

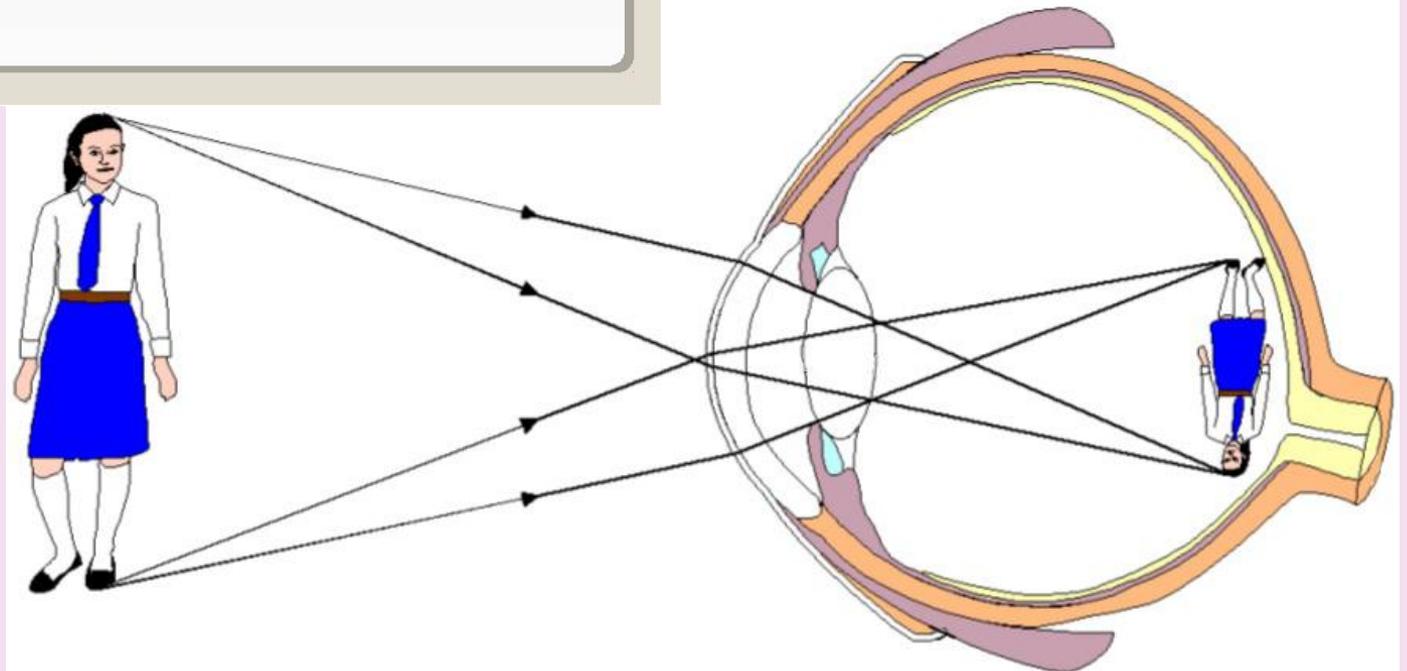
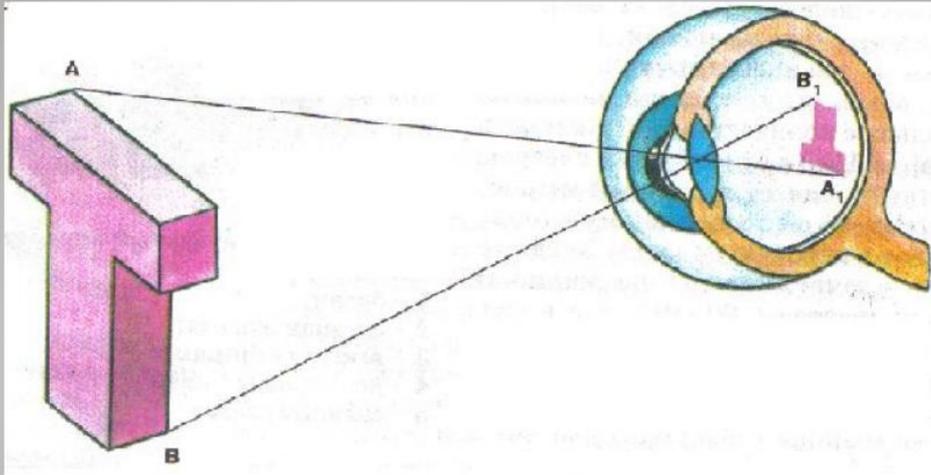
*БИОФИЗИКА*

*ФОТОРЕЦЕПЦИИ*

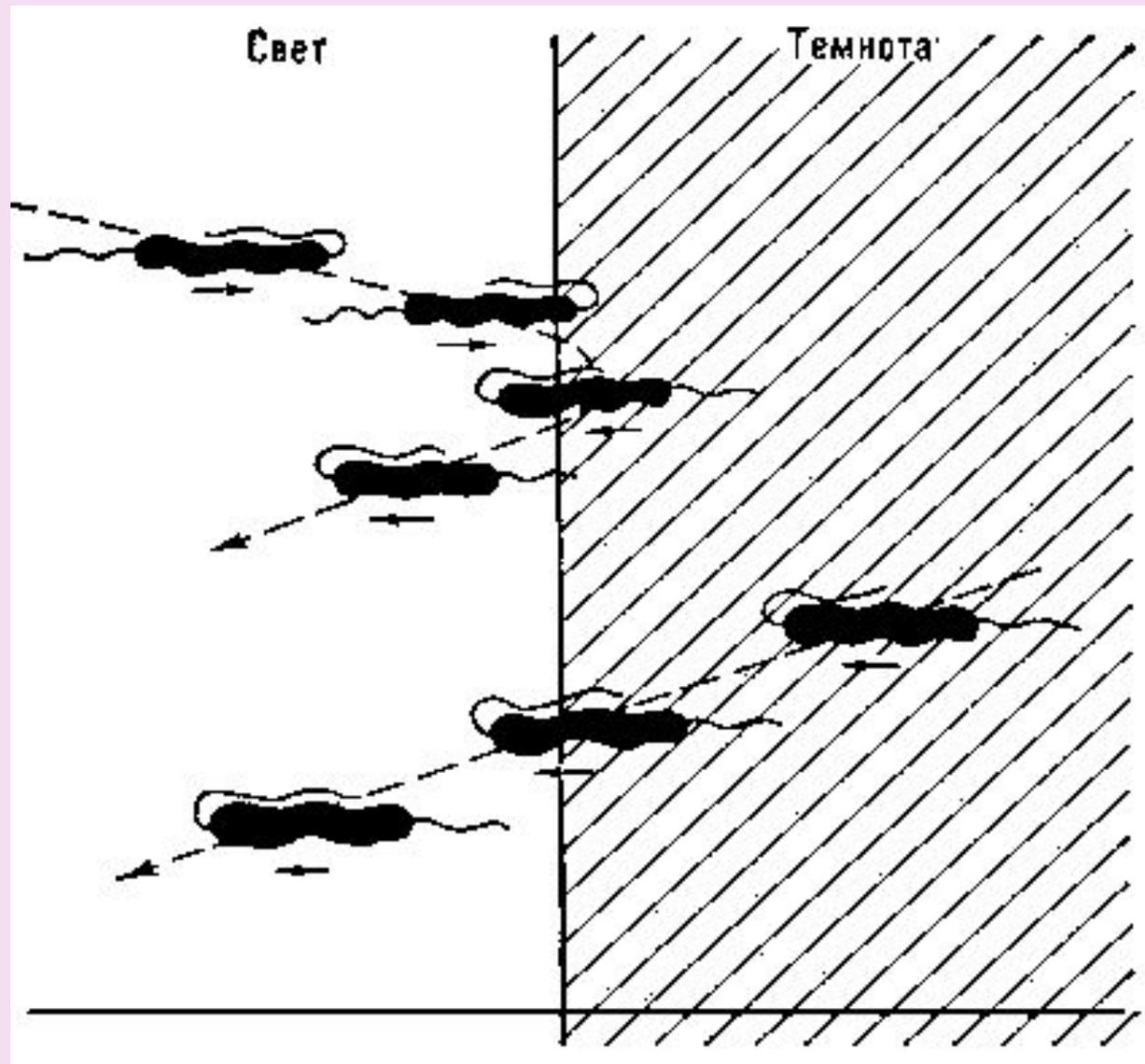
# *СЛЕДСТВИЯ ПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТА:*

