

Тема 3.1 «Орган зрения»

ВВЕДЕНИЕ. ЗРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗАТОР КАК ИНТЕГРАЛЬНАЯ СЕНСОРНАЯ СИСТЕМА

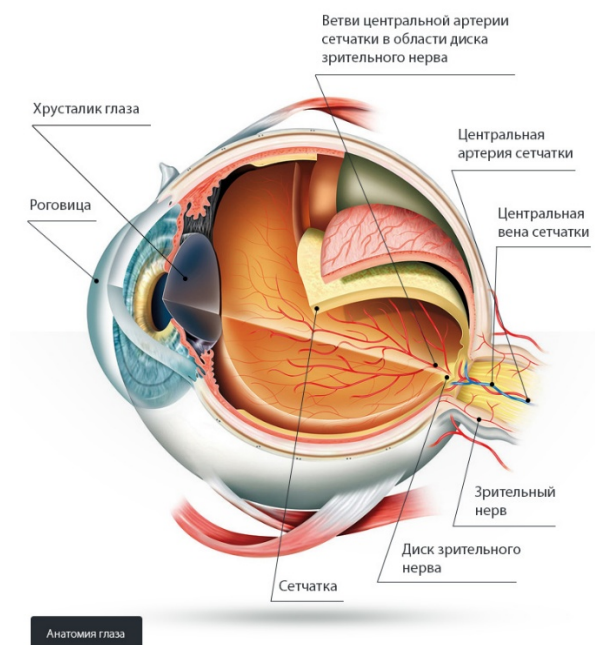


Рис. 1. Сагиттальный срез глазного яблока: топография оболочек, камер, преломляющих сред и сосудисто-нервных путей

Орган зрения (*organum visus*) представляет собой сложный парный рецепторно-оптический аппарат, обеспечивающий восприятие оптического спектра электромагнитного излучения в диапазоне длин волн приблизительно от 380 до 760 нанометров. В соответствии с классической физиологической концепцией сенсорных систем академика И. П. Павлова, орган зрения не является изолированной анатомической структурой, а представляет собой периферический отдел **зрительного анализатора**.

Согласно павловскому учению, зрительный анализатор включает три неразрывных компартмента:

1. **Периферический (рецепторный) отдел:** нейроэпителий сетчатки глазного яблока, трансформирующий квантовую энергию фотонов в рецепторный электрический потенциал.
2. **Проводниковый отдел:** аксоны ганглионарных нейроцитов сетчатки, формирующие зрительный нерв (*nervus opticus*), зрительный перекрест (*chiasma opticum*), зрительный тракт (*tractus opticus*), а также подкорковые релейные центры (латеральные коленчатые тела четверохолмия и подушки зрительного бугра) и зрительную лучистость (пучок Грасьоле).
3. **Центральный (корковый) отдел:** стриарная и экстрастриарная кора затылочной доли больших полушарий головного мозга (цитоархитектонические поля 17, 18 и 19 по Бродману), где осуществляется финальный психофизиологический гнозис — интеграция, синтез и интерпретация световых стимулов.

В эволюционном аспекте орган зрения обеспечивает получение до 85–90% всей экстероцептивной афферентации человека. Для специалистов в области «Медицинской оптики» фундаментальное осмысление архитектоники преломляющих сред, аккомодационного аппарата и вспомогательных защитных систем служит неотъемлемой теоретической базой для проектирования, расчета и квалифицированной адаптации корригирующих оптических средств.

1. АНАТОМИЧЕСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ГЛАЗНОГО ЯБЛОКА (BULBUS OCULI)

Глазное яблоко (*bulbus oculi*) располагается в костной полости — глазнице (*orbita*), окружено фасциальными оболочками, жировой клетчаткой и вспомогательными мышечными структурами. Глазное яблоко не представляет собой правильную геометрическую сферу, а состоит из двух совмещенных сферических сегментов разного радиуса кривизны: переднего, меньшего по радиусу (роговичного, $R \approx 7,7\text{--}7,8$ мм), и заднего, большего (склерального, $R \approx 12$ мм).

1.1. Биометрические и геометрические параметры

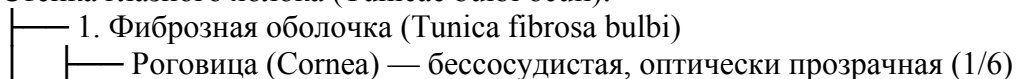
- **Полюса глаза:** передний полюс (*polus anterior*) — наивысшая точка вершины роговицы; задний полюс (*polus posterior*) — геометрический центр заднего сегмента склеры, находящийся латеральнее места выхода зрительного нерва на 2,5–3 мм.
- **Оси:**
 - *Анатомическая (геометрическая) ось* (*axis bulbi externus*) соединяет передний и задний полюса. Ее протяженность у взрослого клинически эметропичного субъекта составляет в среднем 24,0 мм (допустимые физиологические пределы: 23,0–24,5 мм).
 - *Внутренняя ось* (*axis bulbi internus*) — расстояние от задней поверхности роговицы до внутренней поверхности сетчатки ($\approx 21,5\text{--}22,0$ мм).
 - *Оптическая ось* (*axis opticus*) — прямая линия, проходящая через центры кривизны преломляющих поверхностей роговицы и хрусталика.
 - *Зрительная ось* (*axis visualis*) — функциональный луч, соединяющий точку фиксации взора в пространстве с центральной ямкой сетчатки (*fovea centralis*), проходя через узловую точку глаза. Угол между анатомической и зрительной осями обозначается как угол γ (гамма) или α (альфа) и в норме равен 3–5 градусам.
- **Экватор (*aequator*):** окружность, проходящая по поверхности глазного яблока во фронтальной плоскости на равном удалении от обоих полюсов.
- **Меридианы (*meridiani*):** полукружности, проходящие через оба полюса и пересекающие экватор под прямым углом.
- **Масса и объем:** масса глазного яблока взрослого варьирует от 7,0 до 8,0 г, объем составляет порядка 6,5–7,2 см³.

