

СВЕТОДИОДНАЯ СРЕДА И ЗДОРОВЬЕ

Комплексный научно-технический аналитический отчет о
спектральных, временных, физиологических и экологических
характеристиках светодиодного освещения

Исследовательская программа «Виртуальная лаборатория света»

Версия 1.1

30 августа 2026 года

ALPHA RESEARCH PROJECT
ПРОЕКТ «ЭШЕЛОН»
NEW SPACE AGENCY

СВОДНЫЙ МАТЕРИАЛ НАПРАВЛЯЕТСЯ ДЛЯ РАССМОТРЕНИЯ В:

АО «Мосэнергосбыт»

X5 Power

ГНЦ РФ - Институт медико-биологических проблем РАН (ИМБП РАН)

Институт цифрового биодизайна и искусственного интеллекта в медицине Сеченовского Университета

Кафедра светотехники Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова НИУ «МЭИ»

Материал для открытого научного рецензирования и обсуждения

Статус, назначение и ограничения документа

Этот отчет представляет собой расширенный критический синтез доступной литературы и инженерных данных по состоянию на 29 августа 2026 года. Он подготовлен для передачи исследовательской лаборатории и публичного обсуждения. Документ не является клиническим руководством, официальной оценкой риска или зарегистрированным систематическим обзором.

Цель отчета - отделить физически и биологически подтвержденные эффекты от гипотез, преувеличений и логических перескоков. Особое внимание уделено дозиметрии, независимости исследовательских групп, качеству контроля, переносу от клеток и животных к человеку, а также данным, которые противоречат исходной гипотезе.

Все сильные утверждения сформулированы так, чтобы их можно было опровергнуть новым экспериментом. В конце приведен проект большой виртуальной лаборатории и перечень результатов, способных изменить текущий вывод.

Рекомендуемое библиографическое описание: Светодиодная среда и здоровье. Комплексный научно-технический аналитический отчет исследовательской программы «Виртуальная лаборатория света». Версия 1.1, 30.08.2026.

Исходная аналитическая позиция

Массовый переход на серийные светодиодные системы можно обоснованно рассматривать как крупный энергетический и экологический эксперимент. Термин «LED» сам по себе не определяет биологическую дозу. Ее задают спектральная радиансность, геометрия, время суток, длительность, временная модуляция, тепловой режим и индивидуальная чувствительность.

Содержание

Статус, назначение и ограничения документа	2
Исходная аналитическая позиция	2
Содержание	3
1. Резюме исследования	7
1.1. Сводный вывод	8
1.2. Неоднородность категории светодиодного освещения	8
2. Методология поиска и оценки доказательств	9
2.1. Области поиска	9
2.2. Критерии оценки качества доказательств	9
2.3. Принципы интерпретации результатов	9
2.4. Ограничения обзора	10
3. Термины, спектр и дозиметрия	10
4. Верификация утверждений исходного видеоматериала	11
4.1. Исследование Kaynezhad и соавт. (2022): дизайн и фактически измеренные показатели	11
5. Развитие гипотез о биологическом действии искусственного света	12
6. Спектральная архитектура источников	12
6.1. Термин «полный спектр»: определение и ограничения	13
6.2. Энергетическая эффективность и спектральный компромисс	13
7. Циркадные эффекты световой экспозиции: доказательства у человека	13
7.1. Физиологическая роль дневной световой экспозиции	14
8. Метаболизм, сердечно-сосудистая система и смертность	14
8.1. Контролируемые краткосрочные исследования у человека	14
8.2. Персональная экспозиция ночному свету: данные UK Biobank	15
8.3. Спутниковые оценки искусственного ночного освещения	15
9. Искусственный ночной свет, сменная работа и онкологические риски	15
10. Временная модуляция света: физические параметры, нейрофизиология и симптомы	16
10.1. Источники и параметры временной модуляции света	17
10.2. Распространенность на рынке и нормативные требования	17
11. Сетчатка, ретинальный пигментный эпителий и фотохимический риск	17
11.1. Механизмы фотохимического повреждения	18
11.2. Данные исследований на животных	18

11.3. Исследования у человека и сопоставление доз	19
12. Митохондриальные эффекты красного и ближнего инфракрасного излучения. Фотобиомодуляция	19
12.1. Предлагаемые механизмы	19
12.2. Гипотеза спектральной недостаточности: текущее состояние доказательств	21
13. Системные эффекты и продолжительность жизни в экспериментальных моделях	22
14. Неврологические эффекты, мигрень, утомление и психические функции	22
15. Миопия, развитие глаза и воздействие фиолетового света	23
16. Кожа, репродуктивная система и другие системные исходы	23
17. Экологические последствия, избыточное освещение и эффект обратного роста потребления	24
18. Энергетическая эффективность, жизненный цикл и последствия выбора альтернатив.	
19. Исследовательские направления, происхождение данных и независимость подтверждений	25
20. Данные, ограничивающие гипотезу универсального вреда LED	26
21. Интегративная модель и конкурирующие объяснения	26
21.1. Многофакторная модель экспозиции и риска	27
22. Программа экспериментальной проверки: виртуальная лаборатория	27
22.1. Острое факторное исследование в контролируемой световой камере	28
22.2. Долгосрочное рандомизированное исследование у человека	28
22.3. Экспериментальная проверка гипотезы недостаточности ближнего ИК-излучения	29
22.4. Критерии пересмотра основных выводов	29
23. Минимальные требования к измерениям и регистрации экспозиции	29
24. Стандарты, рекомендации и официальные оценки риска	30
25. Сравнительная оценка сценариев экспозиции	30
26. Протокол открытого научного рецензирования	31
27. Заключение	31
Итоговая оценка	32
Приложение А. Расширенный реестр ключевых исследований	32
Приложение В. Сопоставление доз и экспозиций	34

Приложение С. Группы повышенной чувствительности	35
Приложение D. Аннотированный обзор ключевых исследований	35
D1. Phillips et al., 2019: чувствительность циркадной системы к обычному комнатному свету	36
D2. Souman et al., 2018: одинаковые освещенность и CCT при различной меланопической экспозиции . . .	36
D3. Blume et al., 2022: изменение мелатонина при отсутствии выраженных изменений сна	36
D4. Chang et al., 2015: длительное чтение с электронного устройства перед сном	37
D5. Mason et al., 2022: освещенность 100 лк во время сна	37
D6. Harmsen et al., 2025/2026: естественный дневной свет и диабет 2 типа	37
D7. Windred et al., 2024: персонально измеренное ночное освещение и риск T2D	38
D8. Windred et al., 2025: ночное освещение и сердечно-сосудистые заболевания	38
D9. Liang et al., 2024: наружное ночное освещение по спутниковым данным и смертность	38
D10. Lindén et al., 2025: ответ мозга на незаметную TLM по данным 7-Тл фМРТ	39
D11. Veitch et al., 2024: зрачковая реакция и ERP при 100 и 500 Гц	39
D12. Wilkins et al., 1989: головная боль и высокочастотные пускорегулирующие аппараты	39
D13. Sekulovski et al., 2020: отсутствие выраженного эффекта в длительном офисном исследовании	40
D14. Kaynezhad et al., 2022: свет 420 нм и охССО сетчатки	40
D15. Godley et al., 2005: клетки RPE человека и митохондриальная ДНК	40
D16. Marie et al., 2018: спектр действия митохондриального повреждения	41
D17. Krigel et al., 2016: роль пигментации	41
D18. O'Hagan et al., 2016: реальные бытовые источники	41
D19. Nash et al., 2019: синий свет и продолжительность жизни дрозофил	42
D20. Hoh Kam et al., 2021: комплексы дыхательной цепи у дрозофил	42
D21. Roddick et al., 2024: добавление NIR к общему освещению	42
D22. Giménez et al., 2023: зависимость эффектов NIR от дозы и сезона	43
D23. Powner и Jeffery, 2024: свет 670 нм и OGTT	43
D24. Barrett и Jeffery, 2026: добавление освещения лампами накаливания	43
D25. Sipion et al., 2023: высококачественное исследование PBM с отрицательным результатом	44
D26. He et al., 2015: время на открытом воздухе и миопия	44
D27. Chekani Azar, 2023: репродуктивные показатели самцов крыс	44
D28. Kyba et al., 2023: быстрый рост яркости ночного неба	45
D29. Boyes et al., 2021: уличное освещение и гусеницы ночных бабочек	45
D30. McColl и Veitch, 2001: исторический обзор освещения «полного спектра»	45
Приложение E. Методологические ошибки и смешивающие факторы	45
Приложение F. Статистический план и организация исследования	47
F1. Система управления исследованием	47
F2. Первичные оцениваемые эффекты	47
F3. Статистическая мощность и объем выборки	47
F4. Рандомизация и ослепление	47
F5. План статистического анализа	48
F6. Пакет материалов для воспроизводимости	48

F7. Правила досрочного прекращения и интерпретации	48
Приложение G. Нерешенные научные вопросы исследовательской программы	48
Приложение H. Термины и определения	50
Библиография	51
Итоговое заключение для публичного обсуждения	54
КОНЕЦ ОТЧЕТА	54

1. Резюме исследования

Массовое внедрение светодиодного освещения сформировало неоднородную световую среду, отдельные параметры которой связаны с подтвержденными и предполагаемыми рисками. Наиболее убедительные доказательства касаются режима освещения, временной модуляции отдельных изделий и расширения искусственного освещения. Универсальная хроническая токсичность технологии не установлена.

Современное бытовое и коммерческое освещение быстро перешло к белым LED с люминофорной конверсией. Этот переход снизил энергопотребление и эксплуатационные расходы, одновременно изменив спектр, временную структуру, яркость источников, продолжительность использования и стоимость дополнительного света. В результате сформировался комплекс связанных воздействий, который невозможно свести к одной характеристике лампы.

Наиболее точная рабочая гипотеза состоит в том, что современная световая среда создает хроническое рассогласование между биологическими потребностями и фактическим световым режимом. Днем человек нередко получает недостаточно яркого, динамичного и широкополосного света. Вечером и ночью сохраняются относительно высокие меланопические дозы. Часть источников характеризуется выраженной временной модуляцией и высокой локальной яркостью. Типичный белый LED с синим кристаллом почти не излучает в ближнем инфракрасном диапазоне (NIR), однако отсутствие NIR пока не признано доказанным дефицитным состоянием.

Утверждение	Текущий вердикт	Уверенность
Типичный белый LED с синим кристаллом имеет пик 445-455 нм и почти не излучает выше 780 нм	Подтвержденный спектральный факт	Высокая
Вечерний и ночной melanopic-свет подавляет мелатонин и сдвигает фазу	Причинно подтверждено у людей	Высокая
Глубокая TLM с частотой 100/120 Гц может влиять на сетчатку, кору головного мозга и зрительные задачи	Подтвержден острый физиологический ответ	Умеренная-высокая
Коротковолновый свет повреждает сетчатку при достаточной дозе	Причинно подтверждено	Высокая
Обычная бытовая LED-лампа вызывает клиническое повреждение человеческой сетчатки	Убедительных данных нет	Низкая
Добавление красного и ближнего инфракрасного излучения изменяет отдельные физиологические показатели	Выявлены эффекты, зависящие от протокола	Умеренная
Отсутствие фонового NIR вызывает митохондриальную недостаточность	Гипотеза без валидированного синдрома	Очень низкая
Ночной свет связан с T2D, CVD и смертностью	Наблюдательный дозозависимый сигнал	Низкая-умеренная причинность
Именно LED вызывает рак или сокращает жизнь	Не подтверждено	Очень низкая
Переход на LED усилил избыточное освещение и экологический ущерб	Подтверждено	Высокая
LED сопоставим с асбестом	Научно необоснованная аналогия	Высокая уверенность в опровержении

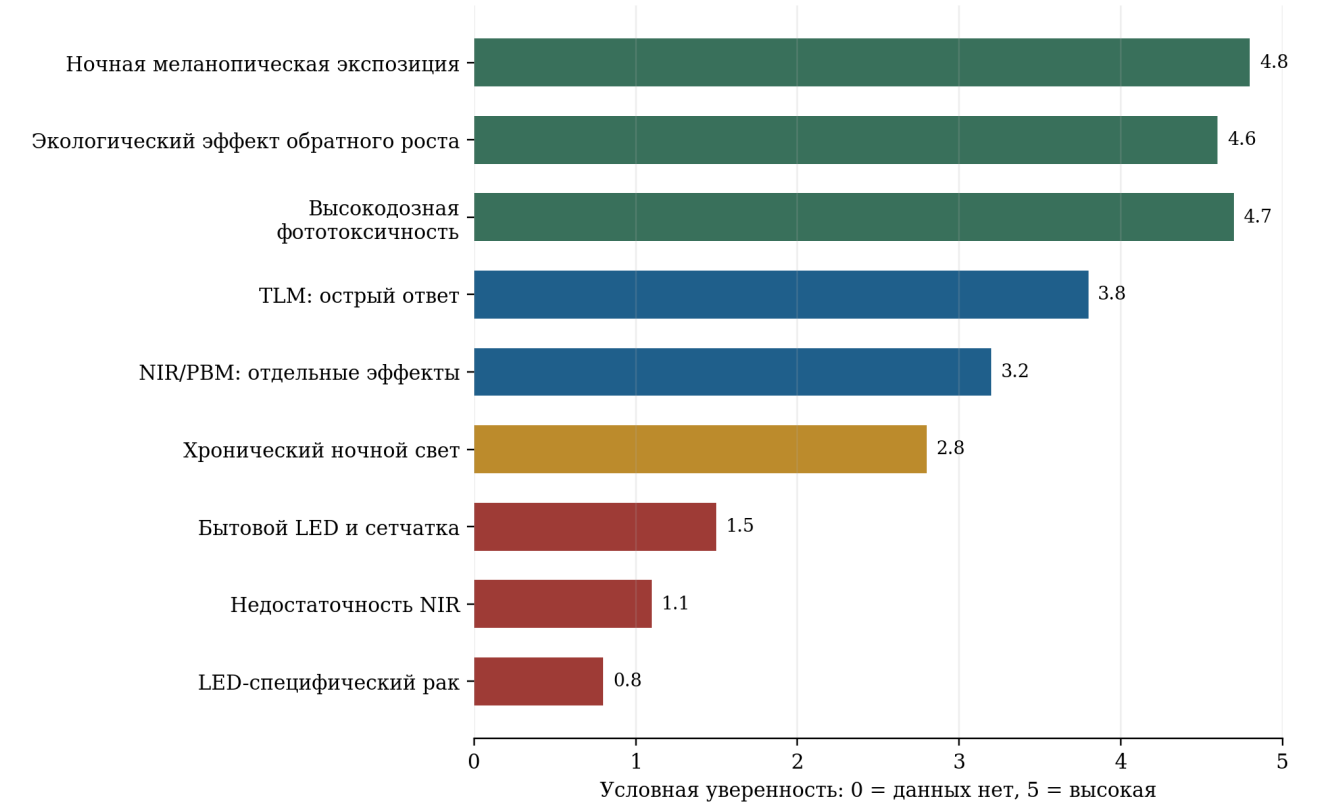


Рисунок 1. Условная карта уверенности. Оценка отражает совокупность дизайна, дозиметрии, независимости и переносимости результатов. Это аналитическая шкала отчета, не формальная GRADE-оценка.

1.1. Сводный вывод

Массово применяемые недорогие LED-системы нередко формируют неблагоприятную световую среду. Подтвержденные проблемы включают ночную циркадную экспозицию, временную модуляцию у части изделий, дискомфортную блескость, избыточное освещение и экологический ущерб. Коротковолновая фототоксичность возникает при достаточной дозе. Гипотеза хронической недостаточности красного и ближнего инфракрасного излучения заслуживает строгой экспериментальной проверки. Универсальная токсичность всех LED, повреждение сетчатки при обычном использовании, остановка митохондриального дыхания, онкологические заболевания и сокращение продолжительности жизни именно вследствие LED-технологии пока не доказаны.

1.2. Неоднородность категории светодиодного освещения

- Белый LED с синим кристаллом и люминофорной конверсией обычно имеет узкий пик около 445-455 нм и широкую полосу люминофора в области 500-700 нм.
- LED с фиолетовым кристаллом использует возбуждение около 405-420 нм и несколько люминофоров. Такая архитектура способна лучше заполнить голубовато-зеленую и глубокую красную области спектра.
- Системы RGB, гибридные и многоканальные системы позволяют формировать спектр отдельными каналами, включая 660, 730, 850 и 940 нм.
- Временная модуляция света определяется драйвером, диммером и режимом нагрузки. Один LED может работать с минимальной модуляцией, другой может полностью выключаться 100 или 120 раз в секунду.
- Одинаковые освещенность и CCT не гарантируют одинаковую меланопическую EDI, взвешенную по синей световой опасности радиансность, цветопередачу или дозу NIR.

2. Методология поиска и оценки доказательств

Отчет построен как критическая карта доказательств. Приоритет отдавался первичным исследованиям с участием человека, прямым измерениям экспозиции, официальным стандартам и работам с прозрачной дозиметрией.

