

## Обзор зарубежных научных публикаций

### Review of foreign scientific publications

Миопия рассматривается сегодня не только как офтальмологическая проблема, но и как сложное нейросенсорное явление, затрагивающее регуляцию зрительных путей на уровне сетчатки и центральной нервной системы. Современные исследования показывают, что миопический дефокус и связанные с ним сигналы запускают каскад локальных и центральных изменений, определяющих рост глаза и зрительное восприятие. Понимание этих процессов имеет фундаментальное значение для объяснения механизмов формирования миопии и поиска новых методов контроля близорукости. В данном обзоре рассмотрены работы, изучающие эти процессы с применением оптической когерентной томографии (ОКТ), электроретинографии (ЭРГ), электроэнцефалографии (ЭЭГ), функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) и экспериментальных моделей на животных, что позволяет проследить роль миопического дефокуса от клеточного уровня до центральной обработки зрительной информации. Как всегда, используя ссылку DOI, вы можете ознакомиться с полными текстами этих работ.

**Подбор материалов и перевод с английского языка:** Александра С. Плесковская, стажер-исследователь, Институт когнитивных нейронаук, Национальный исследовательский университет «Высшая Школа Экономики», Москва, Россия.

#### #1 <https://doi.org/10.1167/tvst.13.4.16>

**Ablordeppey R.K., Nieu R., Lin C.R., Benavente-Perez A. Early Alterations in Inner-Retina Neural and Glial Saturated Responses in Lens-Induced Myopia / Ранние изменения ответов нейронов и глиальных клеток внутренних слоев сетчатки в условиях насыщения при миопии, индуцированной линзами**  
Transl Vis Sci Technol. 2024;13(4):16.

Известно, что у мартышек-тамаринов с миопией наблюдается значительное истончение внутренних слоев сетчатки по сравнению с контрольной группой животных того же возраста. **Цель исследования:** оценить активность внутренних слоев сетчатки у мартышек с миопией, вызванной ношением линз, по сравнению с контролем и выяснить ее связь с изменениями рефракции и роста глаза. **Методы.** У 14 мартышек, которым надевали отрицательные контактные линзы на оба глаза, и у 9 животных из контрольной группы измеряли циклоплегическую рефракцию (Rx), длину заднего отрезка глаза (VCD) и фотопическую полнопольную ЭРГ на разных стадиях эксперимента (с 74-го по 369-й день жизни). Анализировали латентные периоды волн a, b, d и фотопического негативного ответа (PhNR), а также параметры кривой «интенсивность–ответ»: максимальную (насыщенную) амплитуду (Vmax), константу полунасыщения (K) и показатель крутизны (n); аппроксимацию выполняли по уравнению Нака–Раштона. **Результаты.** По сравнению с группой контроля у животных с миопией, вызванной линзами, уже на 7–14-й день отмечали снижение Vmax волн b, d и PhNR еще до по-

явления компенсаторных изменений рефракции и роста глаза. На более поздних сроках, когда в экспериментальной группе сформировалась аксиальная миопия, различий в амплитудах и латентных периодах волн b, d и PhNR между группами существенно не выявляли. В контрольной группе Vmax волны PhNR возрастала по мере увеличения Vmax суммарной волны (b + d), тогда как у животных с индуцированной миопией эта взаимосвязь отсутствовала. **Выводы.** У мартышек с воздействием отрицательного дефокуса уже на ранних этапах отмечаются изменения насыщенных амплитуд ответов внутренних слоев сетчатки по сравнению с контролем еще до развития компенсаторной миопии. Эти ранние изменения ЭРГ не зависят от рефракции и размеров глаза и могут отражать начальные нарушения функции биполярных, ганглиозных, амакриновых или глиальных клеток до манифестации миопии. **Трансляционная значимость:** ранние изменения функции сетчатки, выявленные у животных с индуцированной миопией, могут служить клиническими биомаркерами для ранней идентификации детей, находящихся в группе риска развития миопии.