2. ОБОЛОЧКИ ГЛАЗНОГО ЯБЛОКА (TUNICAE BULBI OCULI)

Стенка глазного яблока образована тремя концентрически расположенными оболочками:

1. **Наружная (фиброзная) оболочка** (*tunica fibrosa bulbi*).
2. **Средняя (сосудистая, увеальная) оболочка** (*tunica vasculosa bulbi seu uvea*).
3. **Внутренняя (сетчатая) оболочка** (*tunica interna bulbi seu retina*).

Стенка глазного яблока (Tunicae bulbi oculi):



- Склера (Sclera) — плотная волокнистая опорная капсула (5/6)
- 2. Сосудистая оболочка (Tunica vasculosa bulbi / Uvea)
 - Радужка (Iris) — диафрагмальная функция, светорегуляция
 - Ресничное (цилиарное) тело (Corpus ciliare) — продукция внутриглазной влаги, аккомодация
 - Собственно сосудистая оболочка (Choroidea) — трофика наружных слоев сетчатки
- 3. Внутренняя оболочка (Tunica interna bulbi / Retina)
 - Пигментная часть (Pars pigmentosa)
 - Нервная часть (Pars nervosa) — 10 гистологических слоев фотосенсорного нейрозпителя

2.1. Фиброзная оболочка (Tunica fibrosa bulbi)

Фиброзная оболочка является ригидным каркасом, сохраняющим сферическую геометрию глаза, защищающим внутренние структуры от внешних механических воздействий и детерминирующим уровень гидродинамического тургора (внутриглазного давления). Подразделяется на два неравных отдела: задний, непрозрачный — **склеру** (занимает 5/6 площади), и передний, оптически прозрачный — **роговицу** (занимает 1/6 площади). Граница перехода между ними называется **лимбом роговицы** (*limbus corneae*).

2.1.1. Роговица (Cornea)

Роговица — бессосудистая прозрачная высокодифференцированная ткань. Ее диаметр в среднем составляет 11,0–11,5 мм по горизонтали и 10,0–10,5 мм по вертикали. Толщина в оптическом центре равна 0,52–0,56 мм (520–560 мкм), на периферии достигает 1,0–1,2 мм. Преломляющая сила роговицы составляет приблизительно 40,0–43,0 диоптрий (дптр), что обеспечивает более 70% суммарной рефракционной силы глаза.

Роговица состоит из 5 канонических слоев:

Строение роговицы

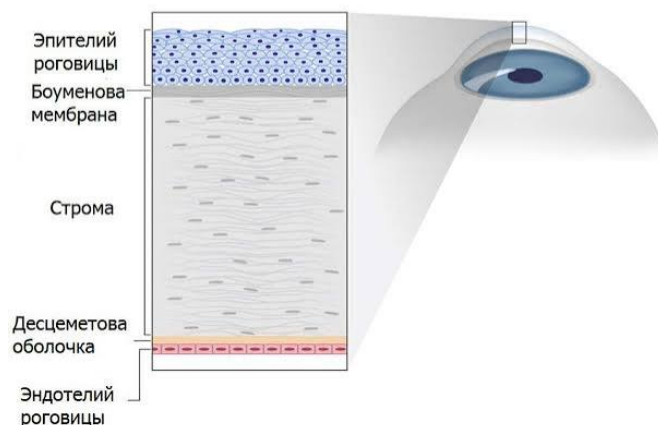


Рис. 2. Микроструктура роговицы: 1 — передний эпителий; 2 — боуменова оболочка; 3 — строма; 4 — десцеметова оболочка; 5 — задний эндотелий.

1. **Передний эпителий роговицы (*epithelium anterius corneae*):** многослойный плоский неороговевающий эпителий толщиной 50 мкм (5–6 рядов клеток). Базальный слой представлен камбиальными цилиндрическими клетками с высокой митотической активностью, обеспечивающими полную регенерацию слоя за 48–72

часа. Поверхностные клетки имеют микроворсинки, удерживающие прекорнеальную слезную пленку.

2. **Передняя пограничная пластинка (боуменова оболочка, *lamina limitans anterior*):** бесклеточный слой толщиной 10–14 мкм, состоящий из беспорядочно ориентированных тонких фибрилл коллагена I и V типов. Не обладает способностью к истинной регенерации; при ее травматизации формируются субэпителиальные фиброзные помутнения (бельма).
3. **Собственное вещество роговицы (строма, *substantia propria corneae*):** формирует до 90% общей толщины ткани. Образовано строго параллельными ламеллами (пластинками, около 200–250 слоев), построенными из фибрилл коллагена I и IV типов, погруженных в аморфный полианионный матрикс, обогащенный гликозаминогликанами (кератансульфат, дерматансульфат). Клетки стромы представлены кератоцитами (модифицированными фибробластами). *Физиологический феномен прозрачности стромы (теория Мориса):* Прозрачность обусловлена правильной решетчатой упаковкой фибрилл, расстояние между которыми меньше половины длины волны видимого света ($d < \lambda/2$), что ведет к деструктивной интерференции рассеянного излучения. Состояние прозрачности критически зависит от степени гидратации стромы (норма — 78% воды).
4. **Задняя пограничная пластинка (десцеметова оболочка, *lamina limitans posterior*):** базальная мембрана заднего эпителия толщиной 10–12 мкм. Состоит из атипичного коллагена VIII типа, характеризуется колоссальной механической резистентностью и устойчивостью к химическим и бактериальным протеазам.
5. **Задний эпителий роговицы (эндотелий, *epithelium posterius corneae*):** монослой строго гексагональных клеток толщиной 4–5 мкм. Клетки не делятся (митозы блокированы в G_1 -фазе), с возрастом их плотность падает с 3500 кл/мм² при рождении до 2000–2500 кл/мм² у взрослых (критический порог decompensation — 800 кл/мм²). Эндотелиоциты содержат мощный ферментативный аппарат (Na^+/K^+ -АТФазы, карбоангидразы), постоянно откачивающий избыток воды и катионов из стромы в переднюю камеру глаза, поддерживая состояние физиологического обезвоживания (детургесценции).