2.1. Области поиска

Когорт	Что проверялось
Физика и инженерия	SPD 350-2500 нм; радиансность источника; CCT; CRI/TM-30; драйверы; диммирование; TLM; блескость; электромагнитные помехи; тепловой режим
Циркадная биология	меланопическая EDI; мелатонин; DLMO; фазовый ответ; сон; бодрствование; дневная световая экспозиция
Глаз	опасность синего света; RPE; A2E; мтДНК; ERG; OCT/OCTA; AMD; когорты с интраокулярными линзами
Митохондрии	CCO; NO; ROS; Δψ; ATP; OCR; фотобиомодуляция; системный ответ
Системное здоровье	глюкоза; инсулин; HRV; сердечно-сосудистые заболевания; смертность; рак; настроение; мигрень; репродуктивная система; кожа
Развитие и экология	миопия; пребывание на открытом воздухе; фиолетовый свет; насекомые; растения; опыление; засветка неба; эффект обратного роста потребления
Политика и рынок	история синих GaN-светодиодов; стандарты энергоэффективности; закупки; экодизайн; отказ от ртути; жизненный цикл

2.2. Критерии оценки качества доказательств

- Наивысший вес: рандомизированные ослепленные или плацебо-контролируемые исследования с участием человека, измеренной дозой и заранее зарегистрированными первичными конечными точками.
- Высокий механистический вес: внутрииндивидуальные эксперименты с участием человека, прямые радиометрические измерения и валидированные спектры биологического действия.
- Средний вес: проспективные когорты с персональными датчиками, хорошо контролируемые исследования на животных и независимые клеточные линии.
- Низкий вес: экологические исследования по спутниковым данным, поперечные сравнения, описания случаев и небольшие неконтролируемые вмешательства.
- Гипотезообразующий вес: экспертные интервью, материалы производителей, исследования без корректного имитационного контроля и данные одной связанной лабораторной сети.

2.3. Принципы интерпретации результатов

Каждый вывод проверялся по четырем осям: причинность, доза, независимость и переносимость. Биологический эффект не автоматически означает повреждение. Улучшение после терапевтического добавления стимула не автоматически доказывает дефицит от его отсутствия. Ассоциация с ночным светом не автоматически идентифицирует технологию источника. Соответствие нормативу не доказывает абсолютный ноль долгосрочного эффекта.

Отдельно учитывались повторное использование одних и тех же когорт, множественность исходов, анализ подгрупп, односторонние статистические тесты, отсутствие коррекции множественных

сравнений, финансирование производителей, патенты и повторяющиеся конечные точки внутри одной исследовательской сети.

2.4. Ограничения обзора

Работа не регистрировалась заранее как систематический обзор и не включает формальную оценку риска систематической ошибки для каждой публикации. Поиск был широким, однако отдельные статьи могли быть пропущены. Для нескольких новых публикаций 2025-2026 годов использовались доступные версии предварительной онлайн-публикации. Количественный метаанализ не выполнялся. Все численные сравнения между разными типами экспозиции считаются ориентировочными, если авторы не измеряли одну и ту же радиометрическую величину.

3. Термины, спектр и дозиметрия

Значительная часть расхождений в интерпретации обусловлена некорректным использованием фотометрических и радиометрических величин. Освещенность, коррелированная цветовая температура и название технологии недостаточны для описания биологического воздействия.

Термин	Определение и значение
SPD	Спектральное распределение мощности по длинам волн. Необходимо для сравнения метамерных источников.
Освещенность, лк	Световой поток на поверхность с весовой функцией дневного зрения $V(\lambda)$. Практически не учитывает NIR и недостаточно описывает циркадную дозу.
Облученность, Вт/м²	Радиометрическая мощность на единицу площади. Для невидимого NIR значительно информативнее освещенности.
Энергетическая экспозиция, Дж/см²	Облученность, интегрированная по времени. В PBM критична вместе с мощностью дозы, рабочим циклом, площадью и интервалом.
Радансность, Вт/(м²·ср)	Плотность излучения по телесному углу. Ключевая величина для оценки фотохимической опасности ярких малых источников для сетчатки.
Меланопическая EDI	Эквивалентная дневному свету освещенность, взвешенная по чувствительности меланопсина и ipRGC. Описывает один из основных невизуальных путей.
CCT	Коррелированная цветовая температура. Два источника с одинаковой CCT могут иметь разные SPD и меланопическую EDI.
CRI / TM-30	Индексы цветопередачи. Высокая цветопередача не гарантирует благоприятный циркадный профиль или низкую TLM.
TLM	Временная модуляция света. Значимы частота, глубина, форма сигнала, рабочий цикл и гармоника.
PstLM	Метрика кратковременной заметности мерцания. Значение 1 приблизительно соответствует среднему порогу прямого восприятия мерцания.
SVM	Показатель видимости стробоскопического эффекта для движущихся объектов, главным образом в диапазоне 80-2000 Гц.
PAVM	Метрика видимости фантомного массива при движениях глаз. Пока не является клиническим пределом.
Опасность синего света	Фотохимически взвешенная ретинальная экспозиция примерно в диапазоне 380-550 нм с максимумом около 435-440 нм.

Для корректного исследования внутреннего освещения необходимо регистрировать: спектральную облученность в Вт/(м²·нм) на уровне глаза и кожи; меланопическую EDI; радансность, взвешенную по функции опасности синего света; исходную форму

временного сигнала; PstLM/SVM/PAVM; яркость источника; угловой размер; расстояние; блескость; карту температуры; фактический временной профиль.

4. Верификация утверждений исходного видеоматериала

Исходный видеоматериал объединяет инженерные факты, воспроизводимые лабораторные эффекты, предварительные результаты по ближнему инфракрасному излучению и выводы о хронических заболеваниях, выходящие за пределы представленных данных.

Тезис ролики	Что найдено	Оценка
Обычный LED практически не излучает в красном и NIR-диапазоне	У типичного изделия с синим кристаллом действительно почти нет излучения выше 780 нм. Доля глубокого красного зависит от CCT и CRI. Существуют другие LED-архитектуры.	Частично подтверждено
420 нм останавливает митохондрии	Kaynezhad измерял вариабельность $oxCCO/Hb$ у 7 мышей. ATP, OCR, $\Delta\psi$ и повреждение не измерялись.	Сильное преувеличение
Отсутствие NIR вызывает усталость и кофеиновую зависимость	Прямых клинических исследований этой цепочки нет.	Не подтверждено
Лампа накаливания восстанавливает функцию	Одно небольшое неконтролируемое офисное исследование выявило улучшение цветового контраста после добавления ламп накаливания.	Гипотезообразующий сигнал
LED сокращает жизнь	Продольных исследований у человека, выделяющих специфический эффект LED, нет. Имеются данные на дрозофилах и эпидемиологические данные об искусственном ночном свете.	Не подтверждено
LED сравним с асбестом	Отсутствуют сопоставимые данные по идентификации опасности, зависимости «экспозиция-ответ» и специфичности заболеваний.	Необоснованно
Показанная лампа сильно мерцает	Частота около 119,9 Гц и глубина модуляции 63-65% указывают на выраженную TLM, вероятно связанную с драйвером или режимом диммирования.	Верно для измеренного экземпляра

4.1. Исследование Kaynezhad и соавт. (2022): дизайн и фактически измеренные показатели

Параметр	Данные
Модель	7 мышей C57BL, 6-7 месяцев
Условия	Кетамин/Dormitor, тропикамид, темная комната
Свет	420 нм, FWHM 18 нм, около 5 Вт/м ² на роговице
Протокол	1 ч исходного наблюдения, 1 ч воздействия, 1 ч восстановления
Падающая энергетическая экспозиция на роговице	Около 1,8 Дж/см ²
Метод	Широкополосная спектроскопия в ближнем инфракрасном диапазоне: $oxCCO$, HbO_2 , HHb
Наблюдение	Увеличение абсолютной вариабельности и дрейфа сигналов
Не измерялось	ATP, OCR, $\Delta\psi$, дыхательные комплексы, ROS, ERG, гистология, гибель клеток
Контроль	Оптический фантом; синхронного имитационного контроля на живых животных не было
Статистика	Непарный критерий Манна-Уитни для периодов наблюдения одних и тех же животных; одностороннее тестирование
Вывод	Работа допускает острый митохондриальный или гемодинамический ответ, однако не доказывает остановку дыхания или повреждение

Первичный источник: [Kaynezhad et al., Journal of Biophotonics, 2022](#)

5. Развитие гипотез о биологическом действии искусственного света

Предположение о биологической неполноценности некоторых режимов искусственного освещения возникло задолго до распространения LED. Современные методы позволяют проверить часть исторических гипотез с помощью измеримой экспозиции и заранее определенных исходов.

Период	Понятие	Назначение
1940-е-1980-е	Fritz Hollwich: искусственный свет, глаз и эндокринные реакции	Ранние небольшие физиологические работы, слабые современные стандарты контроля
1973	John Ott: Health and Light, термин malillumination	Влиятельная системная гипотеза; значительная часть утверждений не получила строгой репликации
1980-е-1990-е	Фотобиологическая безопасность и мерцание пускорегулирующей аппаратуры	Формирование спектра действия опасности синего света; офисные исследования частот 100/120 Гц
1990-е	Синие светодиоды на основе GaN	Практическая основа недорогих белых LED с люминофорной конверсией
2000-е	Меланопсин/ipRGC и α-опическая метрология	Появление отдельной измеримой циркадной характеристики света
2000-е-2020-е	Фотобиомодуляция красным и ближним инфракрасным светом	CCO/NO/ROS, перфузия и системные эффекты; зависимость от протокола
2010-е	Массовые требования энергоэффективности и модернизация освещения	Резкое снижение цены, рост внедрения, избыточное освещение и распространение электронных драйверов
2020-е	Когорты с носимыми датчиками света, фМРТ-исследования TLM, испытания фонового NIR	Первые крупные наборы персональных данных об экспозиции и более строгие механистические эксперименты

Критический обзор исследований 1941-1999 годов не обнаружил убедительных крупных эффектов, которые ранняя литература приписывала люминесцентному освещению полного спектра. Современная гипотеза получает поддержку только там, где опирается на меланопическую метрологию, радиометрию и контролируемые протоколы фотобиомодуляции.

6. Спектральная архитектура источников

Спектр источника определяет множество биологических и визуальных параметров. Название технологии дает лишь приблизительную подсказку.

Источник	Типичный спектр	Ключевые стороны	Риски и ограничения
Солнечный свет	УФ, видимый, NIR и ИК-диапазоны; динамика по времени и погоде	Сильный синхронизатор циркадных ритмов, широкий спектр	УФ-излучение, блескость, тепло; эффект пребывания на улице смешан с активностью и средой
Лампа накаливания, 2700 К	Гладкий тепловой спектр с ростом к ИК-диапазону	Высокая точность цветопередачи, глубокий красный и NIR, плавный спектр	Низкая светоотдача, тепло, возможная плавная модуляция 100/120 Гц
Галогенная лампа	Тепловой спектр с более высокой цветовой температурой	Высокая цветопередача, компактность	Тепловая нагрузка, энергопотребление, высокая яркость источника
Люминесцентная лампа	Линии ртути и полосы люминофора	Высокочастотный пускорегулирующий аппарат может обеспечивать стабильный световой поток	Ртуть, прерывистость спектра, модуляция 100/120 Гц у старых магнитных аппаратов
Белый LED с синим кристаллом	Пик 445-455 нм и широкая полоса люминофора 500-700 нм	Эффективность, управляемость, стоимость	Мало NIR; возможны провал в голубовато-зеленой области, блескость и TLM драйвера

Источники	Гамма-диапазон	Спектральные характеристики	Риски и ограничения
LED с фиолетовым кристаллом	Возбуждение 405-420 нм и несколько люминофоров	Более полное заполнение видимого спектра, высокие Rf/R9	Снижение эффективности, рост стоимости и тепловой нагрузки; околофиолетовая экспозиция требует оценки
RGB и гибридные системы	Несколько узких или комбинированных каналов	Настраиваемое SPD и управление циркадным воздействием	Хроматическая TLM, дрейф калибровки, метамерное несоответствие
Многоканальная система с NIR	Видимые каналы и каналы 660/730/850/940 нм	Независимая дозировка NIR	Необходимы радиометрия, контроль тепловой безопасности и валидация протокола
OLED	Широкая диффузная излучающая поверхность	Низкая локальная яркость и мягкая геометрия	Возможны PWM и иная модуляция драйвера; ограничения по эффективности и цене

6.1. Термин «полный спектр»: определение и ограничения

В коммерческом освещении термин «полный спектр» обычно означает более равномерное заполнение видимого диапазона 380/400-780 нм. Он не означает воспроизведение солнечного спектра 300-2500 нм и не гарантирует наличие ультрафиолетового, фиолетового, глубокого красного или ближнего инфракрасного излучения. Высокий CRI также не гарантирует низкую TLM, оптимальную меланопическую дозу или отсутствие дискомфорта от блескости.

6.2. Энергетическая эффективность и спектральный компромисс

Архитектура с синим кристаллом стала доминирующей благодаря высокой световой отдаче. Перераспределение части энергии в глубокий красный и NIR-диапазон снижает фотопическую эффективность в лм/Вт, поскольку фотопическая функция слабо учитывает длинные волны, а NIR не вносит вклад в освещенность. Поэтому рынок, оптимизированный по лм/Вт, системно исключает NIR даже при его возможной биологической ценности. Это экономический механизм отбора, а не доказательство вреда отсутствия NIR.

7. Циркадные эффекты световой экспозиции: доказательства у человека

Световая экспозиция на уровне глаза вечером и ночью, особенно при высокой меланопической эквивалентной освещенности дневным светом, дозозависимо подавляет секрецию мелатонина и сдвигает циркадную фазу. Эффект зависит от времени воздействия и индивидуальной чувствительности.

Исследования	Дозы и условия	Результаты	Комментарии
Phillips 2019	Зависимость «доза-ответ» для обычного комнатного света	ED50 около 24,6 лк; 10/30/50 лк задерживали начало секреции примерно на 22/77/109 мин	Более чем 50-кратная межиндивидуальная вариабельность
Souman 2018	2700 К, 175 лк, 49 против 171 mEDI	Подавление мелатонина менее 9% против почти 50%	Острая лабораторная конечная точка
Blume 2022	60 лк, 59 против 123 mEDI, 1 ч перед сном	Мелатонин около -14% при высокой mEDI; значимых изменений PSG, PVT и сна не выявлено	Биомаркер изменился без клинического эффекта
Rahman 2017	LED с ослабленной синей составляющей против люминесцентного света	Подавление мелатонина около 25% против 57%	Общая продолжительность сна и SWS не различались

Исследование	Доза и экспозиция	Результат	Ограничения
Chang 2015	n=12; электронное устройство 4 ч перед сном в течение 5 вечеров	Мелатонин -55%; задержка фазы около 1,5 ч; засыпание позднее на 10 мин	Устаревшее устройство, малая выборка, длительная экспозиция
Gibbons 2022	Реалистичные дорожные HPS/LED; роговичная mEDI 0,22-5,7 лк	Острого подавления мелатонина в слюне не выявлено	Короткая экспозиция в реальных дорожных условиях

Главный вывод: освещенность и CCT недостаточны для описания биологической дозы. Источники одинакового визуального вида могут различаться по меланопической EDI в несколько раз. Специально спроектированный LED с ослабленной синей составляющей может быть менее циркадно активным, чем люминесцентный источник.

7.1. Физиологическая роль дневной световой экспозиции

Синяя и меланопически активная составляющие выполняют положительную дневную функцию: синхронизацию циркадных ритмов, поддержание бодрствования, настроения и устойчивости ритма. Метаанализ 29 исследований с 1210 участниками показал умеренное улучшение субъективной и объективной бодрости. Терапия ярким светом клинически эффективна при некоторых депрессивных состояниях. Поэтому универсальное сокращение синей составляющей способно ослабить полезный дневной сигнал.

Экспертный консенсус Brown и соавт. предлагает ориентиры: не менее 250 лк меланопической EDI на уровне глаза днем, не более 10 лк в последние три часа перед сном и не более 1 лк во время сна. Это рекомендации для организации светового режима, а не границы токсичности.

8. Метаболизм, сердечно-сосудистая система и смертность

Механистическая связь циркадного рассогласования с метаболизмом глюкозы и сердечно-сосудистой физиологией биологически правдоподобна. Данные о хронических клинических исходах остаются преимущественно наблюдательными.

8.1. Контролируемые краткосрочные исследования у человека

Работа	Протокол	Результат	Что доказывает
Mason 2022	n=20; две ночи менее 3 лк против одной ночи с верхним светом 100 лк	ЧСС выше, HRV ниже, чувствительность к инсулину хуже; N2 выше, SWS/REM ниже	Одна яркая ночь способна остро изменять автономную регуляцию и метаболизм глюкозы
Chamorro 2021	n=20 мужчин; перекрестное сравнение темноты и менее 5 лк	Небольшие изменения сна; значимых изменений глюкозы, инсулина и С-пептида не выявлено	Очень слабый ночной свет не воспроизвел метаболический эффект
Scheer 2009	Принудительная десинхронизация	Постприандиальные глюкоза, инсулин и АД выше; лептин и эффективность сна ниже	Циркадное рассогласование патофизиологически активно
Morris 2015	Инверсия режима и прием пищи биологическим вечером	Вечерний ответ глюкозы около +17%; эффект рассогласования около +6%	Время приема пищи и биологическая фаза имеют независимые эффекты
Harmsen 2025/26	n=13 с диабетом 2-го типа; 4,5 дня естественного света через окна против постоянного офисного света 300 лк	Больше времени в нормогликемии, выше окисление жиров, сдвиг фазы мышечных часов	Важный предварительный результат; яркость, спектр и динамика не разделены

8.2. Персональная экспозиция ночному свету: данные UK Biobank

Исход	Число участников / наблюдение	Верная экспозиция против темной половины	Критические ограничения
Диабет 2-го типа	84 790; 1997 случаев; 7,9 года	HR 1,29; 1,39; 1,53 по возрастающим категориям	Одна неделя измерения света на запястье; источник и глазная mEDI неизвестны
Смертность	88 905; 3750 смертей; около 8 лет	aHR примерно 1,21-1,34	Ночная активность и заболевание могут определять экспозицию
Сердечно-сосудистые заболевания	88 905; 9,5 года	CAD 1,23; MI 1,42; HF 1,45; AF 1,28; инсульт 1,28	На 1 SD эффекты около 1,05-1,08; одна платформа и исследовательская группа
Психическое здоровье	86 772	Большое депрессивное расстройство OR 1,30; самоповреждение OR 1,27	Преимущественно поперечные или пожизненные оценки; особенно вероятно обратная причинность

Ночные категории в UK Biobank имели медианы около 0,62; 2,48; 16,37 и 105,3 лк. Датчик носили на доминантном запястье. Он не различал потолочный свет, экран, пробуждение, сменную работу и нахождение вне постели. Эти публикации дают важный проспективный сигнал, однако не являются четырьмя независимыми репликациями.