- **Края объектов и тени**, которые они отбрасывают, **имеют чёткие границы** (в акустическом мире — очертания намного менее чёткие), т.к. длина волны света в видимом спектре мала и обеспечивает движение света по прямым линиям
- **Инвертирование изображения за отверстием.** В результате изображение получается перевёрнутым, в отличие от тени предмета
- Нужный объект отделяется от основного фона

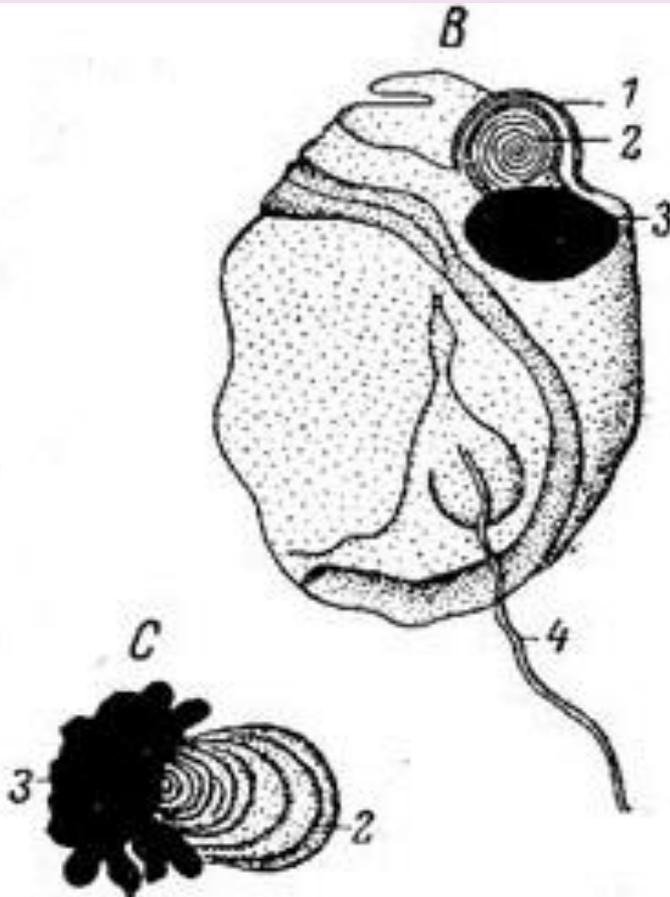
# Изображение на сетчатке.



# ФОТОТАКСИС ПРОСТЕЙШИХ



# ГЛАЗ ПРОСТЕЙШИХ



У простейших одноклеточных (например, у жгутиковых) есть капелька светочувствительного пигмента и концентрирующая свет линза. Размеры линзы составляют доли микрона, происходит сильная дифракция. Адекватное изображение не получается. Можно лишь определить, расположение источника света. Наблюдается **фототаксис**.

В — *Pouchetia cornuta* : 1. Пластичный слой. 2. Хрусталик. 3. Пигментное тело. С — Стигма  
*Pouchetia junco* : 2. Хрусталик. 3. Пигмент. ( Сайт <http://sbiblio.com>)

Реакция молекул на свет зависит от атомарной структуры, расположения электронов. Наиболее важные молекулярные структуры, которые сформировались у живых организмов для реакции на свет, это **пиррольные кольца** и **каротиноиды**. 4 пиррольных кольца входят в состав плоскостной молекулы порфирина, которая **образует фотон-захватывающие центры хлорофиллов**.

У **животных** фотопигменты состоят из хромофора ретиналя, непрочно связанного связью, называемой Шиффовым основанием, с апопротеином опсином, который имеет семидоменную структуру. Роль фотона — изменение конформации ретиналя.

# РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ

способность различать детали зрительного образа.

Синоним — **острота зрения**. Разрешающую способность определяет способность рецепторных клеток сетчатки к угловому увеличению ( $\Phi$ ).

Разрешающая способность пропорциональна  $1/\Phi$ . В случае одного хрусталика в глазе

$$1 / \Phi = f / d ,$$

где  $f$  — фокальное расстояние, а  $d$  — расстояние между рецепторами, которое зависит от размера глаза, т.е. вида животного, и от контрастной чувствительности фоторецепторной клетки