**#2 <https://doi.org/10.3390/ijms252413484>**

**Ablordeppey R.K., Lin C.R., Srinivas M., Benavente-Perez A. Experimental Myopia Results in Peripapillary Ganglion Cell and Astrocyte Reorganization with No Functional Implications During Early Development / Экспериментальная миопия приводит к реорганизации ганглиозных клеток и астроцитов в перипапиллярной области без функционально значимых изменений на ранних стадиях развития**  
Int J Mol Sci. 2024;25(24):13484.

**Цель:** оценить влияние миопического роста, индуцированного линзами, на структуру и функцию внутренних слоев сетчатки. **Методы.** У обычных мартышек (*Callithrix jacchus*) в течение 6 месяцев индуцировали миопию. Оценивали распределение ганглиозных клеток сетчатки (RGCs), экспрессию и интенсивность глиального фибриллярного кислого белка (GFAP), а также толщину перипапиллярного слоя нервных волокон (ppRNFL) с помощью иммуногистохимии и спектральной ОКТ. Дополнительно анализировали связь этих клеточных показателей с фотопическим негативным ответом (PhNR), измеренным полнопольной ЭРГ. **Результаты.** В экспериментальной группе сформировалась аксиальная миопия. По сравнению с контролем отмечали более тонкий ppRNFL, сниже-

ние плотности перипапиллярных RGCs (~20%) и астроцитов (~42%), усиление экспрессии GFAP по всей сетчатке (~42%) и более высокую интенсивность окрашивания в носовой среднепериферической зоне (~81%). Более выраженная степень миопии и удлинение заднего отрезка глаза ассоциировались с меньшей плотностью перипапиллярных RGCs и астроцитов, а также с более высокой экспрессией/интенсивностью GFAP. Связи этих структурных изменений с параметрами PhNR не выявлено: PhNR оставался неизменным. **Выводы:** миопия сопровождается ремоделированием клеточных элементов перипапиллярной области внутренних слоев сетчатки, но на рассматриваемом раннем этапе эти изменения не сопровождаются измеримыми функциональными нарушениями.

**#3 <https://doi.org/10.1167/iovs.65.4.14>**

**Dibyendu Pusti, Nimesh B. Patel, Lisa A. Ostrin, Augustine N. Nti, Siddarth Das, Geunyoung Yoon. Peripheral Choroidal Response to Localized Defocus Blur: Influence of Native Peripheral Aberrations / Периферический ответ хориоидеи на локализованный дефокус: роль собственных периферических аберраций**  
Invest Ophthalmol Vis Sci. 2024 Apr 5;65(4):14.

**Цель:** изучить кратковременные изменения толщины периферической хориоидеи (PChT) при миопическом и гиперметропическом дефокусе как при сохраненных собственных периферических аберрациях, так и при их коррекции, чтобы оценить их вклад в детекцию знака дефокуса. **Методы.** 11 молодым взрослым предъявляли локализованный видеостимул височной периферии сетчатки (15°) правого глаза. Система адаптивной оптики в ответ на видеостимул формировала дефокус  $\pm 2$  дптр без коррекции собственных периферических аберраций глаза [NoAO] и с их коррекцией [AO]. PChT измеряли на Heidelberg Spectralis ОКТ в исходном состоянии, во время экспозиции (через 10, 20 и 30 мин) и в фазе восстановления (через 4, 8 и 15 мин). Автоматизированная нейросетевая сегментация (MATLAB) оценивала изменения PChT

по данным ОКТ; статистически анализировали влияние оптических условий и времени. **Результаты.** В фазе экспозиции NoAO миопический дефокус вызывал утолщение PChT ( $+10,0 \pm 5,3$  мкм), а гиперметропический – ее истончение ( $-9,1 \pm 5,5$  мкм). При АО значимых отклонений от исходного уровня не отмечено. Во всех условиях PChT возвращалась к исходным значениям в фазе восстановления. Фовеальная область, не подвергавшаяся стимуляции, изменений не демонстрировала, что подтверждает локальность ответа. **Выводы.** Кратковременные изменения PChT могут служить маркером детекции периферического миопического/гиперметропического дефокуса, особенно при наличии собственных периферических аберраций. Это подчеркивает значимую роль периферически ориентированного размытия в определении знака периферического дефокуса.

