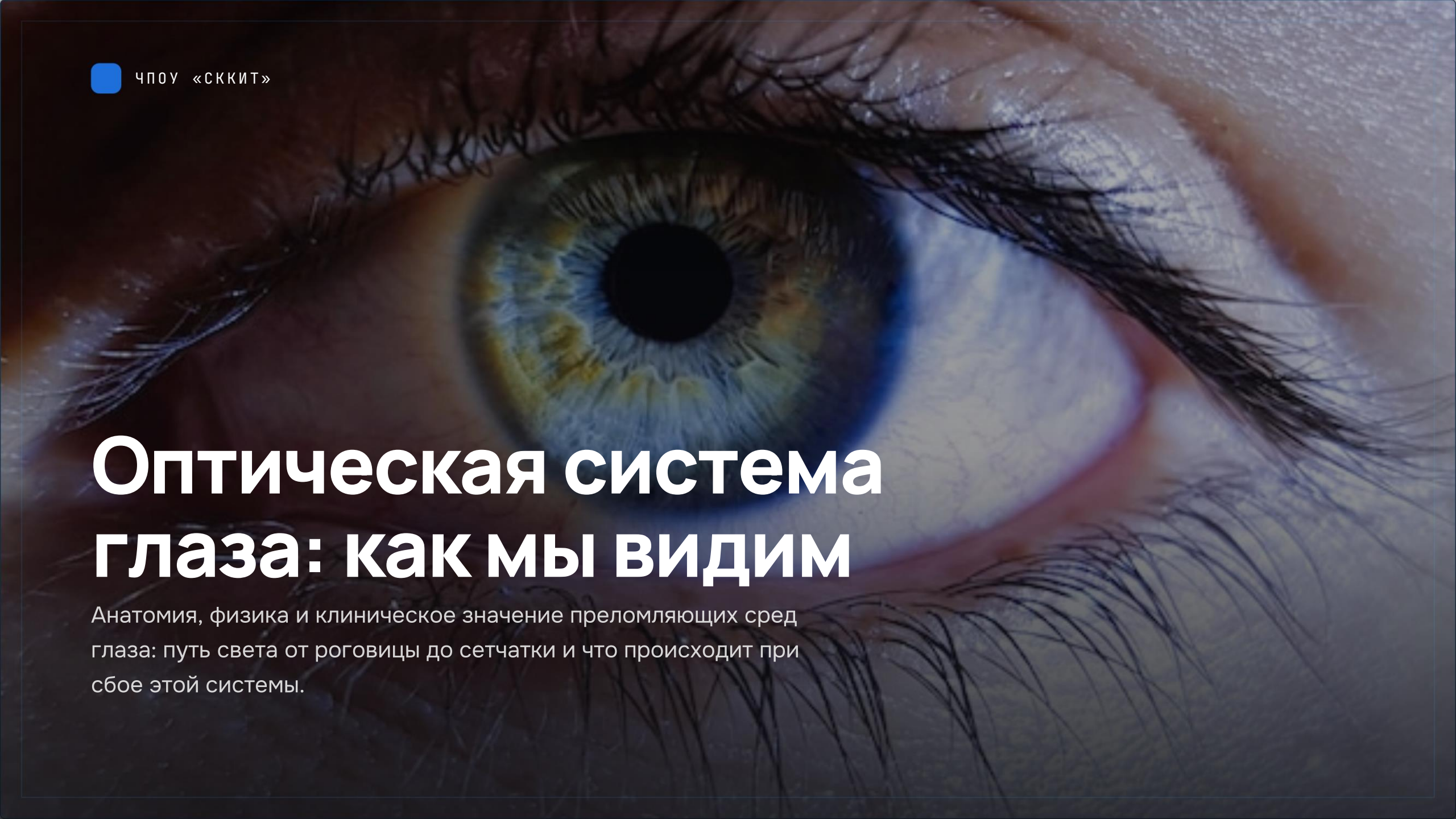


ЧПОУ «СККИТ»

Оптическая система глаза: как мы видим

Анатомия, физика и клиническое значение преломляющих сред глаза: путь света от роговицы до сетчатки и что происходит при сбое этой системы.

ОПТИКА ЗРЕНИЯ

Глаз как оптический прибор

Оптическая система глаза

Роговица и хрусталик работают как объектив: они собирают световые лучи и строят на сетчатке действительное, уменьшенное и перевёрнутое изображение. Именно эта собирающая система лежит в основе зрительного восприятия.