2.1.2. Склера (Sclera)

Склера («белочная оболочка») — непрозрачная, плотная соединительнотканная капсула толщиной от 0,3–0,4 мм в зоне прикрепления прямых мышц до 1,0–1,2 мм в перипапиллярной области. В отличие от роговицы, коллагеновые пучки в склере ориентированы хаотично, имеют неодинаковый калибр и сниженное содержание сульфатированных гликозаминогликанов, что исключает ее прозрачность.

В склере дифференцируют 3 слоя:

- **Эписклеральный слой (*lamina episcleralis*):** рыхлая васкуляризированная оболочка, соединенная с влагалищем глазного яблока (фасцией Тенона).
- **Собственное вещество склеры (*substantia propria sclerae*):** основной каркас из грубых коллагеновых пучков и единичных эластических волокон.
- **Бурая пластинка склеры (*lamina fusca sclerae*):** внутренний слой, содержащий меланоциты, граничащий с перихориоидальным пространством (*spatium perichoroideale*).

В заднем полюсе склера истончается и решетчато продырявливается, формируя **решетчатую пластинку склеры (*lamina cribrosa sclerae*)**, сквозь которую проходят аксоны ганглионарных клеток зрительного нерва и центральные сосуды сетчатки.

Решетчатая пластинка — зона наименьшего сопротивления перепадам внутриглазного давления, подвергающаяся компрессионной деформации (экскавации) при глаукоме.

2.2. Сосудистая оболочка (Увеальный тракт, *Tunica vasculosa bulbi* / Uvea)

Средняя оболочка глаза эмбриогенетически и функционально представляет собой богато васкуляризированный и пигментированный тракт мезодермального происхождения. Анатомически подразделяется на 3 отдела: передний (радужка), средний (ресничное тело) и задний (собственно сосудистая оболочка, или хориоидея).

2.2.1. Радужка (*Iris*)

Радужка представляет собой тонкую подвижную диафрагму толщиной 0,2–0,4 мм с круглым отверстием в центре — **зрачком** (*pupilla*). Регулирует поток света на сетчатку (диафрагмирование), отсекая сферические и хроматические аберрации оптической системы.

Диаметр зрачка в нормальных условиях варьирует от 1,5–2,0 мм при ярком свете до 7,5–8,0 мм в условиях темновой адаптации. Передняя поверхность радужки разделена зубчатым валиком (коллареткой) на внутренний зрачковый пояс (*anulus iridis minor*) и наружный ресничный пояс (*anulus iridis major*).

Гистологически радужка состоит из двух листков:

1. **Передний мезодермальный (стромальный) листок:** включает передний пограничный слой и васкуляризованную строму. Содержит отростчатые пигментные клетки — меланоциты. Количество и глубина залегания пигмента меланина определяют фенотипический цвет радужки: при минимуме меланина свет рассеивается в строме по закону Рэлея, придавая глазу голубой или серый цвет; при избытке меланина радужка приобретает темно-коричневый или черный цвет.
2. **Задний эктодермальный (нейроэпителиальный) листок:** состоит из двух рядов интенсивно пигментированных клеток, продолжающихся от эмбрионального глазного бокала.

Миоархитектоника зрачкового аппарата:

- **Сфинктер зрачка (*m. sphincter pupillae*):** кольцевидная мышца, расположенная концентрически вокруг зрачкового края. Получает парасимпатическую иннервацию от добавочного ядра глазодвигательного нерва (ядра Якубовича–Эдингера–Вестфала) в составе III пары ЧН. Сокращение вызывает сужение зрачка (**миоз**, *myosis*).
- **Дилататор зрачка (*m. dilatator pupillae*):** радиально ориентированные миоэпителиальные волокна. Получает симпатическую иннервацию из цилиоспинального центра Будге (C_8-Th_2) через верхний шейный симпатический ганглий. Сокращение вызывает расширение зрачка (**мидриаз**, *mydriasis*).

2.2.2. Ресничное (цилиарное) тело (*Corpus ciliare*)

Ресничное тело — утолщенная часть сосудистого тракта в форме замкнутого кольца шириной 5,5–6,5 мм. На сагиттальном сечении имеет треугольную форму. Выполняет две фундаментальные функции: ультрафильтрацию водянистой влаги и осуществление механизма аккомодации.

Топографически разделяется на:

- **Ресничную корону (*corona ciliaris*):** передняя складчатая часть шириной 2 мм, несущая 70–80 ресничных отростков (*processus ciliares*).

- **Ресничный кружок (*orbiculus ciliaris*):** задняя гладкая плоская часть шириной около 4 мм, переходящая в зубчатый край (*ora serrata*).

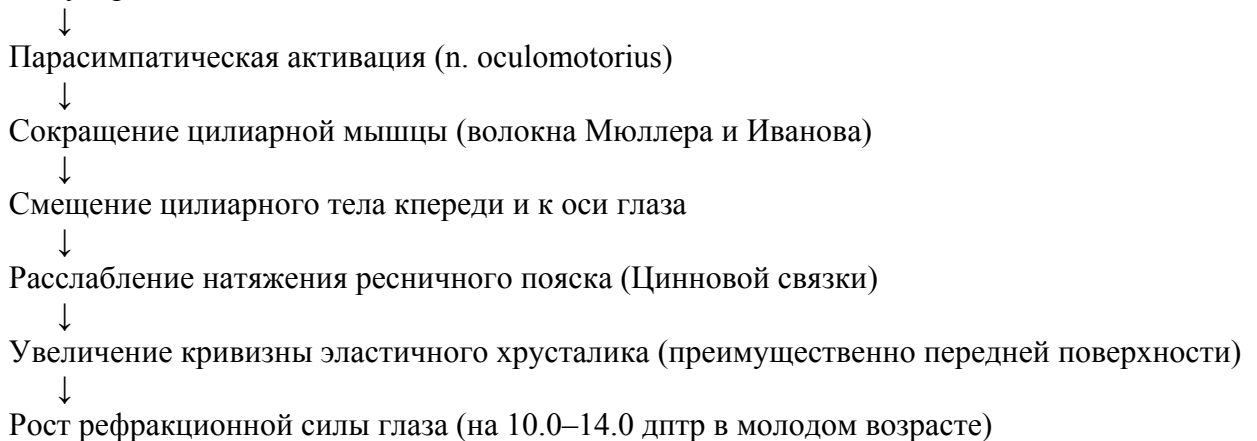
Секреторный аппарат: Отростки покрыты двухслойным эпителием (внутренний слой — беспигментный, функционально активный; наружный — пигментный). Клетки беспигментного эпителия содержат базолатеральные инвагинации мембраны с высокой концентрацией Na^+/K^+ -АТФазы и карбоангидразы II типа, обеспечивая непрерывную секрецию водянистой влаги со скоростью 2,0–2,5 мкл/мин.