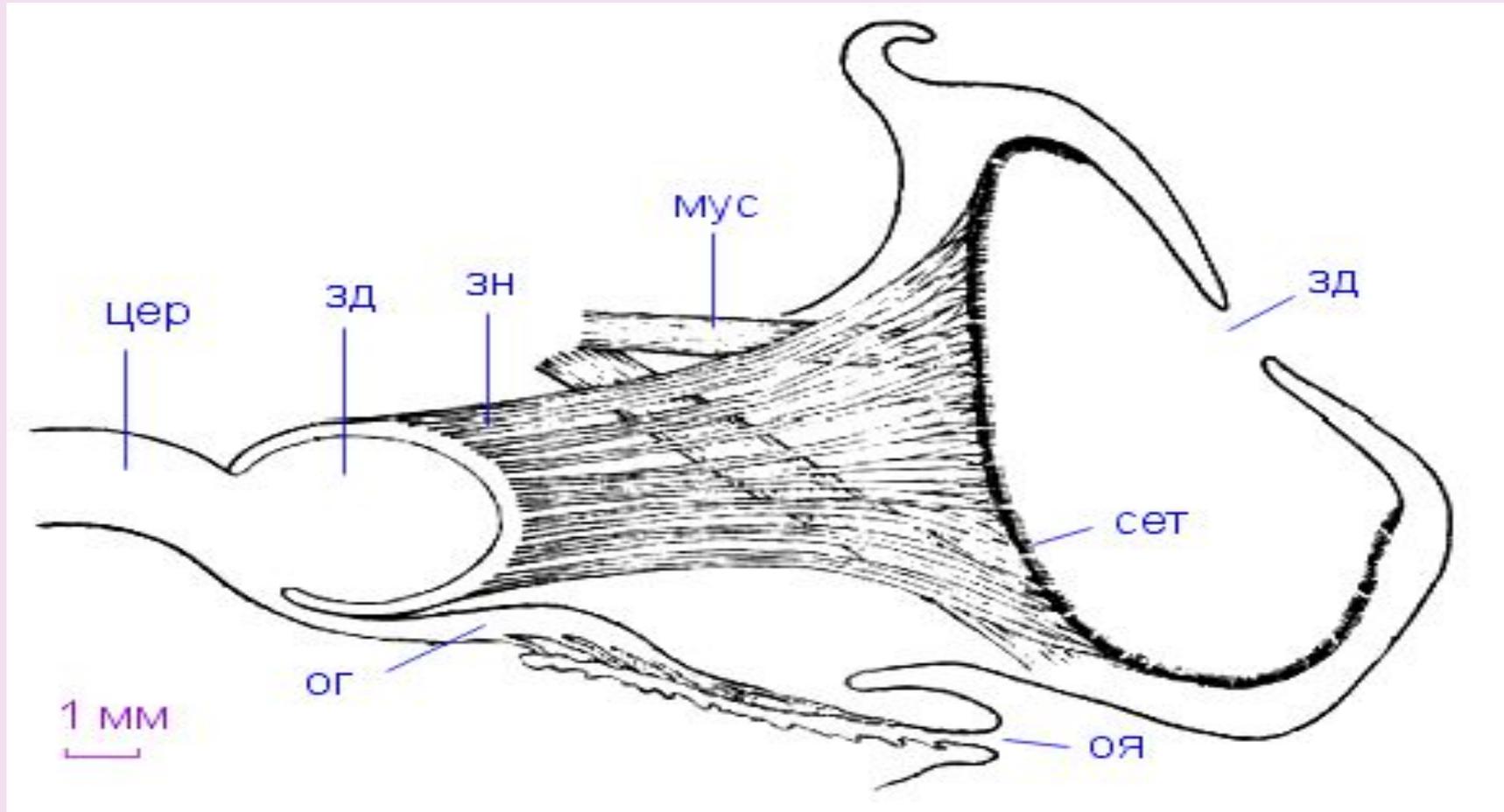
# ПРИМЕРЫ АДАПТАЦИИ К УСЛОВИЯМ ОБИТАНИЯ И ОБРАЗУ ЖИЗНИ

- 1). **Трубчатые глаза** жемчужноглаза *Scopelarchus*
- 2). **По две оптических системы в глазе** южноамериканской четырёхглазки *Anableps tetrophthalmus*
- 3). **Форма хрусталики рыб** намного **более сферическая** по сравнению с хрусталиком человека, а **размер — огромен**
- 4). **Роговица рыб** несущественна для оптики глаза, и имеет неправильную форму
- 5). **Малое отличие показателей преломления роговицы и воды** и малая возможность изменять фокусировку света на сетчатке
- 6). **Наличие в сетчатках двойных и тройных** колбочек
- 7). **Негомогенность** хрусталика
- 8). **Диафрагмальной глаз** *Nautilus pompilius*
- 9). **Зеркальный глаз** гребешка *Pecten*

# ДИАФРАГМАЛЬНЫЙ ГЛАЗ *NAUTILUS*

## *POMPILIUS* (ПОПЕРЕЧНО)

ЦЕР - ЦЕРЕБРАЛЬНАЯ МАССА (НАДПИЩЕВОДНАЯ), М - МЫШЦА, ЗН - ЗРИТЕЛЬНЫЙ НЕРВ, ЗД - ЗРИТЕЛЬНАЯ ДОЛЯ, ОГ - ОБОНЯТЕЛЬНЫЙ ГАНГЛИЙ, ОЯ - ОБОНЯТЕЛЬНАЯ ЯМКА, ЗД - ЗРАЧОК ДИАФРАГМЫ, СЕТ - СЕТЧАТКА



# ГЛАЗ ВЫСШИХ ОРГАНИЗМОВ

У млекопитающих глаз состоит из оптической и фоторецепторной частей и имеет оболочки: белочную, сосудистую и сетчатую. Оптическая система глаза состоит из роговицы, передней и задней камер глаза, зрачка, хрусталика и стекловидного тела.

Фокусировка изображения на сетчатке производится посредством автоматического изменения радиуса кривизны хрусталика вследствие аккомодации. Управляющим устройством служит охватывающая хрусталик цилиарная мышца. Её сокращение или расслабление возникает в ответ на фокусировку изображения.

К стекловидному телу прилегает сетчатая оболочка, в которой расположены фоторецепторы — палочки и колбочки, и нервные клетки с многочисленными отростками. Наружный слой сетчатки, прилегающий к сосудистой оболочке, состоит из пигментных клеток, содержащих пигмент **фусцин**, который, **препятствуя отражению и рассеянию света**, способствует чёткости зрительного восприятия.

У глаз, функционирующих в воздушной среде, как у нас, две трети оптической силы приходится на роговицу. Хрусталик лишь уточняет фокусировку.

Дополнительным усложнением некоторых воздушных глаз является наличие очков перед роговицами. Они развиваются у некоторых ящериц и змей из слившихся век. Основная роль очков состоит в защите роговицы от абразивных свойств окружающей среды.

У некоторых видов очки играют важную роль в преломлении света.

# ОСТРОТА ЗРЕНИЯ

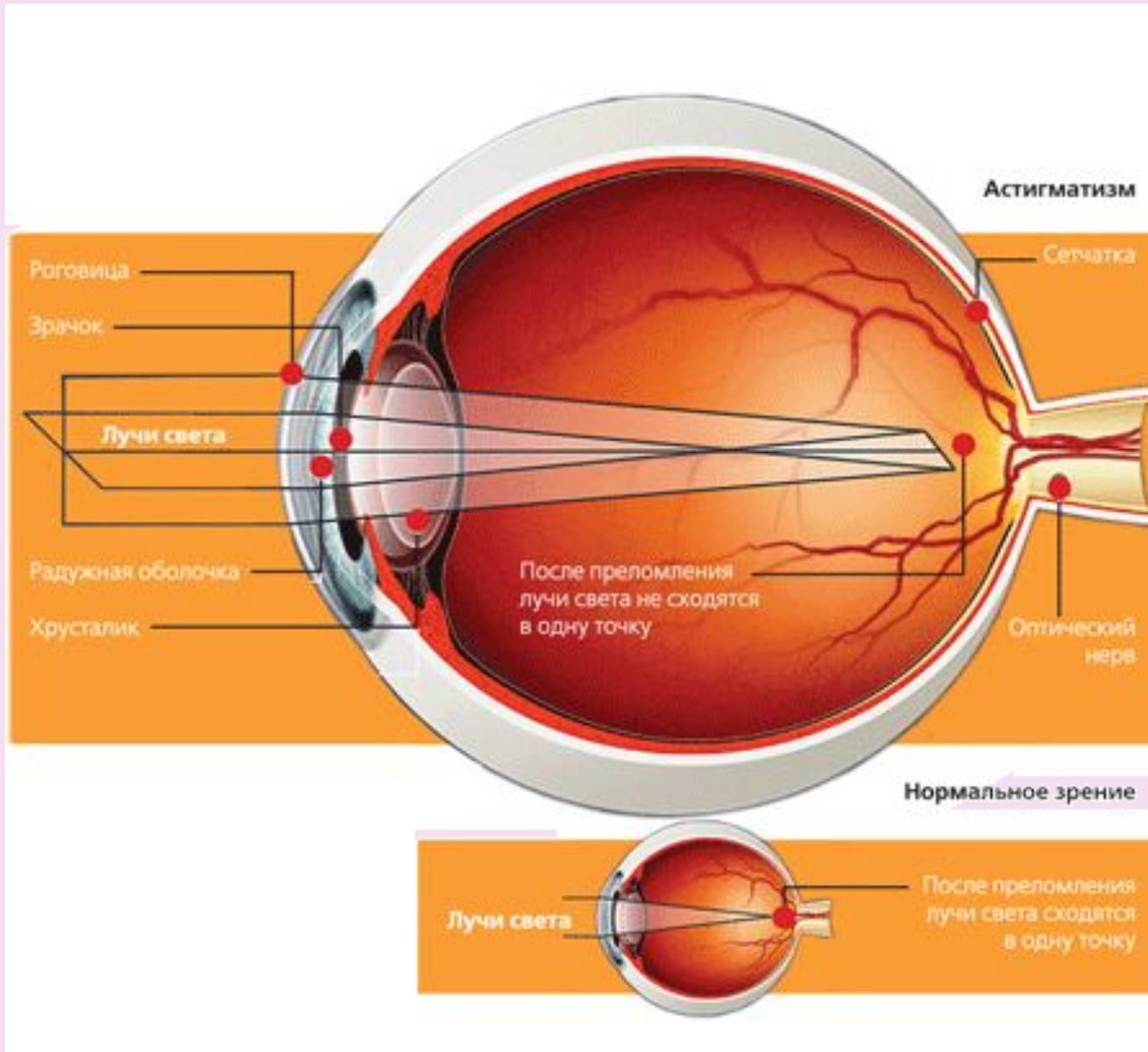
Осьминог	32 % от орлиного зрения;
паук-скакун	9 %;
кошка	7 %;
золотая рыбка	5 %;
крыса	0,7 %;
дрозофила	0,07 %;
планария (ресничный червь)	0,009 %.