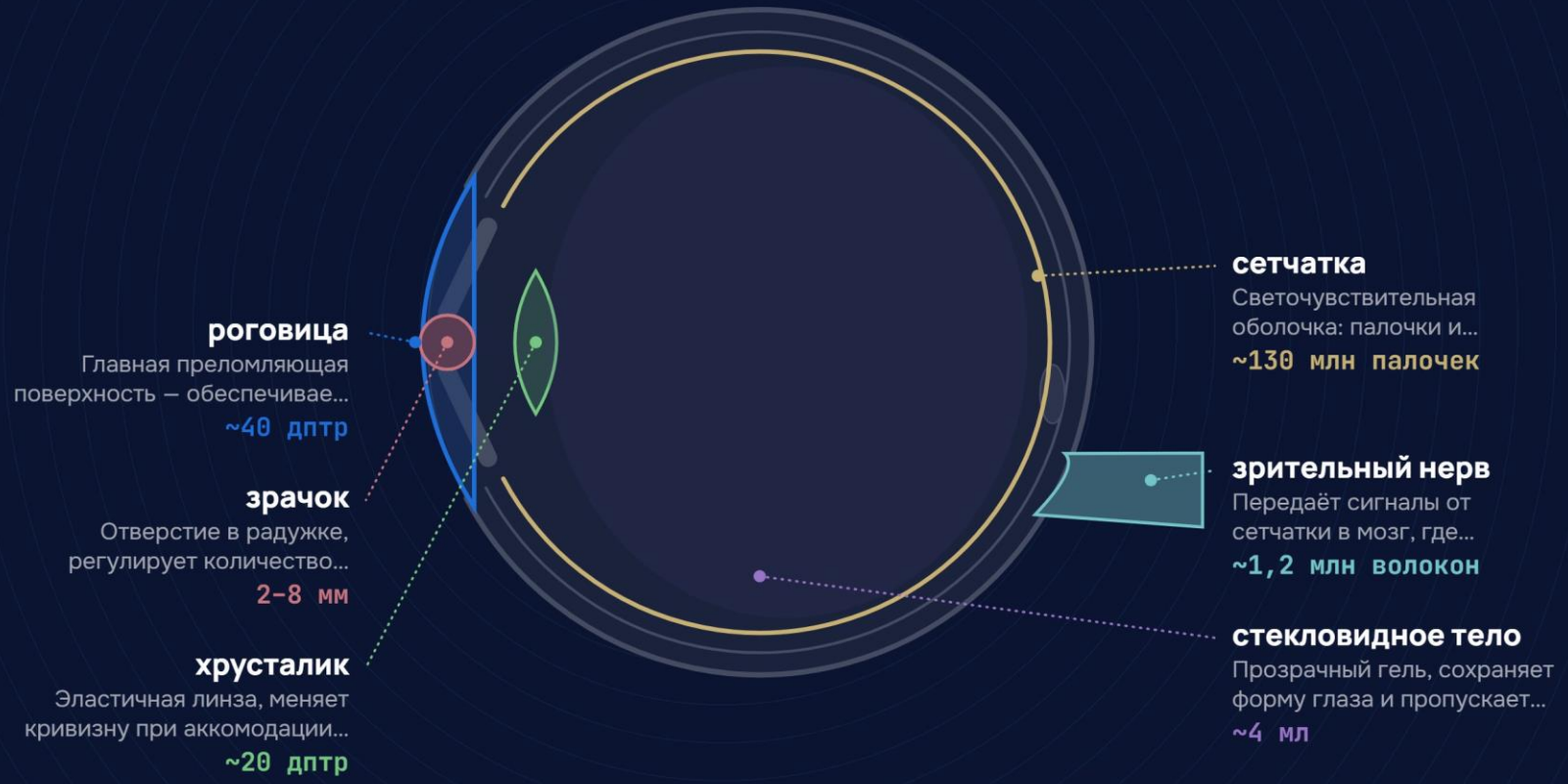
Сравнение с фотоаппаратом

Роговица и хрусталик выполняют роль объектива, зрачок — диафрагмы, регулирующей поток света, а сетчатка — светочувствительной матрицы. Такое устройство делает глаз природным оптическим прибором.