8.3. Спутниковые оценки искусственного ночного освещения

Спутник измеряет восходящую радиансность территории. Он не измеряет свет на роговице, положение штор, внутренний источник и его спектр. VIIRS также сравнительно слабо регистрирует коротковолновую составляющую LED. Наружное искусственное ночное освещение одновременно коррелирует с PM2.5, NO₂, шумом, трафиком, плотностью застройки, социально-экономической депривацией и городским островом тепла.

Когорта	Сигнал	Интерпретация
Гонконг, 58 692 пожилых	На IQR ALAN: HR 1,11 для госпитализации по поводу ИБС и 1,10 для смерти от ИБС	Небольшая ассоциация, возможное городское смешение
UK Biobank, наружное освещение и диабет 2-го типа	На IQR HR 1,05; Q4 против Q1 1,14	Источник света неизвестен
Нидерланды, 2026 год, 6,3 млн	Смертность от диабета 2-го типа HR 1,06; ожирение 1,07; значимых эффектов для ИБС и цереброваскулярных заболеваний не выявлено	Эффекты малы и зависят от масштаба пространственного анализа
UK Biobank, смертность, 2024 год, 273 335	После учета PM2.5 и шума HR естественной смертности 1,03, доверительный интервал включает 1; значимого эффекта для CVD нет	Сильное контрдоказательство простой причинной гипотезе об ALAN

9. Искусственный ночной свет, сменная работа и онкологические риски

Международное агентство по изучению рака классифицирует работу в ночную смену как вероятно канцерогенную для человека, группа 2A. Эта классификация относится к сменной работе и циркадному нарушению, а не к светодиодной технологии как таковой.

Механистическая линия включает подавление мелатонина, нарушение работы циркадных генов, изменение метаболизма и эксперимент Blask, в котором кровь со сниженным уровнем мелатонина после ночного светового воздействия стимулировала рост ксенотрансплантатов рака молочной железы у крыс. Это искусственная перфузионная модель с ограниченным числом доноров.

Исследования	Результаты	Ограничения
Метаанализ ALAN, 2024 год	Наружный свет: RR рака молочной железы 1,12; внутренний свет: RR 1,08 с доверительным интервалом, включающим 1; данные по предстательной железе крайне неоднородны	Небольшой сигнал для наружного света, слабая причинная специфичность
NHS II	Верхний квинтиль наружного ALAN связан примерно с +14% инвазивного рака молочной железы	Связь сильнее до менопаузы и у курящих; спутниковый показатель экспозиции
MCC-Spain	Синий наружный свет: рак молочной железы OR 1,47; рак предстательной железы OR 2,05	Исследование «случай-контроль», Барселона и Мадрид, множественные метрики
Travis 2016	10 проспективных исследований, 1,4 млн женщин: любая ночная работа RR 0,99; не менее 30 лет RR 1,00	Сильное контрдоказательство крупному эффекту для рака молочной железы
Danish nurses / CECILE / Generations	Основные оценки незначимы или исчезали после поправки на загрязнение	Неоднородность и смещение
Модернизация LED в Лос-Анджелесе	+0,479 смерти от рака молочной железы на 100 000 в синтетическом контроле	Один город, короткий латентный период, нет индивидуальной экспозиции; причинная надежность очень низкая

Формулировка для публикации: ночная сменная работа и хроническое воздействие искусственного ночного света являются правдоподобными канцерогенными контекстами. Специфическая онкологическая опасность LED не установлена. Аналогия с асбестом не подтверждается по критериям специфичности, латентного периода, зависимости «экспозиция-ответ» и патологии у человека.

10. Временная модуляция света: физические параметры, нейрофизиология и симптомы

Временная модуляция света (TLM) является реальной и технически устранимой характеристикой. Световой поток диода быстро следует изменениям тока, поэтому форма сигнала драйвера непосредственно определяет временную структуру светового выхода.

Исследование	Экспозиция	Результат	Ограничения
Lindén 2025	n=25; 7-Гл фМРТ; прямоугольная модуляция 50/100/300/700 Гц, 100%; синусоидальная 100 Гц, 33%	При 50 Гц выраженный BOLD-ответ; при 100 Гц прямоугольной модуляции ответ V1/V2/LOC; для синусоидальных 100 Гц и 700 Гц значимого ответа не выявлено	Очень яркий прямоугольный стимул предельной глубины; BOLD-ответ не означает повреждение
Veitch 2024	n=34; постоянный ток и прямоугольная модуляция 100/500 Гц, 100%; 500 лк; до 3 ч	Зрачок больше при 100 Гц; изменения ERP и активности источников; влияния на ситуативную тревожность не выявлено	Множество конечных точек, молодая группа
Zhao 2020	n=10; 100/400/1500 Гц; синусоидальная модуляция 10/30/70%	Затылочная альфа-активность и утомление зависели от частоты и глубины	Малая выборка
Laycox 2024	N=47/50; 60/120/600 Гц против постоянного тока	Небольшое замедление выполнения отдельных задач чтения	Эффекты зависели от текста
Prigorkina 2026	n=48; незаметные 60 Гц, заметные 30 Гц, контрольное условие	Для 60 Гц значимого эффекта практически не выявлено; 30 Гц замедляли выполнение	Сильное контрдоказательство обобщающей гипотезе
Miller 2024	n=55, включая 25 участников с мигренью; 120-10 000 Гц	Группа с мигренью чаще видела фантомный массив; головная боль после сессии у 41% против 8%	Сама длительная задача с саккадами могла вызвать симптомы
Wilkins 1989	Около 100 офисных работников; 100 Гц и глубина 43-49% против 32 кГц	Головная боль и зрительное напряжение примерно вдвое ниже при высокой частоте	Общий сигнал головной боли около r=0,059; эффект определялся одной группой

Исследование	Методика	Результат	Ограничения
Sekulovski 2020	46 сотрудников, 13 недель; SVM 0,47 против 1,34	Значимых эффектов для глаз, головы, настроения и самочувствия не выявлено	Разбавление дневным светом; сотрудники Signify

10.1. Источники и параметры временной модуляции света

- Двухполупериодное выпрямление при малой емкости создает пульсации 100/120 Гц.
- Качественный DC-DC-драйвер постоянного тока с накопителем энергии способен подавить пульсации почти до уровня постоянного тока.
- Широтно-импульсная модуляция часто дает глубину 100%. При малом рабочем цикле возникают выраженные гармоники и фантомные массивы.
- Несовместимость TRIAC или фазового диммирования вызывает выпадения, пакетный режим, дрожание периода и субгармоники.
- Источник с хорошими параметрами при полной нагрузке может демонстрировать выраженную модуляцию при диммировании.
- RGB- и настраиваемые белые системы могут иметь хроматическую модуляцию при почти постоянной фотопической яркости.

10.2. Распространенность на рынке и нормативные требования

Показатель	Данные
База IEA 4E	137 265 пригодных значений PstLM и 236 133 регистраций SVM; в данных поставщиков встречаются значения-заполнители
Независимые испытания ламп	580 ламп приобретены и испытаны в 2016-2024 годах в Европе и Австралии
PstLM >1	10/580, около 1.7%
SVM >0.9	135/580, 23.3%, преимущественно старые и нерегулируемые продукты
Предел ЕС при полной нагрузке	PstLM ≤1; SVM ≤0,4 с 1 сентября 2024 года, с исключениями
Новые изделия E27 в исследовании Mantela	20 изделий, купленных в 2021 году: SVM около 0-0,04; дешевые устаревшие схемы практически исчезли
Критический пробел	Испытание соответствия обычно не охватывает установленную систему и весь диапазон диммирования

Процент мерцания и замедленная видеосъемка телефоном пригодны только для первичного скрининга. Полная метрология требует исходной формы сигнала, спектра гармоник, частоты, глубины, рабочего цикла, PstLM, SVM, PAVM, яркости, геометрии и испытаний с реальным диммером.

11. Сетчатка, ретинальный пигментный эпителий и фотохимический риск

Коротковолновая фототоксичность при достаточной ретинальной дозе причинно установлена. Применимость клеточных и животных моделей к обычным условиям внутреннего освещения остается главным предметом дискуссии.

11.1. Механизмы фотохимического повреждения

Фотохимический риск для глаза с естественным хрусталиком охватывает примерно 380-550 нм и максимален около 435-440 нм. Предлагаемые механизмы включают возбуждение эндогенных хромофоров, фотосенсибилизацию A2E и липофусцина, образование ROS, повреждение мтДНК, окисление липидов, митохондриальную деполяризацию, аутофагию, апоптоз, некроптоз и нарушение наружного гематоретинального барьера.

Работа	Модель и доза	Результат	Примечание
Godley 2005	Первичные клетки RPE человека; 390-550 нм; 2,8 мВт/см²; до 6 ч, 60,5 Дж/см²	ROS, повреждения мтДНК, снижение дыхательной активности	Прямое длительное облучение клеток
Roehlecke 2009	ARPE-19; 405 нм; 0,3/1 мВт/см²; 3-72 ч	ROS, MMP и изменения ультраструктуры	Очень длительное воздействие околофиолетового света
Kuse 2014	Клетки 661W и первичные клетки сетчатки; 0,38 мВт/см² до 24 ч, 32,8 Дж/см²	ROS, агрегация S-опсина, потеря MMP, гибель клеток	Опухолевая клеточная линия и прямое облучение
Arnault 2013	RPE свиньи с A2E; 380-520 нм; 18 ч	Максимальная токсичность при 415-455 нм	Сенсибилизированная модель AMD; связи и патенты Essilor
Marie 2018	RPE свиньи с A2E; 440 нм, около 58 Дж/см²	H ₂ O ₂ , супероксид, изменения АТР, Δψ, OCR и комплекса I	Сильное механистическое исследование, высокая прямая доза
Françon 2024	hiPSC-RPE; синий свет 455 нм, 0,185 Дж/см²; белый свет, 3,6 Дж/см²	Изменения морфологии, микроядер и PAR, стресс и аутофагия	Клетки человеческого происхождения, но мало независимых доноров

11.2. Данные исследований на животных

Работа	Экспозиция	Результат	Ограничения
Shang 2014	Крысы-альбиносы; 750 лк; синие и белые LED, CFL; 12:12; 3-28 дней	Изменения ERG, ONL, TUNEL и признаки окислительного повреждения; синие и белые LED хуже	14 дней темновой адаптации; альбинизм; ретиальная облученность выше человеческой
Krigel 2016	Крысы-альбиносы и пигментированные крысы; 500-6000 лк; острый и хронический протоколы	6000 лк вредили всем; при 500 лк потеря ONL у альбиносов, без значимой потери у пигментированных животных	Пигментация радикально изменила результат
Jaadane 2015/17	Крысы-альбиносы; 449 нм или белый свет; непрерывно 4,75-72 ч	Повреждение RPE, ONL, митохондрий и гематоретинального барьера	Длительная экспозиция у обездвиженных животных; допущения дозовой модели
Françon 2025	Повторные малые дозы синего или белого света дважды в день, 15 дней	Необратимые изменения RPE и сетчатки	Важный сигнал повторяющейся низкой дозы; одна парижская исследовательская сеть
Sun 2026	140 самцов крыс; 200/1000 лк; 8 ч/день, 5 дней/неделю, 6 месяцев	Сосудистые, воспалительные и RPE-повреждения от белого и синего света; 1000 лк вредили при всех источниках	Ночное животное; синий источник выше 9999 К; уравнивание по лк

11.3. Исследования у человека и сопоставление доз

Данные	Результат	Значение
Игрушечный LED 410 нм, по 20 секунд в течение двух дней	Центральная скотома и стойкая фовеальная атрофия у подростка	Яркий близкий точечный источник фиолетового света опасен
Косметическая маска с синими LED	Описание случая парафовеального поражения RPE и фоторецепторов	Сигнал для близко расположенных косметических устройств; доза неизвестна
Систематический обзор терапии ярким светом	43 исследования; объективного повреждения обычно не обнаружено	Отрицательный сигнал у человека при ярком свете, но ограниченных курсах
Тайваньская когорта IOL, 186 591 операция	Синие фильтры IOL: неэкссудативная AMD HR 0,95; экссудативная AMD HR 0,96	Нет крупного защитного эффекта дополнительного удаления синей составляющей
Финская когорта IOL, 11 397 глаз	Инцидентная pAMD: HR около 1,08; значимого эффекта не выявлено	Независимое контрдоказательство

Источник	Доля длительного предела опасности синего света при преднамеренном прямом взгляде
Бытовые лампы	Около 10-20%
Офисная LED-панель	Около 1.7%
Мониторы	0.05-0.11%
Ноутбуки	0.05-0.17%
Планшеты	0.03-0.21%
Телефоны	0.15-0.38%
Голубое небо	Около 3.4-10.4%
Открытый синий индикаторный LED на расстоянии 10 см	Может превышать предел радиансности для длительного воздействия

Измерения: O'Hagan et al., 2016. Значения не означают нулевой долгосрочный риск; они показывают, насколько бытовые источники отличаются от точечных излучателей высокой радиансности и многих лабораторных экспозиций клеточных культур.

12. Митохондриальные эффекты красного и ближнего инфракрасного излучения. Фотобиомодуляция

Красное и ближнее инфракрасное излучение способно вызывать биологический ответ при достаточной дозе. Подтверждение терапевтического эффекта и подтверждение вреда вследствие отсутствия такой экспозиции представляют собой отдельные исследовательские задачи.

12.1. Предлагаемые механизмы

- Поглощение красного и NIR-излучения цитохром-с-оксидазой, высвобождение связанного NO, изменение переноса электронов и мембранного потенциала.
- Кратковременные сигналы ROS, NO и Ca²⁺ с последующей транскрипционной адаптацией.
- Изменение микроциркуляции, доставки кислорода и воспалительной сигнализации.
- Системные гуморальные или иммунно-опосредованные эффекты после локальной экспозиции.

- Изменение свойств межфазной воды около АТР-синтазы. Эта гипотеза остается особенно спекулятивной.

Роль ССО как основного фотоакцептора остается предметом обсуждения. Имеются данные в пользу других хромофоров и механизмов. Большинство исследований фонового воздействия у человека не измеряло ССО, АТР, ОСР или Δψ напрямую.

Исследование	Дизайн и доза	Результат	Ограничения
Roddick 2024	n=151; double-blind within-subject; white LED ±735/875/960; 2 ч; около 10 J/cm²	HF-HRV/pleasure изменились; visual search хуже; broad cognition null	Острые surrogates; PBM-like dose
Giménez 2023	n=56; double-blind; 850 нм; 0/1/4/6.5 J/cm²; 4 недели	Только 6.5 зимой: mood/drowsiness/IFN-γ/HR; sleep/melatonin null	Many endpoints; industry funding
Kennedy 2023	n=30; sham; 660/740/810/870 collar; 3 недели	Subjective sleep/mood лучше; actigraphy null; ISI улучшился и в sham	Малая выборка и ожидание
Chen 2026	n=59 insomnia; 850 нм neck/white-eye/combo; 2 недели	PSQI improved all groups; actigraphy/melatonin/DLMO null	Her inert sham
Powner 2024	n=30; 670 нм; 40 mW/cm²; 15 мин; 36 J/cm² перед OGTT	Relative glucose AUC rise -27.7%; absolute AUC около -7.3%	Fixed order; no active/thermal sham; no ATP
Jeffery 2025	Small groups; 850 нм около 8.3 J/cm² на спину	24-h tritan threshold около 16% better	Нерандомизировано; demographic differences; surrogate
Shinhmar 2021	n=20 active, n=10 control; 670 нм 1.44 J/cm² утром	Tritan около 17%, protan около 12% better	Нерандомизировано, не blinded, same network/ChromaTest
Barrett 2026	n=22; 11 received incandescent desk lamps in LED office for 2 weeks	Color contrast shift около 25%	Different rooms; no randomization/blinding/sham; multiple simultaneous changes
Grewal 2020	31 intermediate AMD +11 controls; 670 нм 4.8 J/cm² до 12 мес	No functional or structural benefit in AMD	Важный null within same network
LIGHTSITE III	100 patients/148 eyes; 590/660/850 против low-dose active sham	BCVA difference около 2.4 letters at 13 months	Indication-specific therapy; pooled AMD evidence mixed