**#4 <https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.112500>**

**Pons C., Mazade R., Jin J., Dul M.W., Alonso J.-M. Optical defocus affects differently ON and OFF visual pathways / Оптический дефокус по-разному влияет на ON/OFF-зрительные пути**  
iScience. 2025;28(6):112500.

**Введение.** Хрусталик обеспечивает фокусировку изображений на сетчатке на разных дистанциях. Оптический дефокус снижает пространственное раз-

решение и контраст, а очковые линзы дополнительно меняют масштаб изображения. Светлые и темные элементы обрабатываются через ON/OFF-пути со-

ответственно, которые различаются по пространственному разрешению, чувствительности к контрасту и механизмам подавления. Поэтому ожидается, что дефокус и изменение масштаба по-разному влияют на эти пути. **Цель:** проверить, по-разному ли ON/OFF-пути реагируют на оптический дефокус, и количественно оценить различия. **Методы.** Были проведены электрофизиологические исследования зрительной коры у кошек и людей. У животных регистрировали мультиэлектродные записи многонейронной активности для оценки размеров рецептивных полей и силы зрительных ответов ON/OFF-путей, у людей – ЭЭГ-ответы на шахматные стимулы. Оптический дефокус индуцировали с помощью контактных линз и очков разной прелом-

ляющей силы; дополнительно использовали линзы разной полярности для анализа направления дефокуса. **Результаты.** Оптический дефокус расширял рецептивные поля ON-пути и сужал поля OFF-пути; ответы OFF-пути снижались в большей степени, чем ON-пути. Увеличение масштаба изображения преимущественно сужало рецептивные поля OFF-пути. **Выводы.** Выявленные изменения активности ON/OFF-путей могут участвовать в регуляции роста глаза, оптимизируя размер и яркость ретинального изображения за счет максимизации ответа сетчатки. Подобный механизм, вероятно, является эволюционно консервативным и может иметь клиническое значение для понимания патогенеза миопии и других зрительных нарушений.

### #5 <https://doi.org/10.1167/iov.66.7.3>

Marcos S. Optical and Visual Diet in Myopia / Оптическая и «визуальная диета» при миопии Invest Ophthalmol Vis Sci. 2025;66(7):3.

**Предпосылки.** Тревожный рост распространенности миопии в современном обществе связывают с изменениями внешней среды, влияющими на детей и подростков. Изображения проходят через оптические среды глаза и воспринимаются фоторецепторами, формируя «визуальную диету» – набор пространственных, временных и спектральных характеристик стимула, поступающих в зрительную систему. Эти входы критически регулируют эмметропизацию и, в склонных к развитию миопии глазах, запускают каскад, ведущий к избыточному аксиальному удлинению. **Содержание.** Статья задает основы для вычислительного моделирования миопического глаза и указывает, какие оптические и структурные данные уже доступны и какие еще необходимы для создания лонгитюдных трехмерных моделей глаза в норме и при миопии. Широкоугольные модели глаза – как в покое, так и при аккомодации – помогут лучше понять ранние изменения и изучить причинно-следственные связи развития миопии. Возраст- и рефракционно-зависимые модели могут служить платформой для тестирования эффективности новых оптических методов контроля миопии с учетом реальных паттернов ретинального дефокуса. Рассматриваются пространственные, хроматические и временные стимулы как потенциальные сигналы, регулирующие эмме-

