомодации лежит впереди сетчатки; в случае дальнозоркости задний фокус при отсутствии аккомодации лежит за сетчаткой. Для коррекции близорукого глаза применяют рассеивающую линзу, дальнозоркого - собирающую.

Дальтонизм - болезнь при котором человек не может различать цвета. Врожденный дальтонизм встречается около у 10% мужчин и у 1% женщин.



Катаракта глаз - помутнение хрусталика.

Рис. 6. Виды аметропии.

Лупа. Возможность разрешения деталей предмета зависит от размеров его изображения на сетчатке глаза или от угла зрения. Угол зрения можно увеличить,

приблизив предмет к глазу, однако это связано с некоторыми ограничениями:

1) в ряде случаев технически невозможно существенно изменить расстояние между предметом и глазом (например, при рассмотрении звезд или Солнца);

2) невозможно приблизить предмет на расстояние меньшее предельных возможностей точки глаза, до ближней аккомодации.

В связи с этим для увеличения угла зрения используют оптические приборы:

телескопы, лупы, микроскопы и т.п.

Рассмотрим устройство одного из наиболее простых оптических приборов - лупы.

Лупой называют оптическую систему, в передней фокальной плоскости которой или в непосредственной близости от нее расположен наблюдаемый предмет.

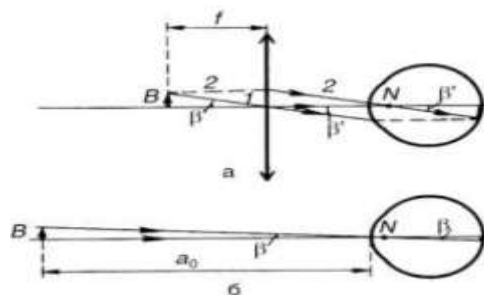


Рис. 7.

Изображение, создаваемое лупой, находится в бесконечности или на удобном

для глаза расстоянии. Если изображение в бесконечности, то оно наблюдается глазом без аккомодации.

На рис. 7, а показано двумя лучами, как с помощью лупы формируется изображение на сетчатке; N - объединенная узловая точка оптической системы глаза, предмет помещен в передней фокальной плоскости. Луч 1 проходит через центр лупы без преломления, а затем преломляется глазом.

Другие лучи, идущие от этой же точки предмета, после преломления в лупе будут параллельны лучу 1. Чтобы определить положение изображения на сетчатке, выберем из этих лучей тот, который проходит через объединенную узловую точку (луч 2).

Он не преломляется глазом. Его пересечение с сетчаткой и укажет положение изображения предмета. Остается лишь для полноты картины достроить начальную часть луча 2 и конечную часть луча 1 (показаны пунктиром).

Увеличением лупы называют отношение угла зрения  $\beta'$ , под которым видно

изображение предмета (рис. 7, а), к углу зрения  $\beta$ , под которым виден предмет,

находящийся на расстоянии наилучшего зрения  $a_0 = 25$  см (рис.7, б). Из

$$\beta' = B/f, \quad \beta = B/a_0,$$

рисунков видно:

где  $B$  – линейный размер предмета. Учитывая (рис. 7), получаем увеличение лупы:

Отсюда видно, что формула для увеличения связывает постоянную

$$\Gamma = \beta' / \beta = a_0 / f.$$

величину  $f$  лупы с расстоянием наилучшего зрения - довольно условной величиной. У близорукого глаза расстояние наилучшего зрения  $a_b < 25$  см, у дальнозоркого  $a_d > 25$  см, поэтому для близорукого глаза увеличение от одной и той же лупы будет меньше, чем для дальнозоркого.

Учитывая, что напряжение аккомодации сильно утомляет глаз и допустимо лишь как кратковременное явление, следует при пользовании лупой помещать предмет в фокальную плоскость, а глаз - у самой лупы.

Лупы изготовляют из одной или нескольких линз. Увеличение лупы зависит от ее

конструкции и изменяется в пределах от 2 до 40-50. Наиболее распространены лупы с 10-кратным увеличением.

Разрешаемое с помощью лупы расстояние между двумя точками можно вычислить по формуле  $B = L\beta$ . Например, если для 10-кратного увеличения взять  $\beta = 0,1'$  и  $3 \cdot 10^{-5}$  рад;  $L = a_0 = 0,25$  м, то получим  $B = 0,25 \cdot 3 \cdot 10^{-5} = 7,5$  мкм.

#### Заключение

Анализ теоретических и прикладных аспектов показывает, что светопреломляющая система глаза и фоторецепторный аппарат сетчатки представляют собой высокоточную биофизическую систему, обеспечивающую первичную обработку визуальной информации.

Благодаря согласованной работе оптических сред глаза и высокой чувствительности зрительного пигмента родопсина в мембранных дисках фоторецепторов, световая энергия эффективно трансформируется в нервные импульсы для головного мозга. Понимание биофизических причин оптических дефектов глаза (миопии, гиперметропии) позволяет успешно компенсировать их с помощью линзовой коррекции.

В свою очередь, применение простейших оптических приборов, таких как лупа, преодолевает физиологические ограничения ближней точки аккомодации и существенно повышает угловое разрешение, что делает изучение оптико-биофизических механизмов зрения фундаментом для современной офтальмологии и микроскопического анализа.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Ремизов А. Н. Медицинская и биологическая физика: учебник для вузов. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2012.
2. Иванов А. В., Гайнутдинов И. К., Нигматуллин Н. Г. Медицинская и биологическая физика: учебное пособие. — М.: Лань, 2019.
3. Антонов В. Ф. Физика и биофизика: учебник для вузов. — М.: ГЭОТАР-Медиа, 2010.
4. Самойлов, В. О. Медицинская биофизика : учебник для вузов / В. О. Самойлов. — Санкт-Петербург : СпецЛит, 2013
5. Andrey B. Rubin. Fundamentals of biophysics. Second edition. 2014.