# *КРИВИЗНА ХРУСТАЛИКА ЗАВИСИТ*

*ОТ:*

- его эластичности
- от действующих сил— сил упругости (возникают в цилиарном аппарате, в сосудистой оболочке и склере, действуют на сумку хрусталика через волокна цилиарного (ресничного) пояска) и механического натяжения склеры (зависит от внутриглазного давления)

# ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА В ГЛАЗЕ



Источник:  
[http://www.medvestnik.by/ru/issues/a\\_6113.html](http://www.medvestnik.by/ru/issues/a_6113.html)

Глаз, не способный сфокусироваться на удалённый объект, называется близоруким (*миопия*), на близком — дальнозорким (*гиперметропия*).

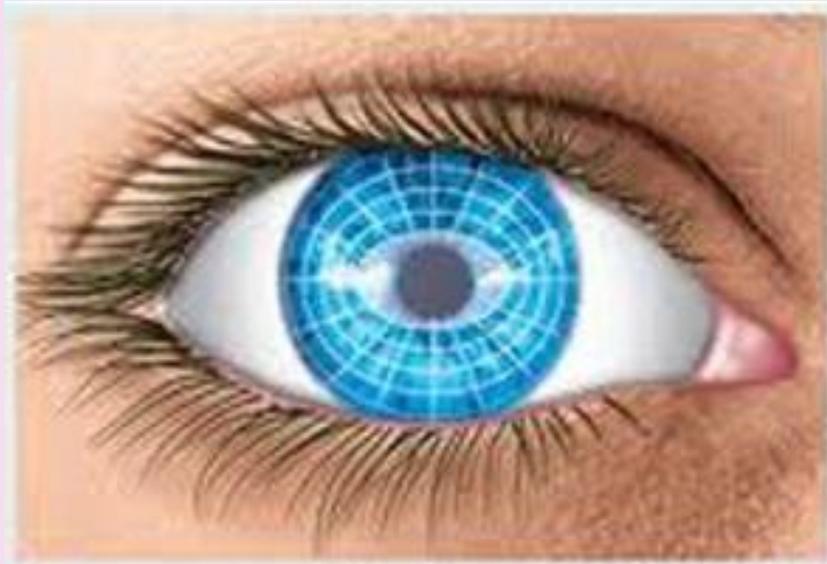
С возрастом капсула хрусталика утрачивает эластичность, её способность фокусироваться на близких объектах снижается.

Средняя оптическая сила хрусталика ребёнка 10 лет составляет 14 диоптрий, к 40 годам она снижается до 6 диоптрий, а к 60 — до 1 диоптрии.

С возрастом капсула хрусталика склерозируется и утрачивает эластичность. Уменьшается способность к фокусированию. Потеря способности к фокусировке называется *пресбиопией*.

## *АСТИГМАТИЗМ*

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ФОКУСИРУЕТ ТОЧКУ КАК ЛИНИЮ. ЭТО ПРОИСХОДИТ ВСЛЕДСТВИЕ ТОГО, ЧТО ОДНА (ИЛИ ОБЕ) ПРЕЛОМЛЯЮЩИЕ ПОВЕРХНОСТИ ИМЕЮТ ДЕФЕКТ СФЕРИЧЕСКОЙ КРИВИЗНЫ



**Астигматизм**



**Здоровый глаз**

# АККОМОДАЦИЯ У ПТИЦ

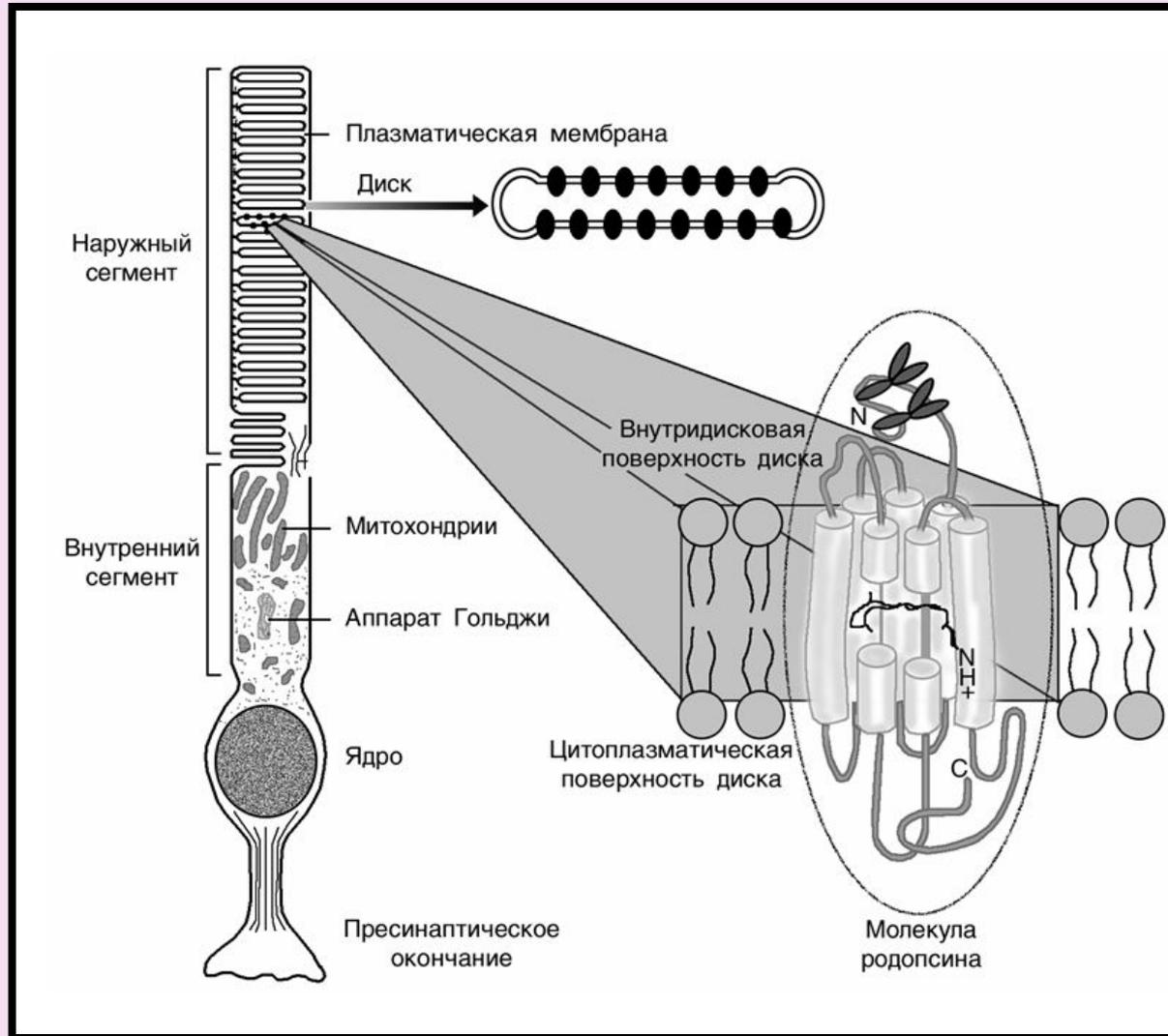
осуществляется одновременно

- изменением *кривизны, формы хрусталика*
- *перемещением хрусталика*
- *изменением кривизны роговицы*