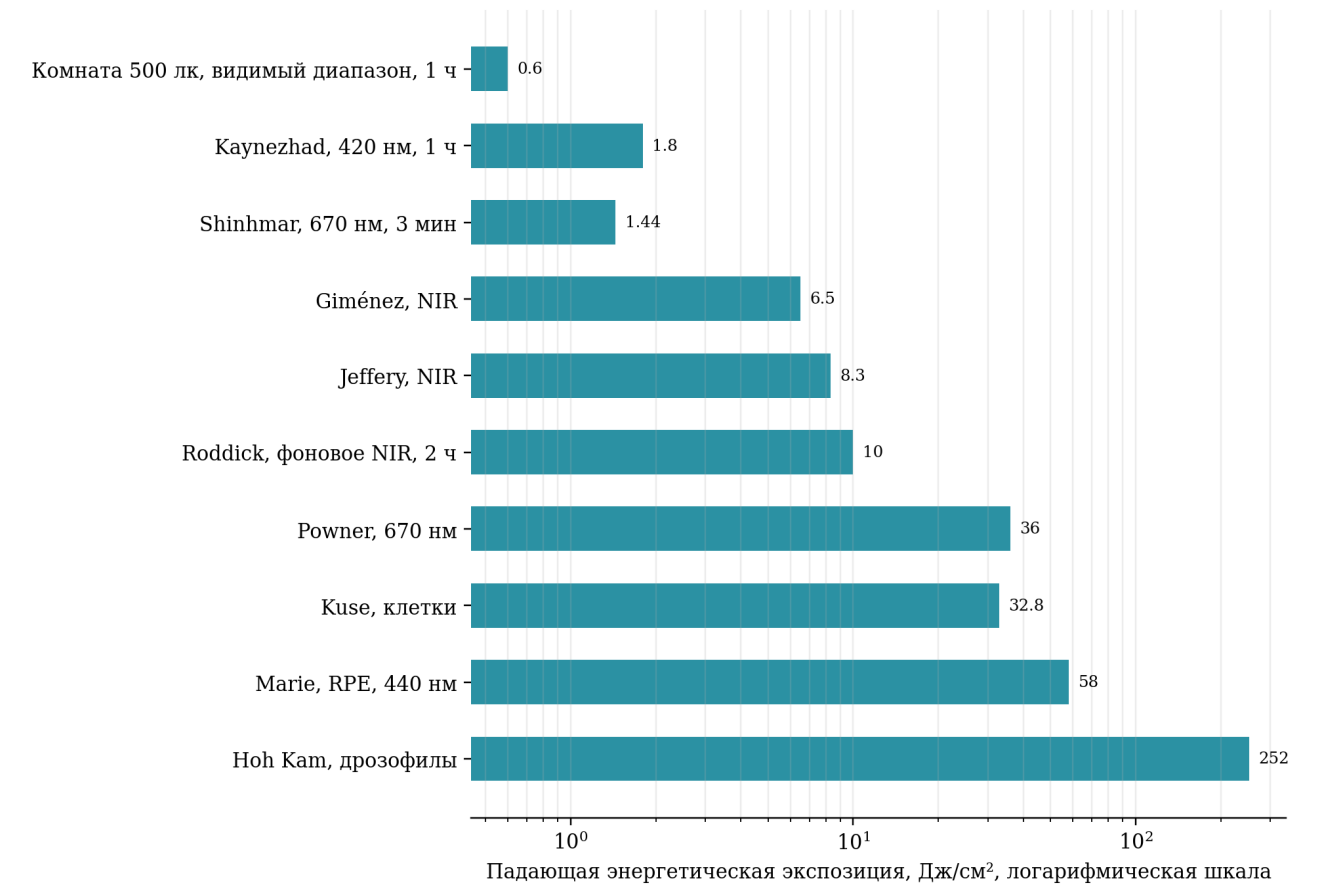


Рисунок 2. Порядки падающей энергетической экспозиции в разных опытах. Сравнение ориентировочное: дозы для клеточных культур, роговицы, кожи и всего организма не эквивалентны. Для комнатной экспозиции показан порядок для всего видимого диапазона, а не для узкой полосы 420 нм.

12.2. Гипотеза спектральной недостаточности: текущее состояние доказательств

- Не описан воспроизводимый человеческий синдром низкой NIR-экспозиции.
- Нет валидированного биомаркера и диагностического порога.
- Нет проспективной зависимости «доза-ответ» между персональной NIR-экспозицией и заболеванием.
- Нет рандомизированного исследования с удалением и последующим добавлением NIR при совпадающих видимом SPD, mEDI, TLM, тепловом режиме и поведении участников.
- Нет минимальной необходимой дозы, аналогичной EAR/RDA.
- Нет продольных данных о заболеваемости или смертности в связи с фоновым NIR.

Самая точная формулировка: красное и ближнее инфракрасное излучение является биологически активным и иногда терапевтически полезным дозированным стимулом. Обязательность такого излучения как компонента внутреннего освещения пока не установлена.

13. Системные эффекты и продолжительность жизни в экспериментальных моделях

Исследования на дрозофилах и других небольших модельных организмах подтверждают принципиальную возможность внеокулярного действия коротковолнового света. Прямой перенос дозы и геометрии экспозиции на человека существенно ограничен.

Работа	Модель/условия	Результат	Класс воздействия
Nash 2019	Дрозофилы; 460 нм; 20-30 мкмоль/(м²·с); режим 12:12 в течение жизни; не менее 100 на условие	Медианная продолжительность жизни ниже примерно на 30%; у белоглазых мух около 50%; вакуолизация мозга и нарушение лазания	Небольшой прозрачный организм; экспозиция всего тела; чистый синий свет
Yang 2022	Самцы мух без глаз; постоянный свет 460 нм; 10 или 14 дней	Сукцинат выше; пируват, цитрат и SDH ниже; глутамат и GABA ниже	Постоянный свет и метаболизм насекомого
Hoh Kam 2021	Самцы мух; 420 нм; 40 мВт/см²; 15 мин/день 7 дней либо 3 ч острой экспозиции	Комплексы I-IV около -50%; АТФ при острой экспозиции около -60%; частичное восстановление	252-432 Дж/см²; экстремальная узкополосная доза
Song 2022	Мухи с удаленными глазами; 460 нм; 4 Вт/м²; 10 дней	Максимальное дыхание -25-40%, комплекс II; для комплекса IV и H ₂ O ₂ значимого эффекта нет	Частично опровергает универсальную гипотезу ROS и комплекса IV
Begum 2015	Старые мухи; 670 нм	Улучшение АТФ, подвижности и доли выживших; максимальная продолжительность жизни не увеличилась	Направленная РВМ; та же исследовательская сеть Jeffery
Sipion 2023	Ослепленное рандомизированное исследование GLP; мыши 5xFAD; 810 нм; 5 месяцев	Пользы для когнитивных функций, амилоида, нейронов и микроглии не выявлено	Сильный отрицательный результат для гипотезы универсальной пользы РВМ

14. Неврологические эффекты, мигрень, утомление и психические функции

Для людей с мигренью и повышенной зрительной чувствительностью временная структура света и дискомфортная блескость являются наиболее правдоподобными механизмами, связанными с отдельными LED-системами. Утверждения о хронической усталости и тревожных расстройствах существенно опережают доступные данные.

- Участники с мигренью чаще видят фантомный массив и сообщают больше симптомов после длительных задач с саккадами. Прямых причинных сравнений выраженности симптомов при TLM и постоянном токе пока недостаточно.
- Глубокая модуляция 50-100 Гц изменяет реакцию зрачка, EEG/ERP и BOLD. Эти конечные точки показывают обработку сигнала мозгом, но не повреждение.
- Наиболее надежно установленный диапазон риска фоточувствительной эпилепсии составляет примерно 3-65 Гц с максимумом около 15-25 Гц. Обычная модуляция 100/120 Гц не имеет убедительной связи с приступами, хотя выпадения и субгармоники могут создавать низкочастотные компоненты.
- UK Biobank связывает яркий ночной свет с депрессией и самоповреждением, однако бессонница, мания, депрессия и ночная активность сами изменяют световой профиль.

- Данных о специфической связи LED с синдромом хронической усталости или хроническим тревожным расстройством нет.

15. Миопия, развитие глаза и воздействие фиолетового света

Защитная роль пребывания на открытом воздухе в профилактике миопии у детей подтверждена причинными данными. Вклад яркости, временной динамики, дофаминергических механизмов, фиолетового, красного и ближнего инфракрасного света требует дальнейшего разграничения.

В кластерном рандомизированном испытании Не и соавт. дополнительные 40 минут пребывания на открытом воздухе в школе в течение трех лет снизили частоту новых случаев миопии с 39,5% до 30,4%. Различие осевой длины глаза было статистически неубедительным. Результат подтверждает значение пребывания на открытом воздухе, но не идентифицирует LED как причину.

Torii и коллеги показали подавление экспериментальной миопии фиолетовым светом 360-400 нм у цыплят и выявили ретроспективные сигналы у человека, связанные с пропуском фиолетового света контактными линзами. Окна, стандартные линзы и большая часть внутреннего освещения действительно ослабляют фиолетовый диапазон. Клиническая причинность у человека пока подтверждена слабо.

Небольшое проспективное нерандомизированное исследование 2026 года сообщило о более благоприятных показателях рефракции, осевой длины и сосудистой оболочки глаза у школьников при освещении полного видимого диапазона 430-780 нм в классе и дома. Выборка около 85 детей и отсутствие рандомизации не позволяют считать вопрос закрытым.

16. Кожа, репродуктивная система и другие системные исходы

В этих областях выявлены биологические сигналы, однако большая часть данных получена при терапевтических, узкополосных или специфичных для животных экспозициях.

Область	Данные	Вердикт
Кожа	Свет 450 нм при 60 Дж/см ² вызывал пигментацию у женщин с фототипами III/IV. Обычные бытовые LED-устройства создают малую долю эффективной солнечной дозы.	Пигментация при высокой дозе подтверждена; вред обычной фоновой экспозиции не установлен
Мужская репродуктивная система	40 самцов крыс, 14 недель, 200 лк: чистый синий свет снижал мелатонин и подвижность сперматозоидов и повреждал семенники; белый LED вызвал менее выраженные гистологические изменения.	Сигнал на животных; равная освещенность не означает равную радиометрическую или меланопическую дозу; данных у человека нет
Мозг в подростковом возрасте	Ночные животные, 350 лк в темную фазу, 30 дней: коммерческий LED был хуже лампы накаливания по когнитивным показателям префронтальной коры и маркерам миелинизации.	Смещение времени, спектра и уравнивания по лк; мелатонин и сон не измерялись
Воспаление	Исследования высокодозного узкополосного воздействия на мышей сообщают об изменениях цитокинов и тревогоподобного поведения.	Дозы часто составляют сотни Дж/см ² в день; перенос на фоновую экспозицию слабый
Электромагнитные помехи	Нелинейные LED-драйверы создают гармоники и электромагнитные помехи; это установленный инженерный факт.	Убедительной связи помех бытовых ламп с заболеваниями не выявлено

17. Экологические последствия, избыточное освещение и эффект обратного роста потребления

Экологические исследования предоставляют наиболее убедительный массив данных о системных последствиях недостаточно регулируемого перехода на светодиодное освещение.

Работа	Наблюдение	Значение
Kyba 2017	Освещенная наружная площадь +2,2% в год; суммарная радиантность +1,8% в год, 2012-2016	Рост эффективности не остановил расширение освещения
Kyba 2023	Наблюдения граждан: яркость ночного неба +9,6% в год, 2011-2022	Удвоение менее чем за 8 лет; спутники недооценивают переход к синей составляющей
Sánchez de Miguel 2022	Снимки астронавтов: европейские города перешли к более белому и синему излучению	Спектральная трансформация городов
Boyes 2021	Численность гусениц ночных бабочек ниже на 47% в живых изгородях и на 33% на травяных обочинах; эффект LED сильнее натриевых ламп	Полевое сопоставление парных участков подтверждает экологическое воздействие
Giavi 2021	Искусственный ночной свет LED изменял дневные взаимодействия растений и опылителей	Ночное освещение влияет на дневные экологические связи
Nature Climate Change 2025	Широко распространенный ALAN изменял метаболизм экосистем	Системный биогеохимический эффект

Экологический ущерб определяется спектром, интенсивностью, направлением, продолжительностью и количеством установленных источников. Более эффективная лампа может снизить потребление электроэнергии на люмен и одновременно увеличить общее число люмен-часов. Поэтому преимущества жизненного цикла и эффект обратного роста потребления необходимо учитывать совместно.

18. Энергетическая эффективность, жизненный цикл и последствия выбора альтернатив

Светодиодные системы обеспечивают значительные энергетические и эксплуатационные преимущества. Комплексная оценка должна учитывать здоровье и экологию при сохранении климатических и ресурсных выгод.

По оценкам DOE, стадия использования составляет около 90% энергии жизненного цикла ламп. LED и CFL имеют значительно меньший суммарный энергетический след, чем лампы накаливания. Массовый возврат к лампам накаливания увеличит спрос на электроэнергию, тепловую нагрузку, выбросы и необходимую мощность инфраструктуры. В холодном климате часть тепла может быть полезна зимой, но летом она повышает потребность в охлаждении.

LED также добавляют электронные компоненты, критически важные материалы, сложность ремонта и электронные отходы. В европейской оценке около 40% источников уже в 2016 году были неразъемными. Конструкции со сменными драйвером и источником, стандартизованными

модулями и переработкой способны сохранить эффективность и уменьшить материальную нагрузку.

Наиболее перспективная альтернатива - качественная система твердотельного освещения: драйвер с малой временной модуляцией, рассеивающая оптика с низкой блескостью, меняющийся по времени меланопический профиль, высокая цветопередача, ремонтпригодность и при необходимости отдельный дозируемый NIR-канал. Инженерно это возможно уже сейчас. Клиническое превосходство отдельных конфигураций требует испытаний.

19. Исследовательские направления, происхождение данных и независимость подтверждений

Количество публикаций не тождественно количеству независимых подтверждений. Несколько наиболее заметных результатов получены повторяющимися исследовательскими сетями, когортами и методами.

Тема	Исследовательские группы	Сильная сторона	Риск перекрестности
Биологически неполноценное освещение	Ott; Hollwich	Историческая системная постановка	Слабый контроль и ранняя методология
Циркадная система и меланопсин	Brainard; Czeisler; Lockley; Cajochen; Brown; Spitschan; Figueiro/Rea	Воспроизводимая физиология человека и метрология	Малые лабораторные выборки; суррогатные конечные точки
NIR и митохондрии	Jeffery; Powner; Barrett; Kaynezhad	Системная гипотеза и эксперименты РВМ	Малые группы, повторное использование ChromaTest, ограниченное ослепление
Фототоксичность сетчатки	Behar-Cohen; Torriglia; Jaadane; Krigel; Françon	Спектры действия, клеточные и крысиные модели	Одна парижская сеть; модели альбиносов и ночных животных
A2E и RPE	Picaud; Sahel; Arnault; Marie; collaborators Essilor	Точное спектральное картирование	Связи с индустрией, патенты на фильтры, сенсibilизированная модель
Независимые исследования RPE	Godley/Boulton; Roehlecke/Funk; Kuse/Hara	Независимые механистические репликации	Прямые дозы на клеточные культуры
Старение дрозофил	Giebultowicz; Kretzschmar; Nash	Внеокулярные эффекты на уровне целого организма	Небольшой прозрачный организм
TLM	Wilkins; Veitch; Lindén; Miller; Lehman	Ответ человека, зависящий от формы сигнала	Экстремальные стимулы; непостоянство симптомов
Носимые измерители ALAN	Windred; Burns; Cain; Phillips; Lane; Rutter	Крупный проспективный набор персональных данных	Одна платформа UK Biobank повторно используется для многих исходов
ALAN в спальне	Obayashi; Saeki; Kurumatani	Прямые измерения у кровати	Одна японская когорта пожилых; мало событий
Метаболизм и дневной свет	Harmsen; Schrauwen; Hoeks	Перекрестные исследования у человека и мультиомика	Малые краткосрочные испытания; одновременно меняются несколько характеристик света
Миопия	Morgan; Wu; Torii; Tsubota	РКИ пребывания на открытом воздухе и спектральные гипотезы	Пребывание на улице объединяет множество переменных
Экология	Kyba; Gaston; Hölker; Boyes; Кноп	Полевые и планетарные эффекты	Неоднородность экспозиции

20. Данные, ограничивающие гипотезу универсального вреда LED

Оценка гипотезы требует явного учета данных, ограничивающих ее обобщаемость. Следующие результаты определяют границы гипотезы универсального вреда светодиодного освещения.

Контрдоказательство	Почему важно
Обычные лампы и экраны значительно ниже пределов острой опасности синего света	Объясняет разрыв между прямыми клеточными исследованиями и бытовой экспозицией
У пигментированных крыс Long-Evans не выявлена хроническая потеря ONL при 500 лк	Пигментация и оптика резко изменяют уязвимость
Две крупные когорты IOL не показали защиты от AMD синими фильтрами	Ограничивает гипотезу крупного ретинального эффекта фонового синего света
LED с ослабленной синей составляющей подавлял мелатонин меньше, чем люминесцентный источник	Название технологии не определяет циркадную дозу
Офисное исследование TLM Sekulovski не выявило значимого эффекта	Не вся измеримая модуляция приводит к выраженным симптомам
Новые регулируемые LED-изделия могут иметь SVM около нуля	Неблагоприятная временная модуляция технически устранима
Исследование PBM на модели 5xFAD по стандарту GLP не выявило эффекта	Красное и NIR-излучение не универсально улучшает модели митохондриальных заболеваний
Двенадцатимесячное исследование Grewal при AMD не выявило эффекта	Даже внутри одной благоприятно настроенной сети результат зависит от показателя и протокола
Связь наружного ALAN со смертностью исчезала после учета PM2.5 и шума	Городское смешение способно объяснить значительную часть ассоциации
Крупный проспективный анализ ночной работы и рака молочной железы дал RR около 1	Ограничивает сильные канцерогенные утверждения
Динамический LED с ослабленной синей составляющей может улучшать временной профиль света	LED допускает биологически ориентированный дизайн
Энергия жизненного цикла LED значительно ниже ламп накаливания	Политика должна совместно учитывать здоровье, экологию и климат

21. Интегративная модель и конкурирующие объяснения

Совокупность данных наиболее последовательно объясняется сочетанием нескольких воздействий. Каждый компонент требует отдельного измерения и самостоятельной причинной проверки.