Мышечный аппарат (цилиарная мышца, *m. ciliaris*): Состоит из гладких мышечных клеток, ориентированных в трех направлениях:

1. **Меридиональные волокна (мышца Брюкке):** наружный слой; прикрепляются к склеральной шпоре; при сокращении натягивают трабекулярный аппарат, открывая межтрабекулярные щели и способствуя оттоку водянистой влаги.
2. **Радиальные волокна (мышца Иванова):** средний слой; обеспечивают сочетанную деформацию отростков.
3. **Циркулярные волокна (мышца Мюллера):** внутренний слой; формируют подобие сфинктера.

МЕХАНИЗМ АККОМОДАЦИИ ПО ГЕЛЬМГОЛЬЦУ:

Фокусировка на близкий объект



2.2.3. Собственно сосудистая оболочка (*Choroidea*)

Хориоида простирается от зубчатого края (*ora serrata*) до зрительного нерва. Образована густой сетью кровеносных сосудов и капилляров, погруженных в соединительнотканную строму с обильным включением меланоцитов, поглощающих рассеянные лучи и предотвращающих их внутреннее переотражение (эффект темной камеры).

Гистологические слои хориоидеи (изнутри кнаружи):

1. **Базальный комплекс (мембрана Бруха, *complexus basalis*):** пятислойная бесклеточная пластинка толщиной 2–4 мкм, выполняющая роль высокоселективного барьера между хориоидеей и пигментным эпителием сетчатки.
2. **Хориокапиллярная пластинка (*lamina choroideocapillaris*):** слой широких капилляров синусоидного типа с фенестрированным эндотелием. Обеспечивает трофику и оксигенацию наружных бессосудистых слоев сетчатки (включая фоторецепторы).
3. **Сосудистая пластинка (*lamina vasculosa*):** состоит из двух слоев сосудов:
 - *Слой Заттлера:* мелкие артериолы и вены.
 - *Слой Галлера:* крупные артериальные и венозные стволы.

4. **Надсосудистая пластинка (*lamina suprachorioidea*):** переходная эластическая зона, прилежащая к склере.

2.3. Внутренняя (сетчатая) оболочка (*Tunica interna bulbi / Retina*)

Сетчатка — тонкая высокодифференцированная нервная пластинка нейроэктодермального генеза, развивающаяся из стенок глазного бокала. Топографически подразделяется на:

- **Зрительную часть (*pars optica retinae*):** содержит функциональные фоторецепторы, выстилает задний сегмент до зубчатого края (*ora serrata*).
- **Слепую часть (*pars caeca retinae*):** лишена фоторецепторов, покрывает внутреннюю поверхность цилиарного тела (*pars ciliaris*) и радужки (*pars iridica*).

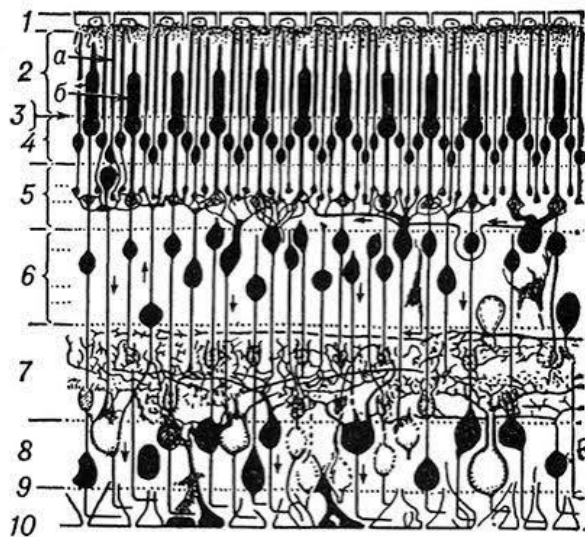


Рис. 3. Схема цитоархитектоники сетчатки: от пигментного эпителия (1) до слоя нервных волокон (9) и внутренней пограничной мембраны (10).

2.3.1. Цитоархитектоника сетчатки: 10 микроскопических слоев

Сетчатка инвертированного типа: свет должен пройти сквозь все слои нейронов, прежде чем достигнет наружных сегментов светочувствительных палочек и колбочек.

Снаружи внутрь выделяют 10 слоев:

1. **Пигментный слой (*stratum pigmentosum*):** монослой полигональных клеток, тесно контактирующий с мембраной Бруха. Фагоцитирует слущивающиеся диски наружных сегментов фоторецепторов, обеспечивает транспорт витамина А, метаболизм ретиноидов и поглощение избытка света.
2. **Фотосенсорный слой (слой палочек и колбочек, *stratum neuroepitheliale*):** наружные и внутренние сегменты фоторецепторных клеток. Палочки (~ 110–125 млн) отвечают за сумеречное (скотопическое) зрение с высокой светочувствительностью; колбочки (~ 6–7 млн) обеспечивают дневное (фотопическое) и цветовое зрение высокой разрешающей способности.
3. **Наружная пограничная мембрана (*stratum limitans externum*):** полоса плотных контактов (*zonula adherens*) между фоторецепторами и глиоцитами Мюллера.
4. **Наружный ядерный слой (*stratum nucleare externum*):** содержит тела и ядра палочек и колбочек.