Механическая прочность крупных глаз птиц

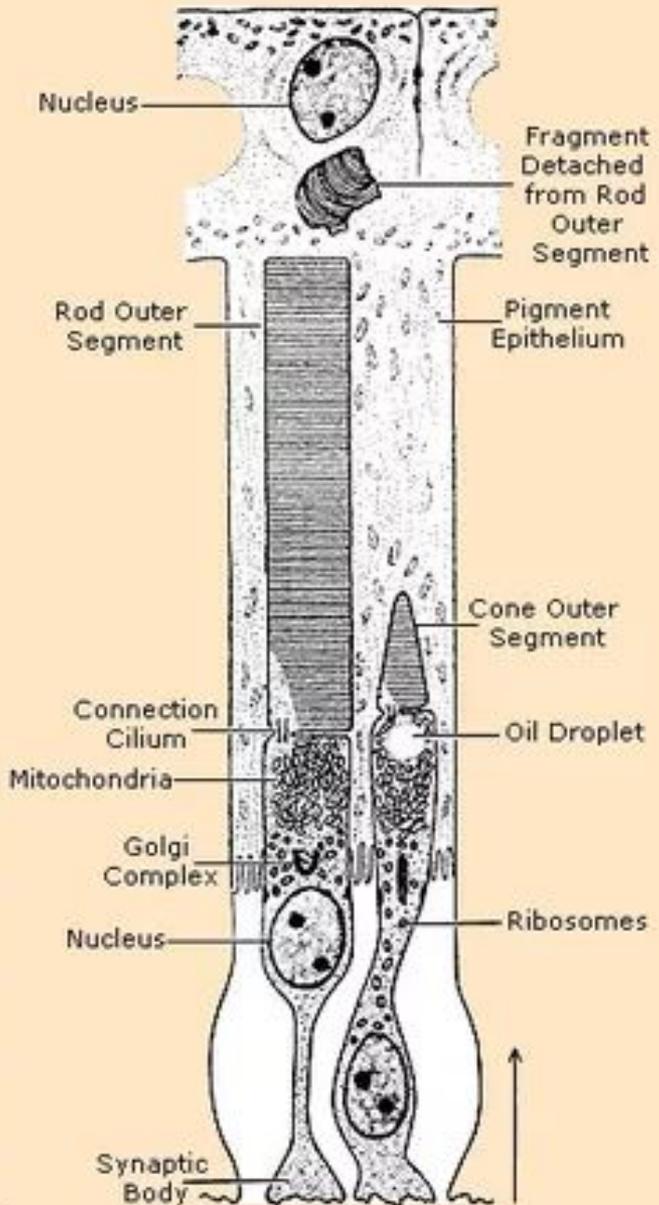
обеспечивается утолщением склеры и появлением в ней костных пластинок. Развита мигательная перепонка (третье веко),двигающаяся, непосредственно по поверхности роговицы, очищая её.

# СХЕМАТИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ПАЛОЧКИ



Схематическое изображение палочки, фоторецепторного диска наружного сегмента, фоторецепторной мембраны диска и молекулы родопсина, в центре которой находится ее хромофорная группа – 11-цис-ретиаль, ковалентно связанный с белковой частью (опсином)

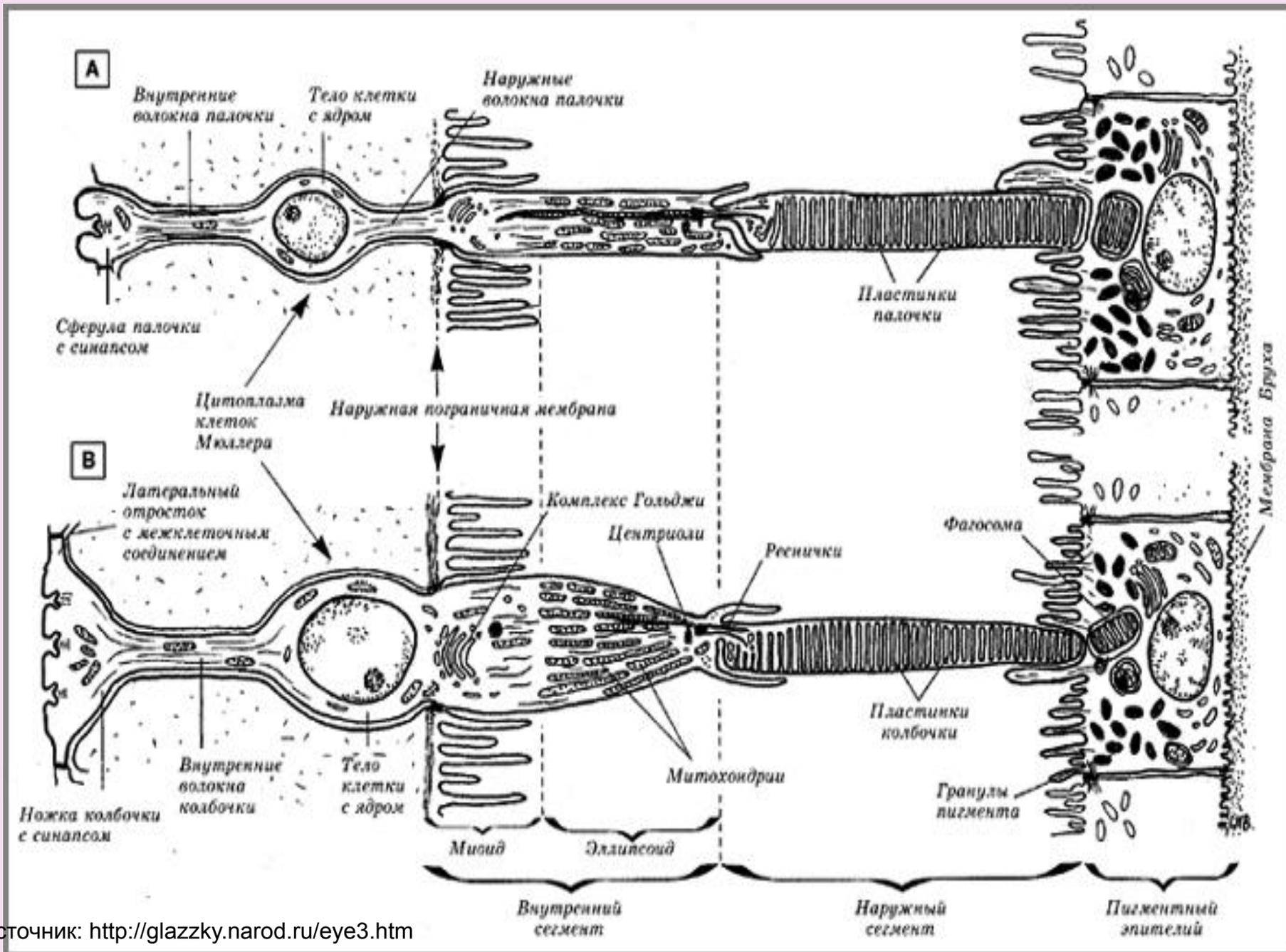
## *КОЛБОЧКИ И ПАЛОЧКИ*



from R. Young, Sci. Am. 223: 81-91 (1970)

Палочки и колбочки состоят из двух члеников — наружного и внутреннего. Наружный членик содержит зрительный пигмент, чувствительный к действию света, а внутренний имеет ядро и митохондрии, обеспечивающие энергетические процессы в клетке. Светочувствительные членики фоторецепторов обращены в сторону, противоположную свету.