Гипотеза	Предположение	Статус	Критический эксперимент
Циркадное рассогласование	Низкая дневная и высокая вечерняя mEDI ухудшает фазу, сон, глюкозу и настроение	Сильная	Продольное РКИ с сопоставленными световыми условиями
Временной нейросенсорный стресс	Глубокая TLM увеличивает головную боль и зрительное утомление в чувствительных группах	Умеренная	Ослепленное перекрестное сравнение постоянного тока и TLM с обогащением выборки по мигрени

Гипотеза	Предсказание	Статус	Критический эксперимент
Недостаточность NIR	Удаление NIR ухудшает митохондриальные и клинические показатели, добавление обращает эффект	Слабая, правдоподобная	РКИ удаления и добавления NIR с тепловым контролем
Кумулятивное повреждение синим светом	Повторные реалистичные ретинальные дозы вызывают измеримое структурное снижение	Открытая	Хронические модели на пигментированных животных с реалистичной дозой и когорты ОСТ у человека
Блескость и яркость источника	Небольшие яркие источники вызывают симптомы независимо от SPD и TLM	Умеренная	Перекрестное сравнение геометрии при совпадающих SPD и TLM
Эффект обратного роста	Рост эффективности снижает цену люмен-часа и увеличивает суммарную экспозицию	Сильная	Закупочный или естественный эксперимент со спектральным мониторингом
Городское смещение	Ассоциации ALAN исчезают после учета шума, загрязнения и поведения	Сильное альтернативное объяснение	Персональный глазной датчик и причинный дизайн поэтапного внедрения
Комплекс факторов открытого воздуха	Польза солнечного света совместно объясняется яркостью, динамикой, активностью и средой	Сильное альтернативное объяснение	Факторное воспроизведение компонентов открытого воздуха в помещении

21.1. Многофакторная модель экспозиции и риска

Для практической модели предлагается следующий вектор экспозиции:

$E = \{SPD(\lambda,t), L_B, melanopic\ EDI(t), TLM\ waveform, source\ luminance, angular\ geometry, thermal\ flux, duration, prior\ light\ history, susceptibility\}$

Любое исследование, которое сообщает только lux и CCT, оставляет большую часть вектора неизвестной. Любое сравнение LED и incandescent без совпадения видимого спектра, mEDI, TLM, heat и geometry не способно идентифицировать независимый эффект NIR или semiconductor architecture.

22. Программа экспериментальной проверки: виртуальная лаборатория

Исследовательская программа должна одновременно охарактеризовать реальный рынок, разделить причинные факторы в контролируемой световой камере, проверить долгосрочные исходы и оценить экологические последствия внедрения.

Контур	Дизайн	Основные конечные точки	Проверяемый научный вопрос
A. Атлас рынка	1000-3000 ламп и светильников: страны, ценовые сегменты, годы выпуска и типы диммеров	SPD 350-2500 нм; mEDI; L _B ; PstLM/SVM/PAVM; дискомфортная блескость; тепловые параметры; электромагнитные помехи; ремонтопригодность	Фактическая распространенность неблагоприятных спектров и схем драйверов
B. Острый эксперимент в световой камере	n=160-240; внутрииндивидуальный дизайн с маскированием; метамерные условия; NIR±; режим, близкий к постоянному току, и модуляция 120 Гц; дневные и вечерние сессии	DLMO, мелатонин, EEG/ERP, зрачковая реакция, HRV, PVT, зрительный поиск, глюкоза	Независимые острые эффекты mEDI, NIR и TLM
C. Группы повышенной чувствительности	Мигрень, фотофобия, высокая критическая частота слияния мельканий, пожилой возраст, заболевания сетчатки	Число дней с мигренью, выраженность симптомов, зрительные пороги, вегетативные реакции	Определение групп повышенного риска
D. Долгосрочное РКИ	600-1200 участников; жилые и офисные помещения; 6-12 месяцев; кластерный дизайн и индивидуальные датчики	Актиграфия/ПСТГ, DLMO, CGM, клэмп-исследование, АД/HRV, ОСТ/ОСТА, когнитивные функции, настроение	Клиническая значимость хронической световой экспозиции

Контур	Дизайн	Основные конечные точки	Проверяемый научный вопрос
Е. Добавление NIR	Двойное маскирование; тепловое соответствие; идентичные видимые SPD, mEDI и TLM; 8-12 недель	31P-MRS, дыхание PBMC и мышечной ткани, CGM/клэмп-исследование, HRV, зрительные функции	Раздельная оценка эффекта добавления и эффекта отсутствия NIR
Ф. Сетчатка	iPSC-RPE и органоиды человека; пигментированные животные; учет движений глаз; реалистичная радиантность; накопленная низкая доза	OCR, ATP, Δψ, мтДНК, OCT, ERG, гистология	Субпороговое кумулятивное повреждение
Г. Естественный эксперимент	Позаппанная модернизация муниципального и торгового освещения по схеме «до - после - контроль - воздействие»	Персональная экспозиция на уровне глаз, сон и метаболизм, насекомые, растения, засветка неба, потребление электроэнергии	Популяционная и экологическая причинность
Н. Открытая система доказательств	Открытый протокол, исходные данные, предварительная регистрация, реестр неблагоприятных и нулевых результатов	Все первичные и вторичные конечные точки	Оценка публикационного смещения и независимая критика

22.1. Острое факторное исследование в контролируемой световой камере

Предлагается двухэтапное рандомизированное перекрестное исследование. На первом этапе используются восемь условий по схеме 2×2×2: низкая или высокая mEDI; отсутствие или наличие NIR; режим, близкий к постоянному току, или глубокая модуляция 120 Гц. Видимые метамерные условия должны быть сопоставимы по фотопической освещенности, CCT, Duv, TM-30 Rf/Rg, пространственному распределению и яркости источника. Имитационное NIR-условие должно совпадать по температуре кожи и устройства. Последовательность условий балансируется между участниками после стандартизации предшествующей световой экспозиции, сна, потребления кофеина, времени приема пищи и лекарственных препаратов.

Набор первичных конечных точек следует заранее ограничить: сдвиг DLMO для вечернего исследования; HF-HRV либо сосудистый показатель для NIR; комплексный показатель мигрени и зрительного дискомфорта для TLM. Остальные показатели следует классифицировать как вторичные или поисковые. Необходимы поправка на множественные сравнения, байесовская оценка нулевых эффектов и публикация исходных временных форм сигналов и SPD.

22.2. Долгосрочное рандомизированное исследование у человека

- Продолжительность не менее 6 месяцев, предпочтительно 12 месяцев с сезонным балансом.
- Носимый спектрорадиометр на уровне глаз или калиброванный многоспектральный дозиметр, дополненный датчиками у кровати и в помещении.
- Повторные измерения DLMO, актиграфия, PSG в подвыборке, CGM, амбулаторные АД/HRV, стандартизованный OGTT или клэмп-исследование.
- OCT/ОСТА, аутофлуоресценция глазного дна, пороги контрастной и цветовой чувствительности, показатели сухого глаза.
- Число дней с мигренью, валидированные опросники симптомов, когнитивные функции и настроение с заранее заданной иерархией.
- Отдельный анализ по возрасту, состоянию хрусталика, мигрени, заболеваниям сетчатки, хронотипу, сменной работе и лекарственной терапии.
- Энергопотребление, тепловая нагрузка, техническое обслуживание и жизненный цикл измеряются одновременно с показателями здоровья.

22.3. Экспериментальная проверка гипотезы недостаточности ближнего ИК-излучения

В двух визуально и термически неразличимых помещениях формируются одинаковые видимый SPD, освещенность, mEDI, CCT, CRI, дискомфортная блескость и TLM. В одном помещении добавляется калиброванная экспозиция на длинах волн 735, 850 и 940 нм; в другом применяется имитационный контроль с сопоставимой тепловой нагрузкой. Через 8-12 недель воздействие прекращается, после чего проводится рандомизированная повторная экспозиция. Такой дизайн позволяет отдельно оценить эффект добавления и эффект отсутствия NIR.

22.4. Критерии пересмотра основных выводов

Результат	Как изменится позиция
Два независимых chronic matched-source RCT показывают клиническое ухудшение под blue-pump LED	LED-specific chronic risk будет повышен до вероятного
NIR removal/add-back дает reproducible mitochondrial и clinical dose-response	Spectral insufficiency станет подтвержденным modifiable exposure
Большая human OCT/OCTA cohort показывает cumulative change при измеренной L_B ниже стандартов	Нужен пересмотр long-duration blue-hazard framework
Blinded workplace TLM trials показывают sustained headache/migraine reduction near-DC	TLM limits следует переводить из visibility в health-based regulation
Matched LED/incandescent trials остаются null при достаточной мощности	Широкий source-specific вред станет маловероятным
Ecological BACI показывает устранение вреда warm/dim/shielded LED	Фокус политики сместится к спектру, направлению и длительности

23. Минимальные требования к измерениям и регистрации экспозиции

Для лабораторной программы и публичного аудита предлагается единый паспорт каждого источника и каждой экспозиционной сессии.

Блок	Обязательные поля
Источник	Производитель, модель, batch, power, driver topology, diffuser/optic, age, temperature
Спектр	Raw SPD 350-2500 нм; calibration date; bandwidth; distance; orientation; W/m²/nm
Visual	Lux, luminance, CCT, Duv, CRI Ra/R9, TM-30 Rf/Rg, SDCM
α-opic	Melanopic EDI/DER и другие CIE S 026 quantities at eye
Retina	Blue-hazard weighted radiance L_B, angular subtense, exposure time, risk group
Temporal	Raw waveform ≥50 kHz sampling, FFT, modulation depth, duty, PstLM, SVM, PAVM
Dimming	100%, 75%, 50%, 25%, minimum; actual driver-dimmer pair; dropout/jitter
Geometry	Vertical eye illuminance, source luminance, UGR/glare, reflections, gaze direction
Thermal	Skin/device temperature, radiant heat, ambient temperature, airflow
Human context	Clock time, circadian phase, prior 24-h light history, sleep, meals, caffeine, medications
Data integrity	Preregistration, timestamped raw data, exclusions, adverse events, code and protocol version

24. Стандарты, рекомендации и официальные оценки риска

Стандарты определяют метрологические процедуры и требования по установленным видам опасности. Они не заменяют многолетних эпидемиологических и клинических исследований.

Документ	Сфера	Сравнение
ICNIRP Visible/Infrared 2013	Retinal thermal и blue-light photochemical exposure limits	Лучше валидирован для acute injury, чем для decades-long subtle change
IEC 62471 / 62471-7	Photobiological safety и risk groups	Geometry/time specific; label не universal property
CIE S 026	α -opic metrology, включая melanopic EDI	Метрика воздействия, не disease threshold
CIE TN 012 / CIE 249	TLM measurement и visual effects	Visibility models, не chronic medical limits
IEC TR 61547-1	PstLM	Не migraine, phantom array или chromatic TLM
IEC TR 63158	SVM	Не clinical safety threshold
EU 2019/2020	Full-load PstLM $\leq$ 1, SVM $\leq$ 0.4 с 01.09.2024	Exceptions; installed/dimmed performance может отличаться
IEEE 1789	Frequency-percent modulation recommendations	Fundamental/depth плохо описывает complex waveforms
SCHEER 2018	EU health review of LED	No direct harm normal use; long-term and susceptible gaps
ANSES 2019	Blue light, circadian and flicker precaution	Более предосторожная оценка; часть evidence animal-based

25. Сравнительная оценка сценариев экспозиции

Сценарии существенно различаются по радиансности, времени, спектру и уязвимости. Категория источника сама по себе недостаточна для оценки риска.

Сценарий	Основной механизм	Текущая оценка
Прямой взгляд на blue/violet point source, игрушку, inspection lamp	Retinal radiance и photochemical injury	Высокий предотвращаемый риск
Косметическая/терапевтическая маска с открытыми глазами	Близкая high-radiance exposure	Требуется строгой защиты и dose verification
Яркий комнатный свет во время сна	Autonomic/circadian/metabolic	Острый human effect подтвержден при 100 lux
Blue-rich bright light вечером	Melatonin suppression и phase delay	Высокая причинная уверенность
Дешевая лампа 100/120 Гц с глубокой modulation	TLM/phantom array/neural response	Реальный comfort risk; chronic disease unknown
Near-DC warm diffuse LED вечером	Низкая melanopic/TLM/glare dose	Вероятно низкий риск, при корректной luminance
Bright melanopic light утром/днем	Entrainment и alertness	Часто полезен
Отсутствие NIR в помещении	Hypothetical mitochondrial insufficiency	Открытый вопрос

Сценарий	Основной механизм	Текущая оценка
Городской overlighting	Circadian/ecological exposure and rebound	Сильный системный риск

26. Протокол открытого научного рецензирования

При публикации отчет следует сопровождать структурированным запросом к исследователям, инженерам, офтальмологам и специалистам по стандартизации.

Тема	Вопрос для критики
Пропущенные данные	Какие human RCT, prospective cohorts или direct exposure measurements отсутствуют?
Дозиметрия	Где corneal, retinal, skin и plate doses сопоставлены некорректно?
Независимость	Какие публикации принадлежат одной cohort/lab network и переучтены?
TLM	Какая health-based metric лучше PstLM/SVM для migraine и phantom array?
NIR	Какой objective biomarker способен отличить benefit of addition от deficiency of absence?
Retina	Какая realistic cumulative dose и модель лучше всего приближает десятилетия indoor exposure?
Epidemiology	Как отделить ALAN от insomnia, shift work, noise, pollution и socioeconomic rhythm?
Ecology	Какие spectral/dimming/shielding interventions имеют сильные BACI данные?
Стандарты	Какие пределы основаны на injury, какие на visibility, где есть долгосрочный пробел?
Фальсификация	Какой результат заставит автора изменить основной вывод?

Критика должна содержать точную страницу или тезис, первичный источник, описание ошибки и предлагаемую исправленную формулировку. Общие заявления за или против LED без дозы, спектра, времени и waveform не считаются достаточным возражением.

27. Заключение

Совокупность данных указывает на более сложную структуру риска, чем дискуссия об отдельном синем пике или гипотеза единого токсического свойства всей LED-технологии.

1. Типичный белый LED с синим первичным излучателем спектрально отличается от солнечного света и лампы накаливания. Он почти не содержит ближнего инфракрасного излучения, часто имеет выраженный пик первичного излучателя и недостаточно заполненные голубовато-зеленую и глубокую красную области спектра.
2. Характеристики LED-систем существенно различаются. Технически доступны драйверы с малой временной модуляцией, рассеивающая оптика, управление освещением по времени суток и многоканальное формирование спектра.
3. Наиболее доказанный вред для человека связан со световой экспозицией в неподходящее биологическое время. mEDI на уровне глаза информативнее освещенности и CCT.
4. Временная модуляция света является самостоятельным фактором воздействия. Глубокая модуляция способна вызывать реакции сетчатки и коры головного мозга, а также зрительные артефакты. Связь обычных уровней TLM с хроническими заболеваниями не установлена.

5. Коротковолновая фототоксичность сетчатки причинно подтверждена при достаточной дозе. Большинство клеточных и животных протоколов существенно отличается от бытовой экспозиции человека.
6. В исследовании Kaynezhad не измерялась остановка митохондриального дыхания. Это центральное преувеличение исходного видеоматериала.
7. Фотобиомодуляция красным и ближним инфракрасным излучением дает эффекты, зависящие от протокола. Для предполагаемой недостаточности фонового NIR пока не определены биомаркер, клинический синдром и зависимость «доза-ответ»; отсутствуют исследования с удалением и последующим добавлением экспозиции.
8. Персонально измеренная ночная световая экспозиция связана с сахарным диабетом 2-го типа, сердечно-сосудистыми заболеваниями, настроением и смертностью, однако данные одной платформы UK Biobank не устанавливают причинность, специфичную для LED-источников.
9. Онкологические данные неоднородны. Классификация IARC, группа 2A, относится к работе в ночную смену. Аналогия LED с асбестом не выдерживает научной оценки.
10. Экологический эффект обратного роста потребления, засветка ночного неба и нарушения у насекомых и растений подтверждены убедительнее многих гипотез о хроническом воздействии на человека.
11. Массовый возврат к лампам накаливания приведет к значительному росту энергопотребления и тепловой нагрузки. Более перспективным направлением является биологически ориентированное твердотельное освещение.
12. Решающая исследовательская программа должна отдельно оценить mEDI, TLM, NIR и геометрию экспозиции в факторных исследованиях с участием человека и связать эти параметры с долгосрочными клиническими конечными точками.

Итоговая оценка

Массовые недорогие светодиодные изделия требуют критической оценки как недостаточно специфицированный компонент световой среды. Подтвержденные проблемы включают несоответствие световой экспозиции циркадному времени, избыточное освещение, дискомфортную блескость, временную модуляцию отдельных устройств и экологический ущерб. Общий токсический эффект твердотельного освещения для человека пока не установлен. Основная неопределенность связана с длительным сочетанием слабого дневного светового сигнала, вечерней меланопической экспозиции, отсутствия красного и ближнего инфракрасного излучения и повторяющейся низкоуровневой временной модуляции.

Приложение А. Расширенный реестр ключевых исследований

Таблица предназначена для быстрого аудита дизайна, дозы, результата и ограничения переноса.