5. **Наружный сетчатый (плексиформный) слой (*stratum plexiforme externum*):** зона синаптических контактов между терминалиями фоторецепторов (сферилами палочек и ножками колбочек), биполярными и горизонтальными нейронами.
6. **Внутренний ядерный слой (*stratum nucleare internum*):** содержит ядра четырех типов клеток: биполярных, горизонтальных, амакриновых нейронов и опорных клеток радиальной глии Мюллера.
7. **Внутренний сетчатый (плексиформный) слой (*stratum plexiforme internum*):** зона синаптических взаимодействий между аксонами биполяров, отростками амакриновых клеток и дендритами ганглионарных нейроцитов.
8. **Ганглионарный слой (*stratum ganglionicum*):** монослой крупных мультиполярных ганглионарных клеток (около 1,0–1,2 млн).
9. **Слой нервных волокон (*stratum neurofibrarum*):** немиелинизированные аксоны ганглионарных клеток, направляющиеся к диску зрительного нерва.
10. **Внутренняя пограничная мембрана (*stratum limitans internum*):** базальная мембрана, сформированная ножками мюллеровских клеток, ограничивающая сетчатку от стекловидного тела.

2.3.2. Топографические зоны специального назначения

- **Желтое пятно (*macula lutea*):** аваскулярная зона диаметром около 5,5 мм в височной половине сетчатки. Содержит каротиноидные пигменты лютеин и зеаксантин, фильтрующие коротковолновый токсичный синий свет.
- **Центральная ямка (*fovea centralis*):** углубление в центре макулы диаметром 1,5 мм. В центральной зоне (фовеоле, $d = 0,35$ мм) все вышележащие слои сетчатки сдвинуты к периферии (явление экскавации сетчатки), благодаря чему свет падает непосредственно на наружные сегменты колбочек. В фовеоле плотность колбочек максимальна ($\approx 150\,000\text{--}200\,000$ на мм^2), палочки отсутствуют. Каждая колбочка фовеолы контактирует с одной изолированной карликовой биполярной клеткой, которая передает сигнал на одну карликовую ганглионарную клетку (соотношение 1:1:1), что обуславливает максимальную пространственную разрешающую способность глаза (остроту зрения).
- **Диск зрительного нерва (*discus nervi optici*):** округлое образование диаметром 1,5–1,8 мм в назальном секторе сетчатки. Место слияния всех аксонов ганглионарных клеток, формирующих зрительный нерв. Лишен фоторецепторов, в связи с чем в поле зрения формируется физиологическая абсолютная слепота — слепое пятно Мариотта.

3. ВНУТРЕННЕЕ СОДЕРЖИМОЕ ГЛАЗНОГО ЯБЛОКА (ПРЕЛОМЛЯЮЩИЕ СРЕДЫ И КАМЕРЫ)

К внутреннему содержанию глаза относятся структуры, входящие в диоптрический аппарат: водянистая влага, хрусталик и стекловидное тело.

Диоптрический аппарат глаза:

1. Роговица: $\sim 40.0\text{--}43.0$ дптр (основной статический преломляющий элемент)
 2. Водянистая влага: $n = 1.336$ (камеры глаза)
 3. Хрусталик: $\sim 19.0\text{--}20.0$ дптр в покое, до ~ 33.0 дптр при аккомодации ($n_{\text{ядра}} = 1.406$)
 4. Стекловидное тело: $n = 1.336$ (опорный гидрогель)
- Суммарная оптическая сила редуцированного глаза Гульстранда: ~ 58.64 дптр (в покое)

3.1. Камеры глаза и гидродинамика водянистой влаги (Humor aquosus)

- **Передняя камера (*camera anterior bulbi*):** пространство, ограниченное спереди задней поверхностью роговицы, сзади — передней поверхностью радужки и

центральной зоной передней капсулы хрусталика. Глубина в центре составляет 3,0–3,5 мм, объем — около 0,22 мл.

- **Задняя камера (*camera posterior bulbi*):** щелевидное пространство, ограниченное спереди задней поверхностью радужки, снаружи — цилиарным телом, сзади — передней поверхностью стекловидного тела и связочным аппаратом хрусталика. Объем — около 0,06 мл.

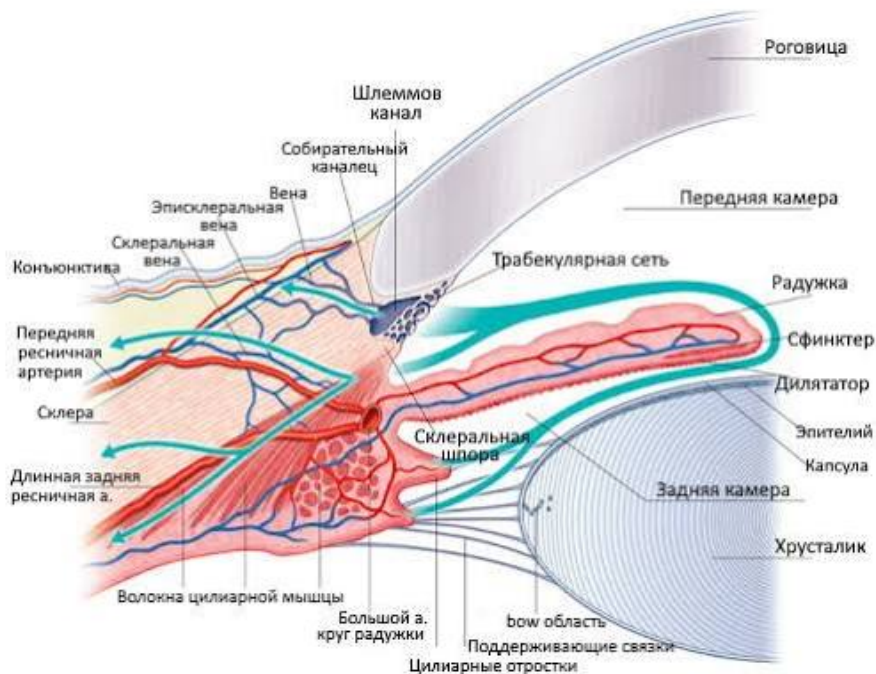


Рис. 4. Анатомия угла передней камеры: трабекулярная сеть, шлеммов канал и коллекторные каналы дренажной системы.