тропизацию. Также анализируются существующие теории кодирования знака дефокуса и запуска аксиального удлинения. **Значение для исследований.** Необходимо внедрение полностью количественных методов оценки геометрии и оптики глаза, а также мониторинга параметров окружающей среды, чтобы собирать многомерные массивы данных для построения прогностических моделей. Учитывая важность времени, проводимого на открытом воздухе, особое внимание уделено механизмам, связывающим световое воздействие с возникновением миопии: роль дофаминергических путей сетчатки, возможные нарушения сигнальных механизмов меланопсина и дезорганизация циркадных ритмов в условиях искусственного освещения и длительного использования экранов цифровых устройств. **Заключение:** понимание того, как характеристики среды (интенсивность и спектр света, распределение пространственных частот, паттерны дефокуса) взаимодействуют с фильтрационными эффектами оптики глаза, поможет выделить ключевые миопиогенные сигналы и уточнить многофакторные механизмы, важные для разработки стратегий контроля миопии. **Дополнение:** в приложении собраны нерешенные вопросы и перспективные направления исследований в области миопии, сформулированные на основе экспертных мнений.

### #6 <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35750>

Liu Y., Hao Q., Lu X., Wang P., Guo D., Zhang X., Pan X., Wu Q., Bi H. Electroacupuncture improves retinal function in myopia Guinea pigs probably via inhibition of the RhoA/ROCK2 signaling pathway / Электроакупунктура улучшает функцию сетчатки у морских свинок с миопией, вероятно, за счет ингибирования сигнального пути RhoA/ROCK2 Heliyon. 2024;10(15):e35750.

**Цель:** изучить влияние электроакупунктуры (ЭА) на функцию сетчатки у морских свинок с миопией, индуцированной отрицательными линзами

(LIM), посредством ингибирования сигнального пути RhoA/ROCK2. **Методы.** Морские свинки были рандомизированы на группы: нормальный конт-

роль (NC), LIM, ЭА, «ложная» акупунктура (SHAM) и ЭА + ингибитор пути ROCK Y27632 (EA + Y27632). Оценивали рефракцию, аксиальную длину (AL), плотность ретинального кровотока, сосудистый индекс хориоидеи (CVI) и физиологическую функцию сетчатки. Из антиоксидантных показателей измеряли общую антиоксидантную активность (Т-АОС), каталазу (CAT), глутатион (GSH), супероксиддисмутазу (SOD) и малоновый диальдегид (MDA). Гистологию сетчатки проводили методом окраски гематоксилином и эозином (H&E) с целью оценки изменений структуры тканей сетчатки. Экспрессию компонентов пути RhoA/ROCK2 в сетчатке определяли методом количественной полимеразной цепной реакции (ПЦР, qPCR) и вестерн-блоттингом. **Результаты.** В группах LIM и SHAM отмечено значительное увеличение миопической рефракции, AL и содержания MDA; сни-

### #7 <https://doi: 10.3389/fnins.2025.1593463>

**Elie De Lestrangé-Angineur, Feng Pan, Benjamin Thompson, Kin Yau Wong. Eye-brain connection: an altered profile of spatial attention in myopia / Связь «глаз – мозг»: измененный профиль пространственного внимания при миопии**  
Front Neurosci. 2025 May 23;19:1593463.

**Актуальность.** Рефракционные аномалии – одна из ведущих причин нарушений зрения, ухудшающая качество зрительного восприятия у миллиардов людей во всем мире. Ухудшение качества зрительного входа (изображения на сетчатке) может требовать от лиц с рефракционными аномалиями большего привлечения внимания при выполнении зрительных задач. **Цель:** оценить, изменяет ли миопия паттерн зрительного внимания. **Методы.** Двадцать участников 18–26 лет (~50% женщин; 10 с рефракцией, близкой к эметропии ( $|cSER| < 1,0$  дптр; 10 участников с миопией со SER от 1,0 до 6,0 дптр) проходили тестирование в полной оптической коррекции. Они выполняли задачу на дискриминацию по остроте зрения в случайно выбираемых точках поля зрения; стимулы предъявлялись на эксцентриситетах 1–10° (эксцентриситет – угловое расстояние от точки фиксации; шаг 1°) вдоль меридианов 0°, 90°, 180° и 270°. Исследовали два условия внимания: нейтральное (место появления стимула заранее не сообщали) и сфокусированное (мишень предъявляли только в одном из меридианов, что позволяло предварительно направить внимание). Основной показатель – острота зрения; дополнительно фиксировали время реакции (RT). Пространственное