Тема	Исследование	N/модель	Экспозиция	Ключевой результат	Основное ограничение
Циркадная система	Phillips 2019	Исследование с участием человека	Вечером, 10-50 лк	Зависимость мелатонина и фазы от дозы	Высокая межиндивидуальная вариабельность

Тема	Исследование	N/модель	Экспозиция	Качественный результат	Основное ограничение
Циркадная система	Souman 2018	Перекрестное исследование у человека	49 против 171 mEDI; одинаковые 175 лк и 2700 К	Подавление мелатонина менее 9% против около 50%	Острая конечная точка
Циркадная система	Blume 2022	Исследование с участием человека	59 против 123 mEDI	Мелатонин изменился; сон и PVT без значимого эффекта	Разрыв между биомаркером и клиническим исходом
Экран	Chang 2015	n=12	Электронное устройство 4 ч, 5 вечеров	Задержка фазы около 1,5 ч	Устаревшее устройство, малая выборка
Сон и метаболизм	Mason 2022	n=20	100 лк в течение одной ночи	Изменены ЧСС, HRV и чувствительность к инсулину	Одна ночь, малая выборка
Метаболизм	Harmsen 2025/26	n=13, диабет 2-го типа	Естественный дневной свет против постоянного офисного	Изменения нормогликемии, окисления жиров и биологических часов	Спектр, яркость и динамика изменялись одновременно
Эпидемиологи я диабета 2-го типа	Windred 2024	84 790	Неделя измерения света на запястье	HR ночного света до 1,53	Одна платформа, обратная причинность
Смертность	Windred 2024	88 905	Неделя измерения света на запястье	aHR ночного света 1,21-1,34	Поведенческий показатель экспозиции
Сердечно-сосу дистые заболевания	Windred 2025	88 905	Неделя измерения света на запястье	MI 1,42; HF 1,45	Эффекты на 1 SD малы
Наружное освещение	Liang 2024	273 335	Спутниковый ALAN	Смертность без значимого эффекта после учета PM2.5 и шума	Косвенный показатель экспозиции
Нейрофизиоло гия TLM	Lindén 2025	n=25	Прямоугольная и синусоидальная модуляция 50-700 Гц	BOLD-ответ при прямоугольных 100 Гц	Экстремально яркая форма сигнала
Нейрофизиоло гия TLM	Veitch 2024	n=34	Постоянный ток против 100/500 Гц, прямоугольная модуляция 100%	Изменения зрачка и ERP	Повреждения и тревожность не выявлены
TLM на рабочем месте	Wilkins 1989	Около 100	100 Гц против 32 кГц, люминесцентный свет	Головная боль и зрительное напряжение ниже при высокой частоте	Зависимость от группы, пограничная значимость
TLM на рабочем месте	Sekulovski 2020	46	SVM 0,47 против 1,34, 13 недель	Значимых симптомов не выявлено	Дневной свет и производственная среда
Клетки сетчатки	Godley 2005	RPE человека	390-550 нм, 60,5 Дж/см²	ROS, мтДНК, дыхание	Высокая прямая доза
Клетки сетчатки	Marie 2018	RPE свиньи с A2E	440 нм, 58 Дж/см²	Изменения ATP, Δψ и OCR	Сенсибилизированная модель
Сетчатка животных	Krigel 2016	Крысы-альбиносы и пигментированные крысы	500-6000 лк	Пигментация изменяла степень повреждения	Малая выборка, нет макулы
Сетчатка животных	Sun 2026	140 крыс	200/1000 лк, 6 месяцев	Сосудистое и RPE-повреждение	Ночная модель, уравнивание по лк
Глаз человека	Тайваньская когорта IOL	186 591 операция	Синий фильтр против прозрачной IOL	HR для AMD около единицы	Наблюдательный дизайн
Митохондрии мышь	Kaynezhad 2022	7 мышей	420 нм, 1,8 Дж/см²	Вариабельность oxCCO и Hb	Нет ATP, OCR и живого имитационного контроля
Вред у дрозофил	Nash 2019	Более 100 на условие	460 нм, 12:12 в течение жизни	Вред для продолжительности жизни, мозга и сетчатки	Доза на все тело насекомого
Митохондрии дрозофил	Hoh Kam 2021	6 пулов	420 нм, 252-432 Дж/см²	Изменения комплексов и ATP	Экстремальная доза
Фоновое NIR	Roddick 2024	n=151	Добавление NIR, около 10 Дж/см²	HRV и удовольствие; зрительный поиск ухудшился	Острая доза диапазона PBM

Тема	Исследование	N/модель	Экспозиция	Ключевой результат	Основное ограничение
NIR и настроение	Giménez 2023	n=56	850 нм, до 6,5 Дж/см²	Сигналы верхней дозы зимой	Множество исходов, финансирование
NIR и глюкоза	Powner 2024	n=30	670 нм, 36 Дж/см²	Снижение AUC в OGTT	Нет теплового имитационного контроля, фиксированный порядок
Добавление ламп накаливания	Barrett 2026	n=22	Настольные лампы в течение 2 недель	Цветовой контраст лучше примерно на 25%	Нет контроля, разные помещения
Отрицательный результат РВМ	Sipion 2023	Мыши 5xFAD	810 нм, 5 месяцев	Нет пользы для когнитивных функций и амилоида	Специфичность модели заболевания
Миопия	He 2015	Кластерное РКИ у детей	+40 мин на открытом воздухе в день, 3 года	Заболеваемость 30,4% против 39,5%	Компоненты воздействия на открытом воздухе не разделены
Экология	Kyba 2023	Наблюдения граждан	2011-2022	Яркость неба +9,6% в год	Систематические ошибки наблюдателя, отчетности и географии
Экология	Boyes 2021	Сопоставленные полевые участки	Уличное освещение	Гусеницы -47% и -33%	Вариабельность видов и участков

Приложение В. Сопоставление доз и экспозиций

Численные значения приведены для предотвращения прямого переноса доз из клеточных систем и моделей с облучением всего организма на условия внутреннего освещения человека.

Экспозиция	Облученность / длительность	Падающая энергетическая экспозиция	Комментарий
Обычная комната, белый свет, 500 лк	Около 1,4-2 Вт/м² во всем видимом диапазоне	Около 0,5-0,7 Дж/см² за час во всем видимом диапазоне	Узкополосная доля 420 нм значительно меньше
Kaynezhad, мышь, 420 нм	5 Вт/м², 1 ч	1,8 Дж/см² на роговице	Анестезированная мышь с расширенным зрачком
Shinhmar, 670 нм	8 мВт/см², 3 мин	1,44 Дж/см²	РВМ видимым красным светом
Giménez, 850 нм	Максимум протокола	6,5 Дж/см²	5 утренних сеансов в неделю
Jeffery, 850 нм	9,18 мВт/см², 15 мин	8,3 Дж/см²	Воздействие на спину
Roddick, фоновое NIR	Около 14 Вт/м², 2 ч	Около 10 Дж/см²	Комбинация 735/875/960 нм
Powner, 670 нм	40 мВт/см², 15 мин	36 Дж/см²	Большая площадь спины
Godley, RPE	2,8 мВт/см², 6 ч	60,5 Дж/см²	Прямое воздействие на культуру
Kuse, клетки	0,38 мВт/см², 24 ч	32,8 Дж/см²	Прямое воздействие на культуру
Marie, RPE, 440 нм	1,09 мВт/см², 15 ч	58 Дж/см²	Клетки с A2E
Hoh Kam, дрозофилы	40 мВт/см²	252-432 Дж/см²	Воздействие на все тело насекомого

Экспозиция	Облученность / длительность	Падающая энергетическая экспозиция	Комментарий
Расчетное NIR лампы накаливания, 800-900 нм	500 лк	Около 0,54 Дж/см ² за час	Расчет; освещенность не измеряет NIR
Ясное полуденное солнце, NIR 800-900 нм	Около 90 Вт/м ²	6,5 Дж/см ² примерно за 12 мин	Зависит от погоды и угла

Одинаковая энергетическая экспозиция в Дж/см² не гарантирует одинакового биологического эффекта. Значимы облученность, спектр, импульсная структура, площадь, проникновение в ткань, тепловая нагрузка и интервал. Для РВМ часто предполагается двухфазная зависимость «доза-ответ».

Приложение С. Группы повышенной чувствительности

Меры предосторожности должны учитывать конкретный сценарий и измеренную экспозицию.

Группа	Причина возможной уязвимости	Нужные данные
Дети	Более прозрачные оптические среды глаза; близкие игрушки и экраны; развивающийся глаз	Радiances точечных источников, накопленная история миопии и световой экспозиции
Мигрень и фотофобия	Более высокая видимость фантомного массива и зрительная чувствительность	Ослепленная оценка зависимости TLM «доза-ответ»
Афакия и отдельные IOL	Измененное пропускание коротковолнового света	Точный спектр линзы и ретинальная доза
Болезнь Штаргардта, AMD и заболевания RPE	A2E, липофусцин и сниженный функциональный резерв	Продольные клинические ОСТ/ОСТА
Пожилые люди	Сниженный митохондриальный резерв; пожелтение хрусталика частично фильтрует синий свет	Суммарный риск с учетом состояния хрусталика
Фотосенсибилизирующие препараты	Специфичные для препарата фототоксические пути	Точный препарат и спектр действия
Сменные работники	Циркадное рассогласование, ночной свет, режим питания и сна	Персональная глазная mEDI и расписание
Городское население с ночной активностью	ALAN в сочетании с шумом и загрязнением	Совместная персональная экспозиция
Работники с инспекционными, стоматологическими и сценическими лампами	Высокая радиантность источника и повторная фиксация взгляда	Профессиональная радиометрия

Приложение D. Аннотированный обзор ключевых исследований

В каждой карточке отдельно представлены фактически измеренные результаты, доказательная значимость, ограничения и обоснованный вывод.

D1. Phillips et al., 2019: чувствительность циркадной системы к обычному комнатному свету

Дизайн	Лабораторное исследование зависимости «доза-эффект» у людей при вечерних уровнях освещенности, сопоставимых с обычным помещением. Измеряли концентрацию мелатонина и время начала ее вечернего повышения.
Экспозиция	Фотопическая освещенность 10, 30 и 50 лк. Оцененная авторами ED50 подавления составила около 24.6 лк.
Результат	Даже низкие уровни освещенности задерживали начало повышения мелатонина приблизительно на 22, 77 и 109 минут. Межиндивидуальная чувствительность различалась более чем в 50 раз.
Доказательная значимость и ограничения	Надежное причинное исследование воздействия вечернего света. Сравнение LED с другими источниками не проводилось; результаты показывают, что среднее групповое значение плохо описывает индивидуальную чувствительность.
Допустимый вывод	Обычный вечерний комнатный свет может представлять значимую циркадную экспозицию, особенно для чувствительных людей.

D2. Souman et al., 2018: одинаковая освещенность и CCT при различной меланопической экспозиции

Дизайн	Контролируемое сравнение у людей двух спектров LED с одинаковой CCT 2700 К и одинаковой фотопической освещенностью 175 лк.
Экспозиция	Около 49 и 171 лк меланопической EDI.
Результат	Условие с высокой меланопической экспозицией подавляло выработку мелатонина почти на 50%; при низкой экспозиции подавление составляло менее 9%.
Доказательная значимость и ограничения	Одна из наиболее наглядных демонстраций того, что CCT и фотопическая освещенность могут скрывать биологически значимые различия спектра.
Допустимый вывод	Требования к закупкам, основанные только на CCT и освещенности, не контролируют циркадную эффективность света. Для ее оценки необходима метрология по CIE S 026.

D3. Blume et al., 2022: изменение мелатонина при отсутствии выраженных изменений сна

Дизайн	Вечерняя экспозиция людей продолжительностью около одного часа при двух уровнях меланопической EDI и фотопической освещенности 60 лк.
Экспозиция	Примерно 59 и 123 лк меланопической EDI.
Результат	При более высокой меланопической экспозиции уровень мелатонина снизился примерно на 14%. PSG, PVT и субъективные показатели сна не выявили убедительных различий.
Доказательная значимость и ограничения	Существенное ограничение интерпретации: эндокринный ответ не гарантирует немедленного измеримого ухудшения сна или работоспособности.
Допустимый вывод	Подавление мелатонина служит ранним механистическим маркером; его клиническая значимость требует самостоятельного подтверждения.

D4. Chang et al., 2015: длительное чтение с электронного устройства перед сном

Дизайн	Перекрестное исследование с участием 12 человек: четыре часа чтения с самосветящегося электронного устройства или печатной книги в течение пяти вечеров.
Экспозиция	Длительная близкая вечерняя экранная экспозиция; устройство раннего поколения.
Результат	Подавление мелатонина составило около 55%, задержка циркадной фазы - около 1.5 часа, засыпание происходило примерно на 10 минут позже; продолжительность REM-сна и утренняя бодрость снижались.
Доказательная значимость и ограничения	Причинный результат для конкретного интенсивного режима. Малая выборка и устройство раннего поколения ограничивают перенос выводов на современные экраны и более короткое использование.
Допустимый вывод	Многочасовое воздействие самосветящегося экрана перед сном способно существенно сдвигать циркадную фазу.

D5. Mason et al., 2022: освещенность 100 лк во время сна

Дизайн	Двадцать здоровых взрослых; параллельное сравнение двух ночей в темноте и одной ночи при верхнем освещении 100 лк.
Экспозиция	100 лк в течение ночи, что значительно превышает слабый свет уличных источников, проникающий через шторы.
Результат	Ночная HR была выше, HRV - ниже, симпатический баланс - выше. Утром снизилась чувствительность к инсулину; поддержание уровня глюкозы требовало большей секреции инсулина. Продолжительность SWS и REM-сна уменьшилась.
Доказательная значимость и ограничения	Убедительное краткосрочное подтверждение принципа. Малая выборка, однократная ночная экспозиция и отсутствие перекрестного дизайна требуют осторожной интерпретации.
Допустимый вывод	Яркий комнатный свет во время сна может вызывать острые неблагоприятные изменения вегетативной и метаболической физиологии.

D6. Harmsen et al., 2025/2026: естественный дневной свет и диабет 2 типа

Дизайн	Рандомизированное перекрестное исследование с участием 13 человек с T2D: 4.5 дня естественного света через окна и 4.5 дня постоянного искусственного офисного освещения около 300 лк.
Экспозиция	Условия различались по яркости, временной динамике, спектру и, вероятно, содержанию NIR; вклад отдельных факторов не был разделен.
Результат	Увеличилось время нахождения глюкозы в нормальном диапазоне, усилилось окисление жиров, изменились фаза молекулярных часов мышечной ткани и мультиомные показатели. Средний уровень глюкозы не изменился.
Доказательная значимость и ограничения	Важное исследование комплексного светового режима у людей. Выборка очень мала, а продолжительность вмешательства невелика.
Допустимый вывод	Динамический дневной свет может влиять на метаболическую регуляцию; ответственный компонент спектра пока не установлен.

D7. Windred et al., 2024: персонально измеренное ночное освещение и риск T2D

Дизайн	Проспективный анализ UK Biobank: 84 790 участников, недельное измерение света датчиком на запястье, около 7.9 года наблюдения и 1997 новых случаев T2D.
Экспозиция	Категории ночной экспозиции с медианами приблизительно от 0.62 до 105.3 лк на запястье.
Результат	Полностью скорректированные HR для возрастающих категорий составили около 1.29, 1.39 и 1.53 относительно менее освещенной половины выборки.
Доказательная значимость и ограничения	Крупное проспективное исследование зависимости «доза-эффект». Датчик на запястье не измеряет mEDI на уровне глаза и может отражать ночное бодрствование, болезнь, сменную работу или особенности социального ритма.
Допустимый вывод	Персонально измеренное ночное освещение связано с последующим риском T2D; причинная интерпретация, специфичная для LED, преждевременна.

D8. Windred et al., 2025: ночное освещение и сердечно-сосудистые заболевания

Дизайн	88 905 участников UK Biobank, медиана наблюдения около 9.5 года; исходы включали CAD, MI, HF, AF и инсульт.
Экспозиция	Одна неделя измерения света на запястье; верхние 10% ночной экспозиции сравнивали с менее освещенной половиной выборки.
Результат	HR составили около 1.23 для CAD, 1.42 для MI, 1.45 для HF, 1.28 для AF и 1.28 для инсульта. Оценки на одно стандартное отклонение составляли около 1.05-1.08.
Доказательная значимость и ограничения	Крупный когортный сигнал, полученный на той же платформе измерения экспозиции и подтвержденный остаточному поведенческому смещению. Сравнение крайней категории дает более крупные относительные оценки, чем анализ непрерывного эффекта.
Допустимый вывод	Структура ночной световой экспозиции представляет собой потенциально модифицируемый маркер риска CVD; технология источника в исследовании не определялась.

D9. Liang et al., 2024: наружное ночное освещение по спутниковым данным и смертность

Дизайн	UK Biobank, 273 335 участников, 12.4 года наблюдения, 14 864 смерти от естественных причин и 3100 смертей от CVD.
Экспозиция	Спутниковая оценка наружной яркости вблизи места проживания.
Результат	Для верхнего квартиля первоначальный HR составлял 1.08. После учета PM2.5 и вечернего шума HR смертности от естественных причин составил 1.03, 95% CI 0.97-1.08; связь со смертностью от CVD отсутствовала.
Доказательная значимость и ограничения	Существенное контрдоказательство некритичному использованию спутниковых оценок ALAN. Результат демонстрирует зависимость оценки от сопутствующих городских экспозиций.
Допустимый вывод	Спутниковая яркость района служит слабым косвенным показателем индивидуальной световой дозы и тесно связана с загрязнением воздуха и шумом.

D10. Lindén et al., 2025: ответ мозга на незаметную TLM по данным 7-Тл фМРТ

Дизайн	25 здоровых участников; 20-секундные блоки прямоугольной модуляции 50/100/300/700 Гц с глубиной 100% и синусоидальной модуляции 100 Гц с глубиной 33%.
Экспозиция	Очень яркий стимул с CCT 3000 К и яркостью около 1935 кд/м²; коэффициент заполнения 50%.
Результат	Модуляция 50 Гц вызвала широкую зрительную и теменную BOLD-активацию. Прямоугольная модуляция 100 Гц активировала V1/V2 и латеральную затылочную кору. Синусоидальная модуляция 100 Гц с глубиной 33% и модуляция 700 Гц не усиливали активацию.
Доказательная значимость и ограничения	Убедительная демонстрация зависимости ответа от формы волны. Экстремальная яркость и глубина модуляции ограничивают перенос на повседневные условия. BOLD-сигнал не является маркером повреждения.
Допустимый вывод	Мозг способен реагировать на глубокую модуляцию 100 Гц при отсутствии осознанного мерцания; форма волны имеет принципиальное значение.