Дренажная система угла передней камеры (*angulus iridocornealis*): Угол передней камеры (УПК) — ключевая зона оттока внутриглазной жидкости. Отток осуществляется по двум путям:

1. **Трабекулярный (традиционный) путь (85–90% оттока):**
 - Влага из задней камеры через зрачок поступает в переднюю камеру.
 - Фильтруется через трабекулярную сеть (*reticulum trabeculare*), состоящую из трех частей: увеальной, корнеосклеральной и юстаканаликулярной ткани.
 - Проходит через эндотелиальную стенку **венозного синуса склеры (шлеммова канала, *sinus venosus sclerae*)**.
 - Из шлеммова канала оттекает по 25–35 коллекторным канальцам в эписклеральные венозные сплетения.
2. **Увеосклеральный путь (нетрадиционный, 10–15% оттока):** влага диффундирует через интерстиций цилиарной мышцы в супрахориоидальное пространство и выводится через склеру.

Баланс продукции влаги (2,0 мкл/мин) и ее оттока определяет **внутриглазное давление** (ВГД, *tensio intraocularis*), норма которого составляет 10–21 мм рт. ст. (по Гольдману) или 16–26 мм рт. ст. (тонометрия по Маклакову).

3.2. Хрусталик (Lens)

Хрусталик — двояковыпуклая бессосудистая, оптически прозрачная линза. Диаметр у взрослого составляет 9,0–10,0 мм, толщина — 3,6–4,5 мм (увеличивается при аккомодации). Радиус кривизны передней поверхности в покое — 10,0 мм, задней — 6,0 мм.

Строение хрусталика:

1. **Капсула (*capsula lentis*):** эластическая бесклеточная базальная мембрана, содержащая коллаген IV типа.
2. **Субкапсулярный эпителий:** монослой кубических клеток, выстилающий только переднюю капсулу. В экваториальной зоне клетки дифференцируются в волокна хрусталика.
3. **Вещество хрусталика (*substantia lentis*):** дифференцировано на более плотное центральное **ядро (*nucleus lentis*)** и наружную **кору (*cortex lentis*)**. Образовано шестигранными волокнами хрусталика (*fibrae lentis*), лишенными органелл и заполненными прозрачными белками — **кристаллинами (α, β, γ)**. Белки кристаллины не обновляются на протяжении жизни, подвергаясь с возрастом фотохимической денатурации и агрегации с развитием катаракты.

Хрусталик подвешен к цилиарному телу с помощью **ресничного пояска (цинновой связки, *zonula ciliaris*)**.

3.3. Стекловидное тело (Corpus vitreum)

Стекловидное тело представляет собой прозрачный бессосудистый гидрогель объемом около 4,0 мл, заполняющий 80% объема глаза. Состоит на 98,8–99,0% из воды, связанной каркасом из нерастворимых коллагеновых фибрилл (преимущественно коллаген II и IX типов) и молекул гиалуроновой кислоты. Клетки стекловидного тела — гиалоциты — локализуются в кортикальном слое и синтезируют гиалуроновую кислоту. По центру стекловидного тела проходит гиалоидный (клокетов) канал (*canalis hyaloideus*) — остаток эмбриональной артерии стекловидного тела.

4. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ ГЛАЗА (ORGANA OCULI ACCESSORIA)

Вспомогательный аппарат обеспечивает локомоцию, механическую защиту, смазку и трофику оптических поверхностей глазного яблока. Включает: глазодвигательный аппарат, веки, конъюнктиву, слезный аппарат и стенки глазницы.

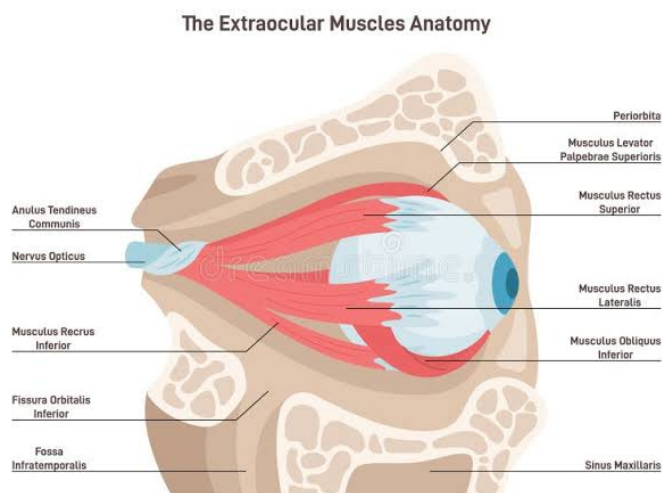


Рис. 5. Экстраокулярные мышцы глаза: 1 — верхняя прямая; 2 — нижняя прямая; 3 — медиальная прямая; 4 — латеральная прямая; 5 — верхняя косая (через блок); 6 — нижняя косая.

4.1. Двигательный аппарат (Musculi externi bulbi oculi)

Движения глазного яблока осуществляются 6 экстраокулярными поперечнополосатыми мышцами: 4 прямыми и 2 косыми. Все мышцы, за исключением нижней косой, берут начало в глубине глазницы от общего сухожильного кольца Цинна (*anulus tendineus communis*), окружающего зрительный канал.

Таблица 1. Экстраокулярные мышцы глаза: топография, иннервация и биомеханика

Мышца (латинское наименование)	Точка прикрепления к склере	Иннервация (Черепной нерв)	Основное действие (первичное)	Вторичные действия
Верхняя прямая (<i>m. rectus superior</i>)	Склера кпереди от экватора (7,5 мм от лимба)	III пара (<i>n. oculomotorius</i>)	Элевация (подъем кверху)	Инторсия (поворот кнутри), аддукция
Нижняя прямая (<i>m. rectus inferior</i>)	Склера кпереди от экватора (6,5 мм от лимба)	III пара (<i>n. oculomotorius</i>)	Депрессия (опускание книзу)	Эксторсия (поворот кнаружи), аддукция
Медиальная прямая (<i>m. rectus medialis</i>)	Склера кпереди от экватора (5,5 мм от лимба)	III пара (<i>n. oculomotorius</i>)	Аддукция (поворот кнутри / к носу)	Отсутствуют
Латеральная прямая (<i>m. rectus lateralis</i>)	Склера кпереди от экватора (7,0 мм от лимба)	VI пара (<i>n. abducens</i>)	Абдукция (поворот кнаружи / к виску)	Отсутствуют
Верхняя косая (<i>m. obliquus superior</i>)	Проходит блок (<i>trochlea</i>), позади экватора	IV пара (<i>n. trochlearis</i>)	Инторсия (вращение по часовой стрелке для правого глаза)	Депрессия (опускание), абдукция
Нижняя косая (<i>m. obliquus inferior</i>)	Начинается от дна орбиты; позади экватора	III пара (<i>n. oculomotorius</i>)	Эксторсия (вращение против часовой стрелки для правого глаза)	Элевация (подъем), абдукция

Биомеханика содружественных движений подчиняется **закону Геринга** (равная одновременная иннервация мышц-синергистов обоих глаз) и **закону Шеррингтона** (реципрокная иннервация мышц-антагонистов: сокращение одной мышцы сопровождается пропорциональным расслаблением ее прямого антагониста).