Оптическая система глаза — природный аналог объектива, диафрагмы и матрицы фотоаппарата.

АНАТОМИЯ · ОПТИКА

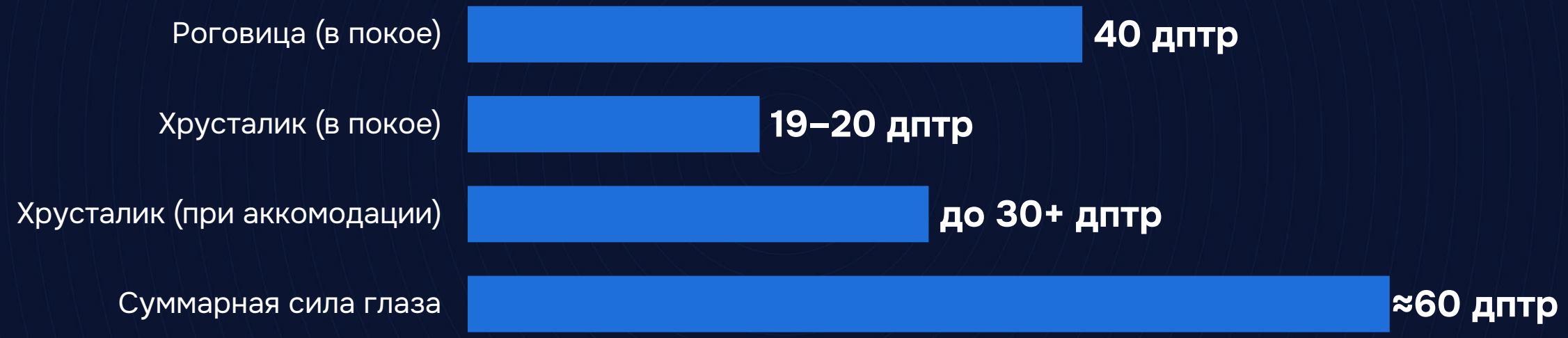
Преломляющие среды глаза: анатомия в разрезе



Суммарная оптическая сила глаза — около 60 дптр; роговица и хрусталик обеспечивают основное преломление.

Источник: данные клинической анатомии и физиологии органа зрения, 2025

Вклад сред в общую рефракцию глаза



Роговица задаёт основную силу, хрусталик — её динамику.

Источник: данные клинической физиологии зрения, 2025

ОПТИКА ГЛАЗА

Формула тонкой линзы для глаза

Связывает фокусное расстояние с расстоянием до предмета и до изображения; применима к глазу как к тонкой линзе.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d} + \frac{1}{D}$$

f	фокусное расстояние системы глаза	м
d	расстояние от предмета до линзы (глаза)	м
D	расстояние от линзы до изображения (сетчатки)	м
$D_{\text{опт}}$	оптическая сила линзы, D = 1/f	дптр

Для глаза D ≈ 24 мм, а расстояние наилучшего зрения — 25 см; модель тонкой линзы — допущение.

Формула тонкой линзы; модель схематического глаза

ХРОНОЛОГИЯ

Аккомодация: как хрусталик меняет фокус

Дети до 10 лет

Максимальный объём

Аккомодация около 20 дптр — фокусировка на объекте в 50 мм от глаза.

25 лет

Постепенное снижение

Объём аккомодации падает до 10 дптр — фокус на предмете в 100 мм.

40–50 лет

Первые признаки пресбиопии

Зрительное напряжение, трудности с мелким шрифтом и фокусировкой вблизи.

После 60 лет

Остаточная аккомодация

Всего 0,5–1 дптр — ясное видение лишь на 1–2 метрах (пресбиопия).

Источник: Википедия «Пресбиопия»; eyepress.ru

ДИАФРАГМА ГЛАЗА

Зрачок: как радужка управляет световым потоком

Диаметр зрачка на ярком свету — ≈2 мм

Диаметр зрачка в темноте — ≈8 мм

Рост площади зрачка (светосбор) — ×16

Узкий зрачок: прирост глубины резкости — макс.

ОПТИКА ГЛАЗА

Аберрации оптической системы глаза

01

Сферическая аберрация

Периферийные лучи преломляются сильнее центральных: фокус краевых и осевых лучей не совпадает. Возникает при широких пучках.