D11. Veitch et al., 2024: зрачковая реакция и ERP при 100 и 500 Гц

Дизайн	В анализ включены 34 участника; продолжительность экспозиции до трех часов, освещенность 500 лк, постоянный ток и прямоугольная модуляция 100/500 Гц с глубиной 100%.
Экспозиция	Прямоугольная форма волны с коэффициентом заполнения 50% при обычной офисной освещенности.
Результат	Во время чтения диаметр зрачка был больше при 100 Гц; точность выполнения теста Струпа различалась между условиями 500 и 100 Гц; изменялись ERP и активность предполагаемых источников. Изменений ситуативной тревожности не выявлено.
Доказательная значимость и ограничения	Объективный краткосрочный ответ при отсутствии признаков повреждения или генерализованной тревоги.
Допустимый вывод	Некоторые визуально незаметные формы TLM сохраняют нейрофизиологическую значимость.

D12. Wilkins et al., 1989: головная боль и высокочастотные пускорегулирующие аппараты

Дизайн	Двойное слепое перекрестное исследование на рабочих местах в четырех офисных группах, около 100 человек; обычное люминесцентное освещение 100 Гц сравнивали с режимом 32 кГц.
Экспозиция	Глубина модуляции 100 Гц составляла примерно 43-49%, остаточная модуляция в высокочастотном режиме - менее 7%.
Результат	Средняя недельная частота головной боли и зрительного утомления была примерно вдвое ниже в высокочастотном условии.
Доказательная значимость и ограничения	Классическое полевое исследование у людей, позволяющее выделить влияние частоты модуляции. Совокупный результат по головной боли был пограничным и существенно зависел от одной группы, порядка условий и дневного света.
Допустимый вывод	У части людей снижение модуляции 100 Гц способно уменьшить дискомфорт; величина эффекта остается неопределенной.

D13. Sekulovski et al., 2020: отсутствие выраженного эффекта в длительном офисном исследовании

Дизайн	46 работников, 13 недель, 2813 повторных опросов; два условия синусоидальной модуляции 100 Гц с SVM 0.47 и 1.34.
Экспозиция	Умеренная синусоидальная модуляция в реальном офисе с дневным освещением.
Результат	Показатели состояния глаз и зрения, напряжения головы и шеи, настроения и самочувствия не различались; значения р составляли 0.27-0.89.
Доказательная значимость и ограничения	Важное контрдоказательство утверждения о выраженных симптомах. Дневной свет мог снижать эффективную дозу; 42 из 46 участников были мужчинами; исследование проводилось в корпоративной среде при участии отрасли.
Допустимый вывод	Технически измеримая или визуально различимая TLM не всегда сопровождается заметными хроническими жалобами.

D14. Kaynezhad et al., 2022: свет 420 нм и охССО сетчатки

Дизайн	7 анестезированных мышей с расширенными зрачками; часовые периоды исходного измерения, воздействия и восстановления; регистрация методом bNIRS.
Экспозиция	420±9 нм, около 5 Вт/м² на роговице, падающая энергетическая экспозиция 1.8 Дж/см².
Результат	Во время и после воздействия увеличились абсолютная вариабельность и дрейф сигналов охССО/Нб.
Доказательная значимость и ограничения	Отсутствовали синхронный контроль без воздействия, прямое измерение митохондриального дыхания, АТР, Δψ, ERG и гистология. Повторные периоды анализировали спорным непарным критерием.
Допустимый вывод	Работа допускает острое митохондриальное или гемодинамическое возмущение, однако не доказывает остановку клеточного дыхания.

D15. Godley et al., 2005: клетки RPE человека и митохондриальная ДНК

Дизайн	Первичные клетки RPE человека подвергали воздействию света 390-550 нм; оценивали биохимические и митохондриальные конечные точки.
Экспозиция	2.8 мВт/см² до 6 часов, суммарная энергетическая экспозиция до 60.5 Дж/см² непосредственно на клетки.
Результат	К шести часам возрастали ROS и повреждения митохондриальной ДНК, снижалась дыхательная активность.
Доказательная значимость и ограничения	Независимое механистическое подтверждение. Отсутствие оптических сред глаза и высокая прямая доза не позволяют оценить бытовой риск.
Допустимый вывод	Коротковолновый свет при достаточной дозе способен непосредственно повреждать митохондриальный аппарат клеток RPE.

D16. Marie et al., 2018: спектр действия митохондриального повреждения

Дизайн	Первичные клетки RPE свиньи, нагруженные A2E; полосы шириной 10 нм в диапазоне 390-520 нм; несколько методов оценки митохондрий.
Экспозиция	Около 58 Дж/см² при 440 нм за 15 часов.
Результат	H ₂ O ₂ и супероксид возрастали в диапазоне 420-470 нм, АТФ снижался около 430 нм, Δψ - в диапазоне 410-450 нм; изменялись митохондриальная сеть, OCR и комплекс I.
Доказательная значимость и ограничения	Один из наиболее полных механистических наборов данных. Сенситизированная модель, длительное прямое воздействие и связи с отраслью и патентами требуют отделять установленный механизм от оценки риска окружающего освещения.
Допустимый вывод	Клетки RPE, нагруженные A2E, особенно чувствительны к диапазону 415-455 нм.

D17. Krigel et al., 2016: роль пигментации

Дизайн	Альбиносные крысы Wistar и пигментированные крысы Long-Evans; острые протоколы 500-6000 лк и длительный протокол 500 лк.
Экспозиция	После темновой адаптации; в части острых условий зрачки расширяли. Длительное воздействие проводили в цикле 12:12 до 28 дней.
Результат	Освещенность 6000 лк вызывала повреждение при разных лампах. Длительное воздействие 500 лк сопровождалось потерей ONL у альбиносных крыс; у пигментированных Long-Evans значимой морфологической потери не выявлено, хотя сохранялись признаки стресса и изменения ERG.
Доказательная значимость и ограничения	Исследование показывает критическую роль пигментации глаза и выбора модели. Существенными ограничениями остаются малые выборки и отсутствие у крыс аналога макулы человека.
Допустимый вывод	Модели на альбиносных крысах могут существенно завышать риск бытового повреждения сетчатки человека.

D18. O'Hagan et al., 2016: реальные бытовые источники

Дизайн	Прямые измерения фотобиологической опасности бытовых ламп, офисных панелей, экранов, небосвода и точечных LED.
Экспозиция	Взвешенная по функции опасности синего света яркость при заданной геометрии и намеренном прямом взгляде.
Результат	Бытовые лампы достигали примерно 10-20% предела для длительного воздействия, офисная панель - около 1.7%, экраны - обычно менее 0.4%. Малый открытый синий индикатор на расстоянии 10 см мог превышать предел яркости для длительного воздействия.
Доказательная значимость и ограничения	Ключевое связующее звено между лабораторной токсичностью и реальной экспозицией. Нормативные пределы преимущественно защищают от установленного повреждения и не устраняют неопределенность многолетнего воздействия.
Допустимый вывод	Риск определяется яркостью и геометрией; близкий точечный излучатель отличается от освещенной поверхности на порядки.

D19. Nash et al., 2019: синий свет и продолжительность жизни дрозофил

Дизайн	Ежедневный цикл 12 часов синего света и 12 часов темноты на протяжении жизни; пигментированные и белоглазые мухи, не менее 100 особей каждого пола в каждом условии, а также контрольные линии без глаз.
Экспозиция	460 нм, PFD около 20-30 мкмоль/м²/с, расчетная облученность около 0.4-0.65 мВт/см².
Результат	Медиана продолжительности жизни снизилась примерно на 30%, а у белоглазых мух - сильнее; наблюдались дегенерация сетчатки, вакуолизация мозга и ухудшение способности к лазанию, включая внеочулярные эффекты.
Доказательная значимость и ограничения	Убедительные контролируемые данные на уровне целого организма насекомого. Малый размер и прозрачность тела, а также пожизненное узкополосное воздействие резко ограничивают прямой перенос на человека.
Допустимый вывод	При длительном облучении всего тела синий свет может оказывать системное внеочулярное токсическое действие на небольшие организмы.

D20. Hoh Kam et al., 2021: комплексы дыхательной цепи у дрозофил

Дизайн	Самцы дрозофил в возрасте пяти недель; повторное воздействие по 15 минут в день в течение семи дней или острое трехчасовое воздействие.
Экспозиция	420 нм, 40 мВт/см², 36 Дж/см² в день; суммарно 252 Дж/см² либо 432 Дж/см² при остром воздействии.
Результат	Повторное воздействие снизило активность комплексов I-IV примерно на 50%; сигнал АТР уменьшился примерно на 20%, статистически незначимо. Острое воздействие сильнее снижало АТР с частичным восстановлением или последующим компенсаторным повышением.
Доказательная значимость и ограничения	Прямые данные о митохондриальных эффектах при чрезвычайно высокой узкополосной дозе на все тело. Односторонние статистические критерии и модель насекомого снижают внешнюю валидность.
Допустимый вывод	Условия этого исследования не соответствуют обычной средней экспозиции LED.

D21. Roddick et al., 2024: добавление NIR к общему освещению

Дизайн	Предварительно зарегистрированное двойное слепое, сбалансированное внутрииндивидуальное исследование, n=151; одинаковый белый LED 3500 К с добавлением или без добавления 735/875/960 нм в течение двух часов.
Экспозиция	Скорректированная суммарная облученность NIR около 14 Вт/м², примерно 5 Дж/см²/ч и 10 Дж/см² за сеанс.
Результат	HF-HRV в покое была выше, реакция на стресс изменилась, субъективное удовольствие слегка возросло; зрительный поиск ухудшился, широкого улучшения когнитивных функций не выявлено.
Доказательная значимость и ограничения	Наиболее убедительное исследование добавленного NIR в общем освещении у людей. Доза уже соответствует диапазону PBM, а конечные точки представляют собой краткосрочные суррогатные показатели.
Допустимый вывод	Добавление NIR при контролируемом видимом освещении может остро изменять физиологические показатели, причем направления эффектов неоднородны.

D22. Giménez et al., 2023: зависимость эффектов NIR от дозы и сезона

Дизайн	Двойное слепое рандомизированное домашнее исследование, n=56; плацебо либо 1/4/6.5 Дж/см² света 850 нм пять раз в неделю утром в течение четырех недель летом и зимой.
Экспозиция	Максимальная доза 6.5 Дж/см²; температуру контролировали.
Результат	Только максимальная доза зимой улучшала настроение и сонливость, а также некоторые показатели IFN-γ и частоты сердечных сокращений. Сон, актиграфия, мелатонин и циркадная фаза не изменились.
Доказательная значимость и ограничения	Наблюдалась зависимость от дозы и сезона при приемлемом имитационном контроле. Множественность исходов и отраслевое финансирование обуславливают необходимость воспроизведения.
Допустимый вывод	Эффекты NIR могут зависеть от сезона и дозы; объективные показатели сна пока остаются отрицательными.

D23. Powner и Jeffery, 2024: свет 670 нм и OGTT

Дизайн	Тридцать здоровых участников, 15 в активной и 15 в контрольной группе; свет 670 нм воздействовал на 800 см² поверхности спины за 45 минут до OGTT.
Экспозиция	40 мВт/см² в течение 15 минут, 36 Дж/см² и суммарно 28.8 кДж.
Результат	Относительное увеличение AUC глюкозы было на 27.7% меньше; абсолютное различие AUC составляло около 7.3%, а пикового уровня - около 7.5%.
Доказательная значимость и ограничения	Информативное системное подтверждение принципа. Фиксированный порядок, отсутствие активного или теплового имитационного контроля и прямых измерений АТФ или дыхания ограничивают интерпретацию.
Допустимый вывод	РВМ видимым красным светом на большой площади может остро изменять регуляцию глюкозы; гипотеза недостаточности красного света или NIR в окружающей среде остается непроверенной.

D24. Barrett и Jeffery, 2026: добавление освещения лампами накаливания

Дизайн	Одиннадцать работников в помещении со светодиодным освещением получили настольные лампы накаливания на две недели; контролем служили одиннадцать человек из другого рабочего помещения.
Экспозиция	Помещения различались: около 4000 К/1000 лк и 3000 К/900 лк; индивидуальная доза NIR не была строго изолирована.
Результат	У всех 11 участников вмешательства пороги цветового контраста изменились в благоприятном направлении; заявленная величина эффекта составляла около 25%, также сообщалось о его сохранении.
Доказательная значимость и ограничения	Отсутствовали рандомизация, ослепление, имитационный контроль и контроль в том же помещении. Одновременно изменялись видимый спектр, NIR, тепло, распределение яркости и поведение. АТФ и функция митохондрий не измерялись.
Допустимый вывод	Исследование формирует гипотезу и требует независимого воспроизведения в одном помещении с тепловым имитационным контролем.

D25. Sipion et al., 2023: высококачественное исследование PBM с отрицательным результатом

Дизайн	Полностью ослепленный рандомизированный эксперимент по стандартам GLP на мышах 5xFAD; низкая или высокая доза 810 нм три раза в неделю в течение пяти месяцев.
Экспозиция	Длительные терапевтические протоколы PBM с сопоставленными контрольными условиями.
Результат	Преимуществ по когнитивным функциям, амилоидной нагрузке, потере нейронов и микроглиальным показателям не выявлено.
Доказательная значимость и ограничения	Высококачественное отрицательное исследование, демонстрирующее зависимость эффектов PBM от модели и протокола.
Допустимый вывод	Красный свет и NIR не являются универсальным средством коррекции митохондриальных нарушений или нейродегенерации.

D26. He et al., 2015: время на открытом воздухе и миопия

Дизайн	Школьное кластерное рандомизированное исследование; дополнительные 40 минут занятий на открытом воздухе ежедневно в течение трех лет.
Экспозиция	Вмешательство на открытом воздухе без разделения спектральных компонентов.
Результат	Частота новых случаев миопии составила 30.4% в группе вмешательства и 39.5% в контрольной группе, абсолютное снижение - 9.1 процентного пункта. Различие осевой длины глаза не достигло убедительной статистической значимости.
Доказательная значимость и ограничения	Убедительные данные о профилактическом эффекте времени на открытом воздухе и слабые данные в пользу конкретной длины волны или механизма, связанного с LED.
Допустимый вывод	Увеличение времени на открытом воздухе полезно для профилактики миопии у детей; ответственные компоненты воздействия пока не определены.

D27. Chekani Azar, 2023: репродуктивные показатели самцов крыс

Дизайн	Сорок самцов крыс Sprague-Dawley с возраста 21 дня; шесть групп освещения в течение 14 недель, цикл 12:12.
Экспозиция	Контрольное люминесцентное освещение 6500 К, белый LED 6400 К и чистый синий свет с пиком 470 нм; номинальная освещенность во всех условиях 200 лк.
Результат	Чистый синий свет снижал мелатонин и подвижность сперматозоидов и сопровождался дегенерацией ткани яичек. Белый LED вызывал менее выраженные гистологические изменения. Несколько показателей, включая концентрацию сперматозоидов, не изменились.
Доказательная значимость и ограничения	Ослепленная оценка гистопатологии повышает надежность. Малые группы, множественные сравнения и уравнивание по лк при различиях радиометрической и меланопической дозы не позволяют переносить вывод на человека.
Допустимый вывод	Чистый синий свет может влиять на репродуктивные показатели ночных грызунов; риск обычного белого LED для человека остается неизвестным.

D28. Kyba et al., 2023: быстрый рост яркости ночного неба

Дизайн	Наблюдения добровольцев за предельной видимостью звезд невооруженным глазом в 2011-2022 годах.
Экспозиция	Глобальная яркость ночного неба по восприятию наблюдателей.
Результат	Средний рост оценен примерно в 9.6% в год, что соответствует удвоению менее чем за восемь лет.
Доказательная значимость и ограничения	Метод учитывает чувствительность человеческого зрения к синей области, которую спутниковые приборы недооценивают. Сохраняются географические смещения и смещения участия.
Допустимый вывод	Повышение энергетической эффективности не предотвратило быстрого роста видимого засветления неба в период перехода на LED.

D29. Boyes et al., 2021: уличное освещение и гусеницы ночных бабочек

Дизайн	Парное полевое исследование освещенных и неосвещенных живых изгородей и травянистых обочин со сравнением LED и натриевого освещения.
Экспозиция	Действующие установки уличного освещения в реальных экологических условиях.
Результат	Численность гусениц была примерно на 47% ниже в живых изгородях и на 33% ниже на травянистых обочинах при наличии освещения; эффекты LED были выраженнее, чем эффекты натриевых источников.
Доказательная значимость и ограничения	Одно из наиболее убедительных экологических исследований в реальных условиях. Видовой состав и местная среда продолжают влиять на величину эффекта.
Допустимый вывод	Уличное освещение может приводить к существенному локальному снижению численности насекомых; спектральный состав имеет значение.

D30. McColl и Veitch, 2001: исторический обзор освещения «полного спектра»

Дизайн	Критический обзор публикаций 1941-1999 годов о влиянии люминесцентного освещения «полного спектра» на здоровье и физиологию.
Экспозиция	Неоднородные ранние световые вмешательства и конечные точки.
Результат	Данные не подтвердили заявленные выраженные преимущества для здоровья и широкие эволюционные гипотезы, связанные с освещением «полного спектра».
Доказательная значимость и ограничения	Важное предостережение от повторения исторических утверждений. Обзор предшествует меланопической метрологии, современной PWM и нынешним LED.
Допустимый вывод	Ранняя литература о так называемом неполноценном освещении не заменяет современные исследования с контролем дозы.