4.2. Веки (Palpebrae) и соединительная оболочка (Tunica conjunctiva)

- **Веки (*palpebra superior et inferior*):** подвижные кожно-мышечно-хрящевые складки. Основой служит тарзальная пластинка (хрящ века, *tarsus*), состоящая из плотной волокнистой соединительной ткани. В толще тарзуса залегают видоизмененные сальные **мейбомиевы железы (*glandulae tarsales*)**, выводные протоки которых открываются по свободному краю век. Их липидный секрет

образует наружный слой слезной пленки. Мышца, поднимающая верхнее веко (*m. levator palpebrae superioris*), иннервируется III парой ЧН; круговая мышца глаза (*m. orbicularis oculi*), обеспечивающая смыкание век, иннервируется VII парой ЧН (*n. facialis*).

- **Конъюнктива (*tunica conjunctiva*):** тонкая прозрачная слизистая оболочка. Выделяют конъюнктиву век (*tunica conjunctiva palpebrarum*), конъюнктиву переходных складок (верхнего и нижнего сводов, *fornix conjunctivae superior et inferior*) и конъюнктиву глазного яблока (*tunica conjunctiva bulbi*). Эпителий конъюнктивы содержит бокаловидные клетки Бехера, секретирующие муцин.

4.3. Слезный аппарат (*Apparatus lacrimalis*)

Слезный аппарат подразделяется на слезопroduцирующий и слезоотводящий отделы:

1. **Слезопroduцирующий отдел:** включает главную слезную железу (*glandula lacrimalis*), расположенную в одноименной ямке верхне-латерального угла глазницы, и добавочные микржелезы Краузе и Вольфринга в сводах конъюнктивы.
2. **Слезотводящий отдел:** слезный ручей → слезное озеро (*lacus lacrimalis*) у медиального угла → верхняя и нижняя слезные точки (*puncta lacrimalia*) → слезные канальцы (*canaliculi lacrimales*) → слезный мешок (*saccus lacrimalis*) → носослезный проток (*ductus nasolacrimalis*), открывающийся в нижний носовой ход.

Физиологическое значение слезной пленки: Толщина составляет 7–10 мкм. Состоит из трех слоев:

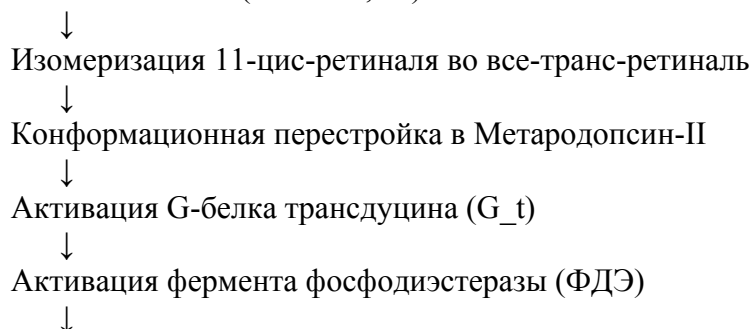
- *Липидный слой (0,1 мкм):* секрет мейбомиевых желез; предотвращает испарение водного компонента.
- *Водный слой (7 мкм):* секрет слезных желез; содержит воду, электролиты, лизоцим, лактоферрин, иммуноглобулины (IgA); обеспечивает трофику и оксигенацию аваскулярного эпителия роговицы.
- *Муциновый слой (0,02–0,05 мкм):* секрет бокаловидных клеток; гидрофилизует гидрофобный эпителий роговицы, обеспечивая стабильное растекание слезной жидкости.

5. ФИЗИОЛОГИЯ ФОТОРЕЦЕПЦИИ И ПРОВОДЯЩИЙ ПУТЬ ЗРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗАТОРА

5.1. Биохимический каскад фототрансдукции (Каскад Уолда)

В наружных сегментах палочек содержится зрительный пигмент **родопсин** (молекулярная масса ≈ 40 кДа), состоящий из белка опсина и хромофорной группы — 11-*цис*-ретиная (альдегида витамина А).

КВАНТ СВЕТА (ФОТОН, $h\nu$)



Гидролиз циклического гуанозинмонофосфата (цГМФ → 5'-ГМФ)

↓
Падение концентрации цГМФ в цитоплазме

↓
Закрытие цГМФ-зависимых Na⁺/Ca²⁺-каналов наружной мембраны

↓
ПРЕКРАЩЕНИЕ «ТЕМНОВОГО ТОКА» И ГИПЕРПОЛЯРИЗАЦИЯ МЕМБРАНЫ (от -40 мВ до -70 мВ)

↓
Снижение выделения тормозного медиатора (глутамата) в синаптическую щель

↓
ДЕПОЛЯРИЗАЦИЯ И ВОЗБУЖДЕНИЕ БИПОЛЯРНЫХ НЕЙРОНОВ (ОН-биполяров)

В колбочках фотохимический каскад протекает аналогично, однако фотопигменты (йодопсины трех типов) содержат различные модификации белка фотопсина, обеспечивая спектральную чувствительность в трех зонах:

- **S-колбочки (Short-wave):** максимум поглощения ≈ 420 нм (синяя область).
- **M-колбочки (Medium-wave):** максимум поглощения ≈ 530 нм (зеленая область).
- **L-колбочки (Long-wave):** максимум поглощения ≈ 560 нм (красная область).