# СХЕМА: СТРОЕНИЕ ПАЛОЧКИ (А) И КОЛБОЧКИ (В)



# СТРОЕНИЕ ФОТОРЕЦЕПТОРОВ



Наружные сегменты фоторецепторов

Светочувствительный членик каждой палочки представляет собой стопку тонких пластинок и дисков (от 400 до 800) диаметром 6 мкм. Каждый диск — это двойная мембрана, состоящая из двух мономолекулярных слоёв липидов, помещающихся между двумя слоями молекул белка. С молекулами белка связан ретинен, входящий в состав зрительного пигмента — родопсина, или зрительного пурпура.

# *СИСТЕМА ЗАЩИТЫ ГЛАЗ ОТ ФОТОПОВРЕЖДЕНИЯ*

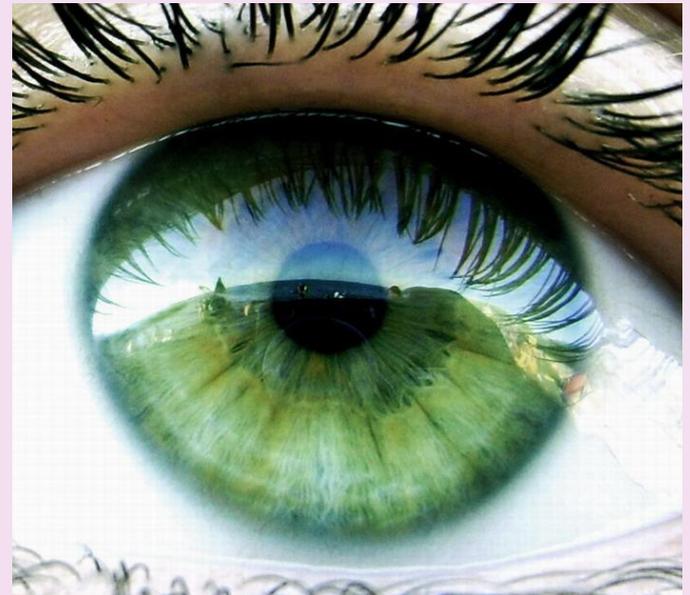
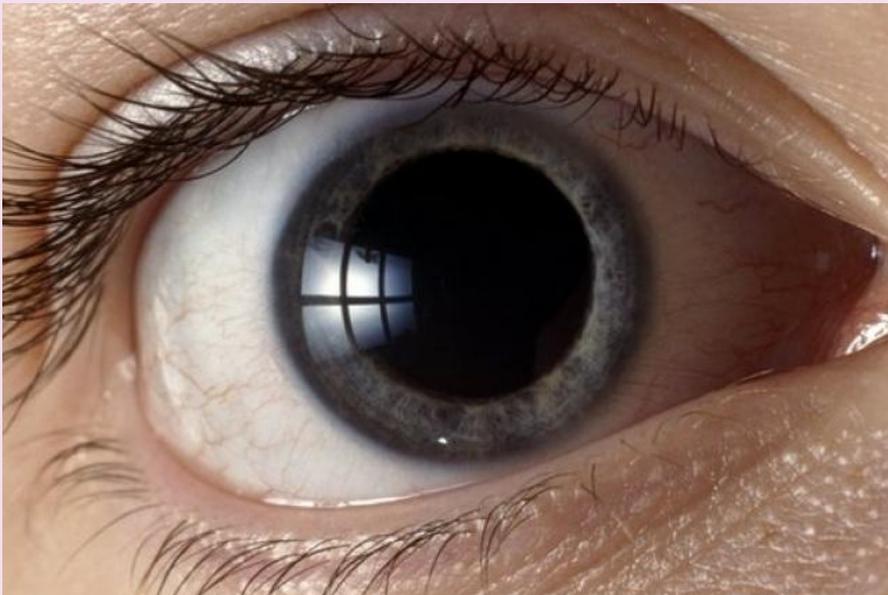
- обновление фоторецепторных мембран
- комплекс эндогенных антиоксидантов
- механизм максимально быстрого удаления свободного ретиналя из зрительной клетки
- систему оптических фильтров глаза, в которой ключевую роль играет хрусталик, желтеющий у приматов и человека с возрастом.

*ПРИ РЕЗКОМ ИЗМЕНЕНИИ ЯРКОСТИ ПРОИСХОДИТ РАЗРЫВ МЕЖДУ  
ЯРКОСТЬЮ И СОСТОЯНИЕМ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ, КОТОРЫЙ И  
СЛУЖИТ СИГНАЛОМ ДЛЯ ВКЛЮЧЕНИЯ АДАПТАЦИОННЫХ  
МЕХАНИЗМОВ*



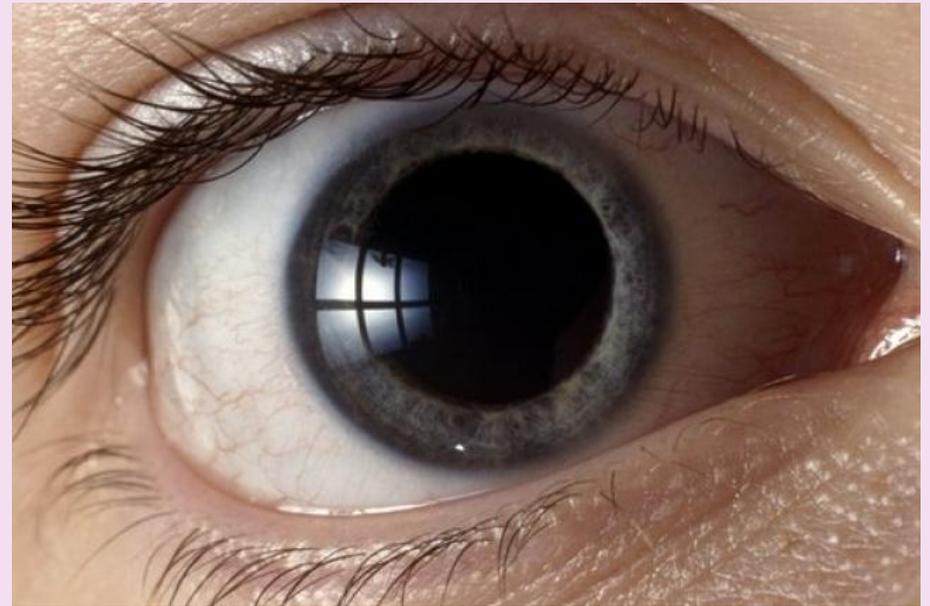
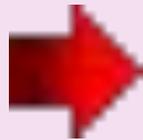
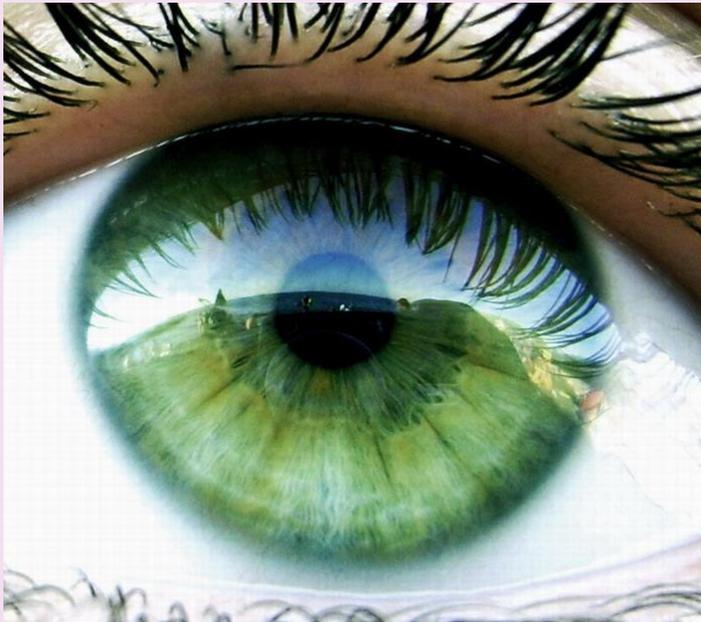
# *СВЕТОВАЯ АДАПТАЦИЯ: ПЕРЕХОД ОТ БОЛЕЕ ТЁМНОГО ОСВЕЩЕНИЯ К БОЛЕЕ ЯРКОМУ*