02

Хроматическая аберрация

Разная рефракция для разных длин волн: между красным и синим расхождение около 1,5–2 дптр. Отсюда цветные каёмки у контрастных границ.

03

Кома и астигматизм

Кома — искажение внеосевых пучков, точка превращается в кометоподобное пятно. Астигматизм — лучи в разных меридианах фокусируются неодинаково.

04

Дифракционный предел

Даже идеальная оптика ограничена дифракцией на зрачке: разрешение глаза около 1 угловой минуты. Меньше этого предела система не различит.

05

Компенсация

Зрачковый рефлекс сужает пучок, жёлтое пятно отсекает хроматизм, а нейронная обработка достраивает изображение. Оптика и мозг работают в паре.

Источник: обзор аберраций человеческого глаза; Википедия, «Аберрация оптической системы», 2025

РЕФРАКЦИЯ ГЛАЗА

Норма, близорукость и дальнозоркость

01

Эмметропия (норма)

Параллельные лучи собираются точно на сетчатке. Рефракция в пределах ±0,5 дптр, чёткое зрение вдаль без коррекции.

02

Миопия (близорукость)

Глаз «слишком сильный» или удлинён: изображение фокусируется перед сетчаткой. Коррекция минусовыми (рассеивающими) линзами.

03

Гиперметропия (дальнозоркость)

Оптическая сила недостаточна или глаз укорочен: фокус позади сетчатки. Коррекция плюсовыми (собирающими) линзами.

Источник: данные по распространённости миопии в России, 2025

Распространённость миопии в России



Взрослые и население в целом	40%
Старшие школьники	до 30%
Прочие нарушения рефракции	≈30%

Источник: Пироговский Университет / данные по РФ, 2025–2026

ДИАГНОСТИКА

Методы оценки оптической системы глаза

Визометрия

Оценка остроты зрения по таблицам Сивцева–Головина; результат — в десятичных единицах (0,1–1,0).

Авторефрактометрия

Автоматическое измерение рефракции: сфера, цилиндр, ось; результат — в диоптриях (дптр).

Скиаскопия

Теневая проба: подвижность тени при движении зеркала; рефракция оценивается в диоптриях.

Кератометрия

Измерение радиуса кривизны и преломляющей силы роговицы; результат — в миллиметрах и диоптриях.

Биометрия (длина оси)

Ультразвуковое или оптическое измерение передне-заднего размера глаза; результат — в миллиметрах (мм).

Аберрометрия

Анализ волнового фронта: сферические и астигматические аберрации; результат — в микронах (мкм).

Клинические рекомендации по офтальмологии, 2025

ПРОЦЕСС

Коррекция: от очков до интраокулярных линз

1

Очки и контактные линзы

Первый и самый массовый способ: внешняя оптика компенсирует аметропию, не затрагивая структуры глаза. Базовое решение при миопии, гиперметропии и астигматизме.

2

Лазерная коррекция (ЛКЗ)

Эксимерный лазер меняет форму роговицы и устраняет аномалию рефракции. Подходит при стабильной рефракции и достаточной толщине роговицы.

3

Интраокулярные линзы (ИОЛ)

Имплантация при катаракте и высоких аномалиях. Модели 2026 года: торические, мультифокальные, с расширенной глубиной фокуса и AI-расчётом.

ХРОНОЛОГИЯ МОДЕЛЕЙ

Моделирование глаза: от схемы Гульстранда до цифрового двойника

1900-е

Схема Гульстранда

Первая классическая схематическая модель: роговица и хрусталик как идеальные линзы с постоянными показателями преломления.

1997

Модель Лиу–Бреннана

Учитывает смещённый зрачок, изогнутую сетчатку и градиентный хрусталик с двумя профилями преломления.

2020-е

Симуляция в Zemax и FDTD

Расчёт аберраций и контраста в OpticStudio; FDTD-модели с градиентным хрусталиком для распространения волн.

2026

Цифровой двойник глаза

Открытые модели для Ray Optics Simulation и 3D-модель Chi Eye Twins на основе радиального сканирования.

Источники: Ansys Optics, Nature, ScienceDirect, 2024–2026

ФИНАЛ

Спасибо!

Глаз — совершенная оптика: четыре преломляющие поверхности, ~60 дптр, аккомодация и компенсация аберраций. Это основа коррекции зрения и расчёта ИОЛ.