Данный механизм служит материальной основой трехкомпонентной теории цветового зрения Юнга–Гельмгольца и оппонентной теории Геринга.

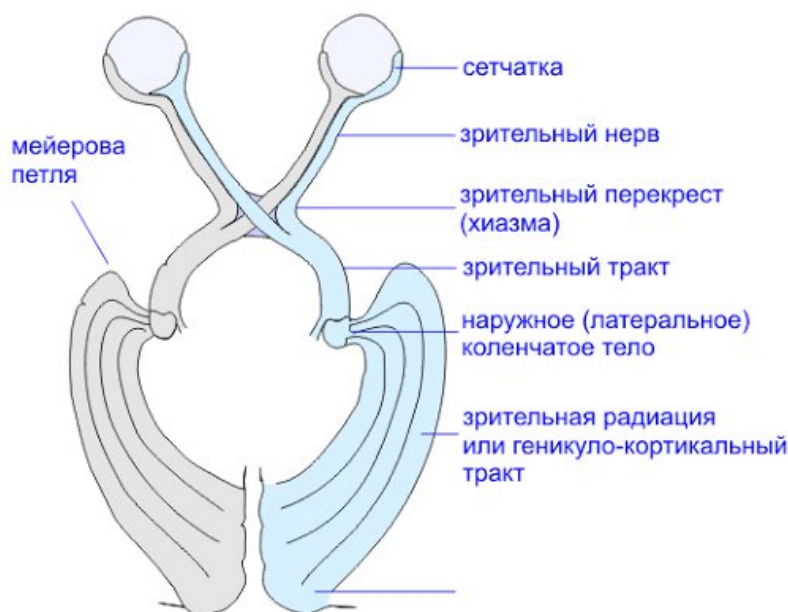


Рис. 6. Проводящий путь: зрительный нерв, частичный перекрест в хиазме, латеральное коленчатое тело, пучок Грасьоле и корковый зрительный центр в затылочной доле.

5.2. Проводящий путь зрительного анализатора

1. **Зрительный нерв (*nervus opticus*, II пара ЧН):** сформирован аксонами ганглионарных клеток (~ 1,2 млн волокон). Покрыт тремя мозговыми оболочками: твердой, паутинной и мягкой. Длина составляет 40–50 мм. Проходит через зрительный канал (*canalis opticus*) в полость черепа.
2. **Зрительный перекрест (*chiasma opticum*):** локализуется в области предперекрестной борозды клиновидной кости над турецким седлом (непосредственно над гипофизом). В хиазме перекрещиваются **ТОЛЬКО ВОЛОКНА ОТ**

медиальных (назальных) половин сетчаток обоих глаз; волокна от височных (латеральных) половин проходят неперекрещенными.

Клиническое следствие: Сдавление хиазмы опухолью гипофиза вызывает выпадение височных половин полей зрения обоих глаз — **битемпоральную гемианопсию**.

3. **Зрительный тракт (*tractus opticus*):** содержит волокна от височной половины сетчатки своего глаза и назальной половины сетчатки противоположного глаза. Несет зрительную информацию от контралатерального поля зрения.
4. **Подкорковые зрительные центры:**
 - **Латеральное коленчатое тело (ЛКТ, *corpus geniculatum laterale*):** главный таламический релейный центр (6 слоев нейронов), где оканчивается 80–90% волокон зрительного тракта.
 - **Верхние холмики крыши среднего мозга (*colliculi superiores*):** подкорковый интеграционный центр ориентировочных рефлексов (старт-рефлекс поворота глаз и головы на внезапный световой раздражитель).
 - **Претектальная область среднего мозга:** отвечает за афферентное звено зрачкового рефлекса на свет.
5. **Зрительная лучистость (коленчато-шпорный путь, пучок Грасьоле, *radiatio optica*):** аксоны нейронов ЛКТ проходят через заднюю ножку внутренней капсулы и белое вещество височной и теменной долей к затылочной коре.
6. **Первичная зрительная кора (поле 17 по Бродману, V1):** расположена по краям шпорной борозды (*sulcus calcarinus*) на медиальной поверхности затылочной доли. Обладает выраженной ретинотопической организацией: проекция фовеолы занимает до 50% площади стриарной коры. Дэвид Хьюбел и Торстен Визель экспериментально доказали наличие колоночной организации коры с детекторами простых линий, ориентации и движения. Из V1 зрительная информация передается по двум потокам:
 - *Вентральный поток («Что?», V1 → V2 → V4 → нижневисочная кора):* распознавание формы, лиц, цвета, объектов.
 - *Дорсальный поток («Где? / Как?», V1 → V2 → V3/MT → заднетеменная кора):* пространственная ориентация, анализ движения и бинокулярная стереоскопия.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ НАУЧНЫЕ ВЫВОДЫ

Глубокий анализ морфологии и физиологии зрительного анализатора позволяет сформулировать следующие базовые выводы:

1. **Принцип структурно-оптической детерминированности:** Диоптрический аппарат глаза (роговица, камеры, хрусталик) подчиняется фундаментальным законам геометрической оптики. Нарушение биометрии (несоответствие длины оптической оси и рефракции) ведет к аметропиям (миопии, гиперметропии, астигматизму), требующим точной очковой или контактной коррекции.
2. **Динамический гомеостаз и гидродинамика:** Прозрачность роговицы и биомеханика склеральной капсулы неразрывно связаны с функциональным состоянием эндотелиальных насосов и оттоком водянистой влаги через трабекулярный аппарат. Любые микроструктурные нарушения данных систем индуцируют гидродинамический блок и глаукомную оптическую нейропатию.
3. **Энергетический дуализм сетчатки:** Высокая метаболическая активность фоторецепторов обеспечивается отдельным кровеносным руслом: наружные слои бессосудисты и диффузно снабжаются хориокапиллярами, а внутренние — ветвями центральной артерии сетчатки.

4. **Прикладное значение для квалификации оптометриста:** Топографические знания о преломляющих поверхностях, вертексе, центрировании, роговичном астигматизме и взаимодействии аккомодации с конвергенцией служат обязательной научной основой для расчета современных прогрессивных очковых линз, торической оптики и жестких контактных линз.