распределение модуляции, связанной с вниманием, оценивали как отношение показателей в сфокусированном и нейтральном условиях по диапазону эксцентриситетов. **Результаты.** Анализ линейными смешанными моделями показал, что усиление показателей в условии внимания (для остроты и времени реакции, RT) по эксцентриситету лучше всего описывается кубической функцией, что указывает на конечное «окно внимания» с максимумом примерно на 4°. Выявлены значимые эффекты меридиана и рефракционного статуса: усиление больше в нижнем меридиане (270°), чем в верхнем (90°); по всему полю зрения эффективность внимания у миопов ниже, чем у эметропов. Моделирование по данным остроты дополнительно показало более узкие «окна внимания» у миопов, что предполагает перераспределение когнитивных ресурсов. **Заключение.** Из известных данных, это первое исследование, предоставляющее детальный пространственный профиль модуляции, связанной с вниманием, при легкой и умеренной миопии. Показаны различия формы «фокуса внимания» в зависимости от рефракционного статуса и признаки перераспределения внимания при миопии, что указывает на связь миопии со зрительным вниманием и требует дальнейшего изучения.

#8 <https://doi: 10.3389/fnins.2024.1307688>

Ryu H., Ju U., Wallraven C. **Decoding visual fatigue in a visual search task selectively manipulated via myopia-correcting lenses / Механизмы зрительного утомления в задаче визуального поиска при избирательном воздействии линз для коррекции миопии**  
Front Neurosci. 2024;18:1307688.

**Актуальность.** Зрительная усталость, возникающая в результате продолжительной деятельности с высокой зрительной нагрузкой, может существенно влиять на эффективность выполнения задач и общее самочувствие. Однако на сегодняшний день о нейронных сетях, лежащих в основе зрительной усталости, известно немного. **Цель:** выявить потенциальные нейронные сети зрительной усталости, используя парадигму с миопической оптической коррекцией, которая способна напрямую изменять субъективное ощущение усталости. **Методы.** В исследование включили 31 участника с миопией (SE: правый глаз  $-3,77 \pm 2,46$  дптр; левый глаз  $-3,75 \pm 2,45$  дптр), выполнявших требовательную задачу визуального поиска с варьируемыми уровнями сложности – как в линзах, так и без них – во время фМРТ-сканирования. Всего проводили 20 проб; после каждой участники оценивали воспринимаемую сложность и свой субъективный уровень зрительной усталости. Для декодирования мозговых областей, связанных с усталостью и сложностью, применяли анализ сходства репрезентаций с оценкой их уникальных и совмест-

ных паттернов декодирования. **Результаты.** Поведенческие результаты показали корреляции между оценками усталости и сложности, а ношение коррекции значительно снижало ощущение усталости. По данным фМРТ совместное декодирование усталости и сложности выявлено в клине, язычной извилине, средней затылочной извилине (MOG) и предклинье. Отдельные участки язычной извилины обеспечивали селективное декодирование воспринимаемой сложности. В то же время более широкая сеть зрительных и высокоуровневых ассоциативных областей (верхушка мозжечка, средняя височная, парагиппокампальная и прецентральная извилины, предклинье) избирательно декодировала усталость. **Заключение.** Результаты углубляют понимание взаимосвязей визуального поиска, внимания и ментальной нагрузки и, по сути, впервые показывают, что субъективную зрительную усталость можно декодировать по данным нейровизуализации во время сложной задачи. Парадигма с миопической коррекцией демонстрирует потенциал как инструмента для изучения и модуляции усталости.