- Сужается зрачок.
- Выцветает зрительный пурпур палочек, их чувствительность резко падает.
- Начинают действовать колбочки.



## *ТЕМНОВАЯ АДАПТАЦИЯ: ПЕРЕХОД ОТ БОЛЕЕ ЯРКОГО ОСВЕЩЕНИЯ К БОЛЕЕ ТЁМНОМУ*

- Расширяется зрачок
- Выключаются колбочки
- Начинают работать палочки



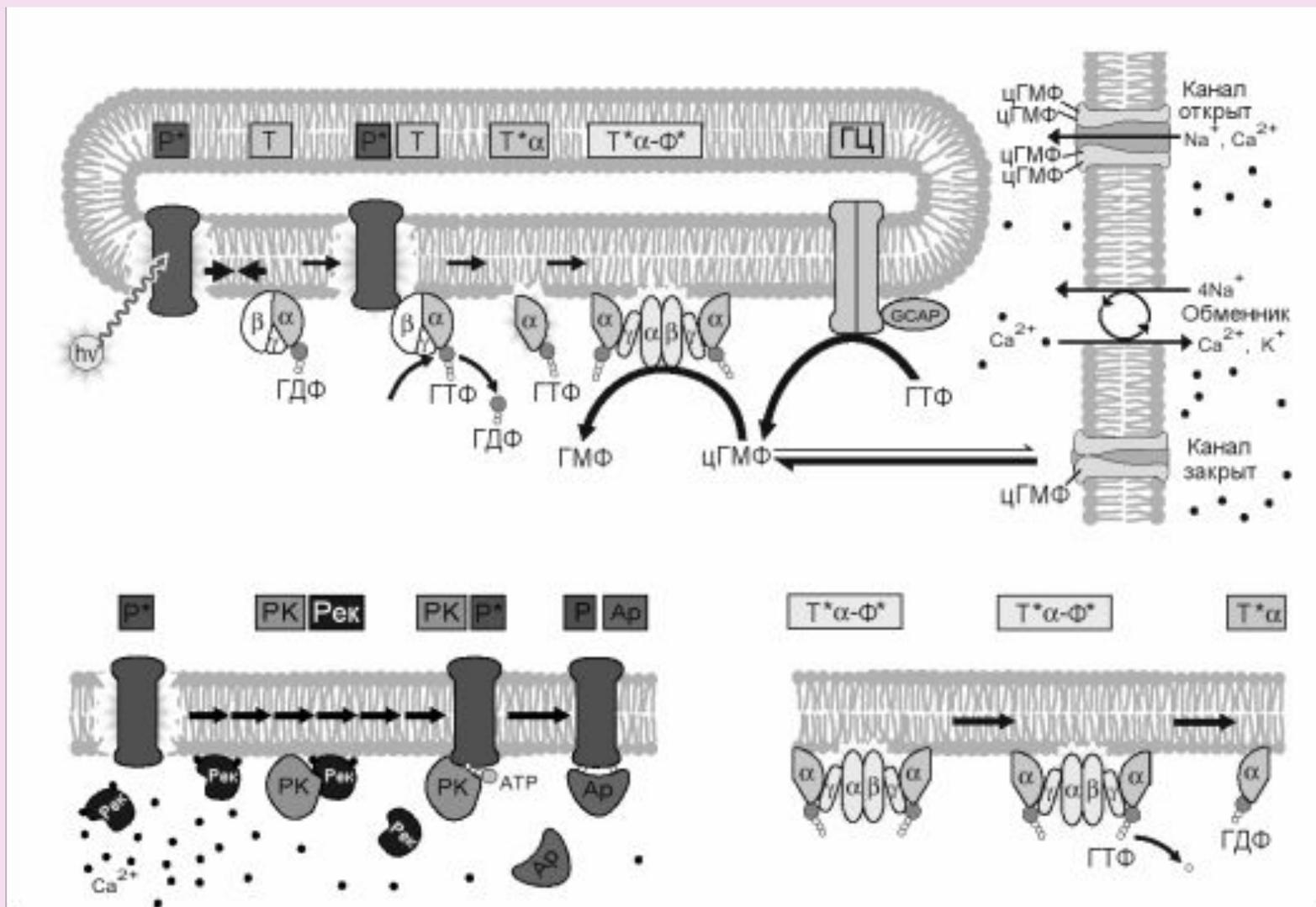
# ФОТОТРАНСДУКЦИЯ

– процесс передачи и усиления зрительного сигнала, который обеспечивается каскадом внутриклеточных реакций.

Первым звеном в цепочке передачи сигнала является пигментный белок **родопсин**, который при поглощении кванта света переходит в активную форму.

Конформационно изменённый родопсин активирует следующий белок цепи – **трансдуцин**. В результате каталитического характера активации трансдуцина достигается многократное усиление исходного сигнала. На следующем этапе активированный трансдуцин, связываясь с фосфодиэстеразой, образует комплекс, который обладает способностью к ферментативному гидролизу циклического гуанозинмонофосфата (цГМФ) до гуанозинмонофосфата (ГМФ).

# СХЕМА КАСКАДА ФОТОТРАНСДУКЦИИ



Обозначения: P – родопсин, T – трансдуцин, Ф – фосфодиэстераза, ГЦ – гуанилатциклаза, РК – родопсинкиназа, Ар – арестин, Рек - рековерин. (Источник иллюстрации - В. Ф. Лысов «Физиология и этология животных». КолоС. 2008)

# ОСНОВНЫЕ УЧАСТНИКИ ФОТОТРАНСДУКЦИИ

А) Показаны один фоторецепторный диск в наружном сегменте палочки и в нём основные белки – участники процесса трансдукции: Р – молекула родопсина, Т – молекула трансдуцина или ГТФ-связывающего белка, ФДЭ – молекула фермента фосфодиэстеразы. В цитоплазме наружного сегмента показан фермент гуанилатциклаза – ГЦ. В плазматической (клеточной) мембране палочки показан ионный канал в темновом состоянии.

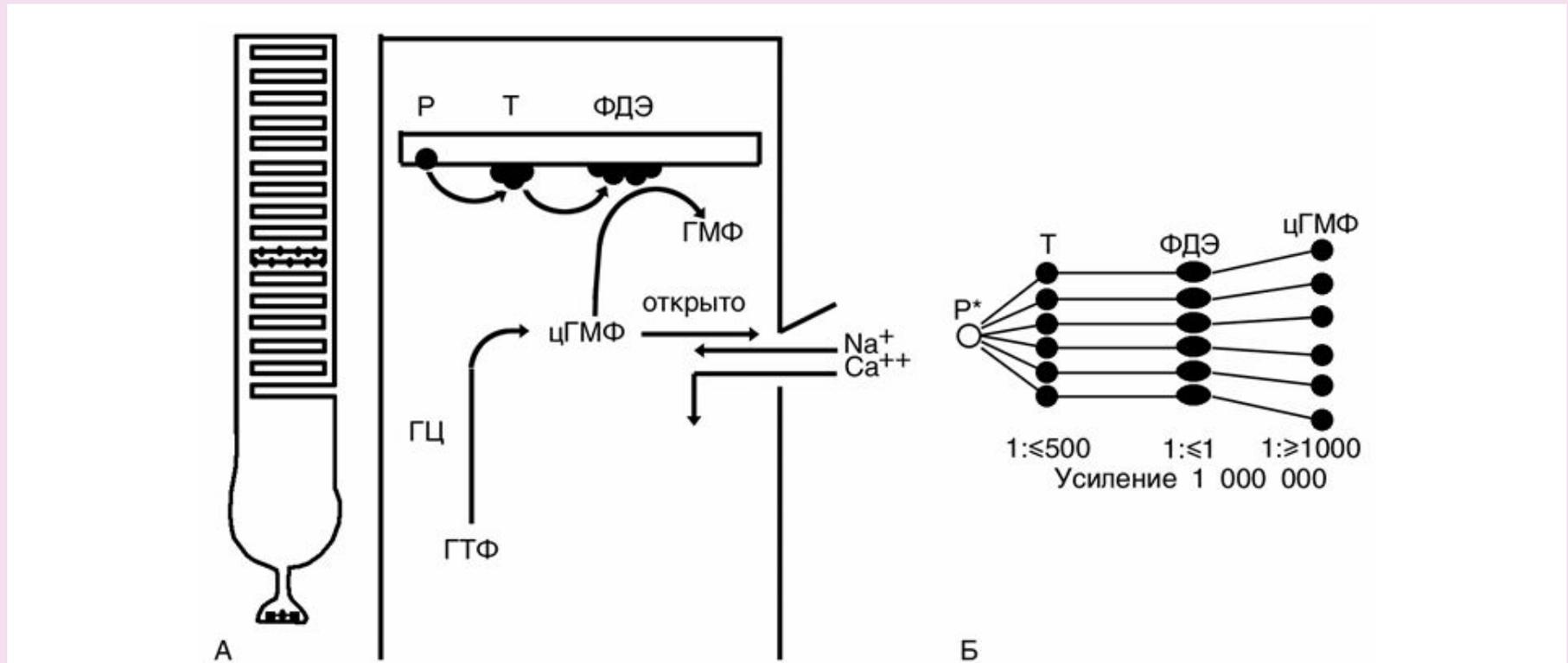
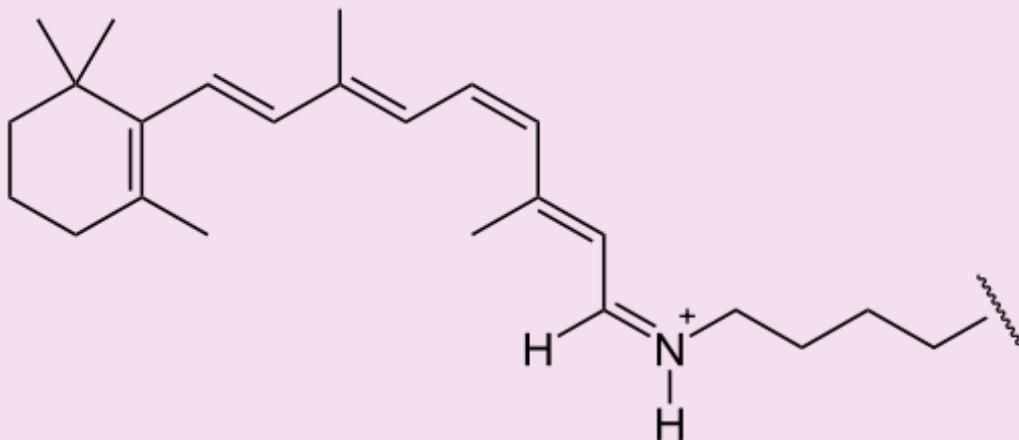


Схема процесса фототрансдукции.

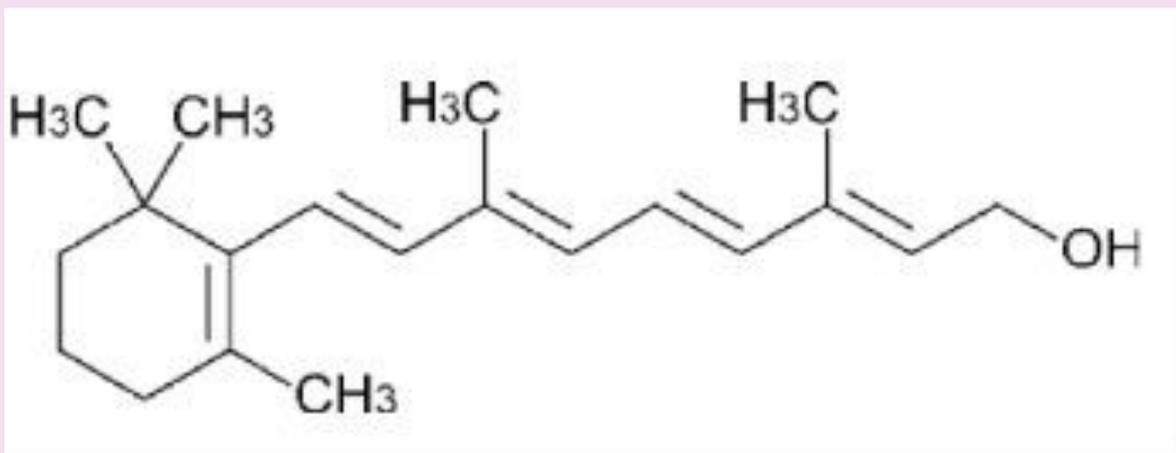
Источник: ФОТОБИОЛОГИЧЕСКИЙ ПАРАДОКС ЗРЕНИЯ. М. А. Островский

## МОЛЕКУЛЯРНЫЙ МЕХАНИЗМ ФОТОРЕЦЕПЦИИ

В сетчатке позвоночных родопсин локализован в рецепторах сумеречного зрения – палочках.



[http://vipmoloko.ru/m\\_retinol.htm](http://vipmoloko.ru/m_retinol.htm)



Витамин А, или  
ретинол.  
<http://themedicalbiochemistrypage.org/vitamins.html>

# ЭТАПЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФОТОРЕЦЕПЦИИ

- 1) Поглощение света в фоторецепторе
- 2) Фотохимическая реакция: в родопсине ретиналь образует шиффово основание
- 3) Ретиналь отщепляется от родопсина. Фотоизомеризация ретиналя
- 4) Цис-транс переход ретиналя вызывает конформационную перестройку белковой части молекулы (опсина)
- 5) При выцветании пигмента на свету ретиналь отщепляется от опсина и изомеризуется в наиболее устойчивую сплошную транс-форму
- 6) Под действием света ретиналь, находящийся в комплексе с опсином, изомеризуется, образуется прелюмиродопсин
- 7) Шиффово основание гидролизуется, и ретиналь отщепляется от опсина.