Приложение Е. Методологические ошибки и смешивающие факторы

Раздел предназначен для рецензента: каждая строка описывает тип ошибки, способной искусственно усилить или ослабить вывод о светодиодном освещении.

Ошибка	Как возникает	Что делать
Уравнивание по освещенности	Источники равны по фотопической освещенности, но различаются по радиометрической мощности, mEDI и NIR	Публиковать полное SPD, α-опическую EDI и Вт/м ²
Уравнивание по CCT	Одинаковая CCT скрывает метамерные спектры	Сопоставлять Duv и TM-30, публиковать исходное SPD
Подмена экспозиции названием технологии	LED рассматривается как единая экспозиция	Указывать первичный излучатель, люминофоры, каналы, драйвер и оптику
Смещение роговичной и ретиальной дозы	Падающая экспозиция в Вт/м ² или Дж/см ² называется ретиальной дозой	Использовать радиантность, пропускание глаза, размер зрачка и модель ретиального изображения
Перенос результатов клеточной модели на человека	Прямое воздействие на клетки обходит роговицу, хрусталик, кровообращение и репарацию	Построить реалистичный дозиметрический мост
Усиление эффекта у альбиносов	Ночные животные-альбиносы чрезмерно реагируют на свет	Включать пигментированные модели и указывать состояние хрусталика и зрачка
Темновая адаптация	Длительная темнота и расширенный зрачок увеличивают ретиальную дозу	Моделировать обычную световую историю и естественный зрачок
Постоянная экспозиция	Отсутствуют движения глаз и головы, фиксация длится часами	Добавлять движения, выборку направлений взгляда и прерывистую экспозицию
Раскрытие условия по тепловому эффекту NIR	Активное устройство нагревает кожу или помещение	Использовать теплово сопоставимый имитационный контроль и мониторинг температуры
Раскрытие условия по видимому красному свету	Свет 670 нм раскрывает активное условие	Использовать активный визуальный контроль или скрытую геометрию экспозиции
Необоснованный переход от РВМ к гипотезе недостаточности	Добавленный терапевтический стимул помогает, а отсутствие объявляется вредным	Проводить исследования с удалением и добавлением и определять минимальную дозу
Множественность исходов	Множество биомаркеров и подгрупп создает случайные положительные результаты	Предварительно регистрировать иерархию и корректировать множественность
Одностороннее тестирование	В малых экспериментах предпочтение отдается ожидаемому направлению	Использовать двусторонние оценки и интервалы неопределенности
Переучет повторяющейся когорты	Несколько статей из одного набора данных выглядят независимыми репликациями	Картировать пересечение когорт и авторов
Ошибка переноса с запястья на глаз	Датчик под рукавом или одеялом не равен ретиальной дозе	Применять калиброванную спектральную дозиметрию на уровне глаз
Ошибка переноса спутниковых данных в спальню	Наружная радиантность заменяет внутреннюю экспозицию	Измерять окна, шторы, спальню и поведение
Обратная причинность	Бессонница, депрессия или болезнь увеличивает ночное освещение	Повторно измерять экспозицию до болезни и использовать отрицательные контроли
Городские сопутствующие воздействия	ALAN коррелирует с шумом, PM2.5, NO ₂ , теплом и депривацией	Использовать совместные модели, причинные внедрения и персональные датчики
Несовместимость драйвера и диммера	Лампа хорошо проходит тест при полной нагрузке и плохо работает после установки	Испытывать точную установленную пару на всех уровнях диммирования
Упрощение до процента мерцания	Одна величина игнорирует форму сигнала, гармоники и рабочий цикл	Публиковать исходную форму сигнала и PstLM/SVM/PAVM
Подмена нейронного ответа признаком повреждения	Ответ EEG, BOLD или зрачка описывается как повреждение	Требовать стойкую функциональную или структурную конечную точку
Абсолютизация соответствия нормативам	Соответствие считается доказательством нулевого пожизненного эффекта	Указывать конечную точку и длительность, охватываемые стандартом
Подмена принципа предосторожности причинным выводом	Рекомендация цитируется как установленная связь с заболеванием	Разделять политическое решение и уровень доказательств
Непроверенные заявления производителя о спектре	Термины «полный спектр» или «без мерцания» не подкреплены исходными данными	Проводить независимое измерение и проверку партии
Оптимизация только по энергетической эффективности	лм/Вт скрывает биологические и экологические измерения	Использовать многокритериальную оценку закупки

Приложение F. Статистический план и организация исследования

Достоверность результата требует заранее определенной структуры решений, открытых данных и разделения подтверждающего и поискового анализа.

F1. Система управления исследованием

- Независимый руководящий комитет с участием специалиста по циркадной физиологии, светотехника, офтальмолога, невролога, эпидемиолога, биостатистика, эколога и представителя пациентов.
- Измерительный, интервенционный и статистический центры работают отдельно. До фиксации первичного анализа аналитики получают обезличенные обозначения условий.
- Публичный реестр конфликтов интересов должен охватывать производителей, патенты на фильтры, устройства фотобиомодуляции, консультантов по освещению и профильные общественные организации.
- Поправки к протоколу версионизируются и снабжаются временной меткой. Любое изменение после раскрытия групп обозначается как поисковое.
- Отрицательные результаты и нежелательные явления вносятся в публичный реестр независимо от последующей публикации в журнале.

F2. Первичные оцениваемые эффекты

Для каждого причинного фактора в каждом испытании заранее определяется один первичный оцениваемый эффект. Для вечерней mEDI - среднее смещение DLMO после стандартизированной экспозиции; для TLM - различие по валидированному составному показателю мигрени и зрительного дискомфорта за период воздействия; для NIR - изменение заранее выбранного объективного показателя митохондриальной или метаболической функции; для сетчатки - продольное изменение заранее заданного структурного или функционального показателя. Вторичные конечные точки не должны изменять вывод по первичному показателю.

F3. Статистическая мощность и объем выборки

Острый внутрииндивидуальный эксперимент в световой камере с восемью условиями может предусматривать 160-240 участников в зависимости от ожидаемого стандартизованного эффекта 0,2-0,3 и внутрииндивидуальной корреляции. Для обогащенной выборки участников с мигренью требуется отдельный расчет мощности по страте. Долгосрочное кластерное РКИ должно учитывать внутрикластерную корреляцию по помещениям и взаимное влияние условий внутри домохозяйств; реалистичный диапазон - 600-1200 человек. Расчет размера выборки публикуется вместе с принятыми значениями ожидаемого эффекта, дисперсии, доли выбывших и поправки на множественные сравнения.

F4. Рандомизация и ослепление

- Блочная рандомизация, сформированная компьютерным алгоритмом, со стратификацией по хронотипу, полу, возрасту и группе чувствительности.
- Сбалансированные последовательности перекрестного исследования с периодом вымывания, обоснованным биологией конечной точки.

- Светильники скрыты за одинаковыми рассеивателями; внешний вид, акустические и тепловые признаки условий сопоставлены.
- В условиях с NIR используются неактивные излучатели с сопоставимым тепловым эффектом; температура поверхности устройства и кожи регистрируется непрерывно.
- В условиях с TLM средняя яркость и SPD одинаковы; модуляция тока формируется после спектрального смещения.

F5. План статистического анализа

- Основной анализ проводится по принципу назначенного лечения; анализ по протоколу используется для проверки устойчивости.
- При необходимости применяются модели со смешанными эффектами и случайными эффектами участника и помещения.
- Используются заранее определенные контрасты, а не все попарные сравнения факторных условий.
- Следует приводить оценки эффекта и интервалы неопределенности, включая диапазоны, совместимые с практически значимыми пользой, вредом и эквивалентностью.
- Для важных выводов об отсутствии эффекта используются байесовская область практической эквивалентности (ROPE) или частотные тесты эквивалентности.
- Пропущенные данные обрабатываются заранее определенным методом множественной импутации или методом максимального правдоподобия; анализ полных наблюдений приводится только как анализ чувствительности.
- Выводы по подгруппам, сформированным на основе данных, недопустимы без проверки взаимодействия и внешнего воспроизведения.

F6. Пакет материалов для воспроизводимости

Публичный пакет должен включать протокол, план статистического анализа, обезличенные данные в объеме, совместимом с формой информированного согласия, исходные SPD, исходные формы сигналов TLM, сертификаты калибровки, исходный код, словарь данных, журнал исключений, версию прошивки устройств, аудит вмешательства, сведения о нежелательных явлениях и полную таблицу всех предварительно зарегистрированных исходов. Каждый рисунок должен воспроизводиться одной командой в зафиксированной программной среде.

F7. Правила досрочного прекращения и интерпретации

Независимый комитет по мониторингу данных и безопасности вправе остановить воздействие при неожиданном повреждении глаза, тяжелом обострении мигрени или тепловом нежелательном явлении. Досрочное прекращение в связи с пользой допустимо только по заранее установленному правилу распределения уровня альфа. Изменение механистического биомаркера при отсутствии клинической конечной точки не следует описывать как профилактику заболевания. Отсутствие статистической значимости без заранее заданной границы эквивалентности не доказывает отсутствие эффекта.

Приложение G. Нерешенные научные вопросы исследовательской программы

Эти вопросы образуют перечень исследовательских задач лаборатории. Каждый из них допускает конкретный эксперимент или анализ.

Контур	Исследовательский вопрос
Спектр	Как распределяется персональная экспозиция в диапазоне 350-2500 нм у людей, живущих в разных широтах, зданиях и профессиональных условиях?
Спектр	Существует ли воспроизводимая связь низкой суточной NIR-экспозиции с объективной функцией митохондрий после учета физической активности и сезона?
Спектр	Имеет ли LED с фиолетовым первичным излучателем независимое преимущество или риск при сопоставимых mEDI, Rf/Rg и TLM?
Спектр	Как содержание глубокого красного в видимом диапазоне влияет на комфорт, зрачок, сетчатку и когнитивные функции?
Циркадный	Какая минимальная вечерняя доза mEDI оказывает клинически значимое влияние на сон у людей с разными хронотипами?
Циркадный	Как предшествующий яркий дневной свет изменяет вечернюю чувствительность в реальных жилых помещениях?
Циркадный	Может ли динамическое LED-освещение воспроизвести полезные компоненты естественного дневного света без УФ- и тепловой нагрузки?
Циркадный	Что важнее для метаболизма: дневная интенсивность, временная динамика, спектр или контекст пребывания на открытом воздухе?
TLM	Какая форма сигнала лучше предсказывает симптомы мигрени: PAVM, пиковые гармоники, рабочий цикл или хроматическая модуляция?
TLM	Как изменяется чувствительность после недель или месяцев воздействия и последующего восстановления?
TLM	Возникает ли накопленная нейропластическая адаптация или сенсibilизация к модуляции 100/120 Гц?
TLM	Какие субгармоники возникают в установленных системах диммер-драйвер вне лабораторной полной нагрузки?
TLM	Нужна ли отдельная медицинская метрика для саккадического фантомного массива?
Сетчатка	Вызывает ли реалистичная повторная низкодозная экспозиция синего света малые изменения OCT/OCTA в течение нескольких лет?
Сетчатка	Какие заболевания сетчатки и генотипы повышают уязвимость?
Сетчатка	Как старение хрусталика человека одновременно снижает дозу синего света и изменяет циркадную синхронизацию?
Сетчатка	Каков вклад яркости точечного источника и поведения взгляда по сравнению с освещенностью помещения?
Сетчатка	Насколько действующий спектр опасности синего света предсказывает хронические конечные точки RPE?
NIR	Какой фотоакцептор доминирует in vivo: CCO, вода, опсины или сосудистые механизмы?
NIR	Существует ли двухфазная зависимость фоновой дозы от ответа при облученности значительно ниже терапевтических устройств?
NIR	Может ли добавление NIR с сопоставимым тепловым контролем воспроизводимо изменять 31P-MRS или дыхание мышечной ткани?
NIR	Возникает ли эффект отмены после прекращения длительного добавления NIR?
NIR	Какие конечные точки улучшаются и какие ухудшаются с учетом ухудшения зрительного поиска в исследовании Roddick?
Метаболизм	Сохраняется ли острый эффект 100 лк на инсулин после адаптации или становится сильнее?
Метаболизм	Как взаимодействуют ночной свет, время приема пищи и ограничение сна?
Метаболизм	Можно ли снизить риск диабета 2-го типа с помощью многолетнего РКИ домашнего освещения?
Сердечно-сосудистая система	Опосредует ли HRV хроническую ассоциацию или остается только острым суррогатным показателем?
Сердечно-сосудистая система	Как отделить ночной свет от пробуждений, вызванных доклиническим заболеванием?
Онкология	Какая индивидуальная метрика глазной или спальной экспозиции имеет правдоподобный латентный период для рака молочной или предстательной железы?
Онкология	Сохраняются ли специфичные для длины волны сигналы после учета NO ₂ , шума, сменной работы и скрининга?
Психика	Может ли снижение ночного света предотвращать новые случаи депрессии, а не только коррелировать с текущей бессонницей?
Мигрень	Каково число пациентов, которых необходимо лечить освещением с низкой TLM для предотвращения одного случая среди чувствительных к высокочастотной модуляции?
Миопия	Какая доля защиты на открытом воздухе объясняется освещенностью и длительностью, а какая - фиолетовой составляющей спектра?

Контекст	Исследовательский вопрос
Миопия	Может ли динамический внутренний свет высокой яркости безопасно воспроизвести защитный эффект открытого воздуха?
Кожа	Какова накопленная пигментационная и окислительная доза от профессиональных источников видимого синего света?
Репродуктивная система	Существует ли сигнал у человека после учета циркадного нарушения и тепловой нагрузки?
Экология	Какие теплые спектры минимизируют вред насекомым при одинаковой зрительной полезности для человека?
Экология	Как адаптивное диммирование и ночные ограничения освещения влияют на опыление и метаболизм экосистем?
Экология	Как измерить суммарные биологические люмен-часы, а не только потребление электроэнергии?
Эффект обратного роста	Как ценовая эластичность освещения изменяет экспозицию после повышения энергоэффективности?
Города	Какие поэтапные модернизации позволяют провести валидные естественные эксперименты с биологическими данными до вмешательства?
Стандарты	Следует ли включить минимальную отчетность по mEDI и исходной TLM в маркировку продукции?
Стандарты	Нужны ли отдельные пределы для людей с мигренью и детских групп?
Стандарты	Как включить характеристики установленной системы при диммировании в оценку соответствия?
Рынок	Какова распространенность продукции, ошибочно маркированной как «без мерцания» и «полный спектр»?
Рынок	Можно ли создать закупочную оценку, объединяющую энергетику, спектр, TLM, блескость, ремонтпригодность и экологию?
Архитектура	Какой дизайн окон и дневного освещения минимизирует потребность в ярком электрическом свете днем?
Архитектура	Как взаимодействуют тепловой и зрительный комфорт при добавлении ламп накаливания или NIR-источников?
Политика	Как сохранить энергетические преимущества LED при снижении засветки неба и циркадной экспозиции?
Фальсификация	Какой единственный эксперимент наиболее эффективно различит спектральную недостаточность и циркадное рассогласование?

Приложение Н. Термины и определения

Единая терминология необходима для сопоставимого описания измеряемой системы инженерами, биологами и клиницистами.

Термин	Рабочее определение
α-опическая облученность	Спектрально взвешенная облученность для одного из пяти классов фоторецепторов человека.
A2E	Бисретиноидный компонент липофусцина RPE, фотосенсибилизатор в ряде моделей сетчатки.
ALAN	Искусственный свет в ночное время, внутренний или наружный, оцениваемый различными косвенными и прямыми показателями.
BCVA	Максимально скорректированная острота зрения, клинический показатель зрительной функции.
Опасность синего света B(λ)	Спектр действия фотохимического повреждения сетчатки.
CCO	Цитохром-с-оксидаза, комплекс IV; предполагаемый фотоакцептор PBM.
CCT	Коррелированная цветовая температура, визуальная характеристика в кельвинах.
Хроматическая TLM	Временное изменение цветности при стабильном суммарном световом потоке.
CRI Ra/R9	Традиционные показатели цветопередачи; R9 характеризует насыщенный красный тестовый образец.
DLMO	Начало секреции мелатонина при слабом освещении, маркер циркадной фазы.
Драйвер	Электронная схема, преобразующая сетевое питание в управляемый ток LED.
Duv	Расстояние от локуса абсолютно черного тела в пространстве цветности.
Рабочий цикл	Доля каждого периода модуляции, в течение которой источник находится во включенном состоянии.
EDI	Эквивалентная дневному свету освещенность для ответа, взвешенного по чувствительности фоторецептора.
ERG	Электроретинография, измерение функционального электрического ответа сетчатки.

Термин	Рабочее определение
Энергетическая экспозиция	Облученность, интегрированная по времени; часто выражается в Дж/см².
FWHM	Полная ширина на половине максимума, характеристика ширины спектрального пика.
Блескость	Дискомфорт или ограничение зрительной функции вследствие чрезмерной яркости или контраста.
HF-HRV	Высокочастотная вариабельность сердечного ритма, суррогатный показатель парасимпатической регуляции.
Освещенность	Падающий свет, взвешенный по фотопической функции; единица измерения - люкс.
ipRGC	Внутренне фоточувствительная ганглиозная клетка сетчатки, экспрессирующая меланопсин.
Облученность	Падающая мощность излучения на единицу площади, Вт/м².
L_B	Радансность, взвешенная по функции опасности синего света.
Яркость	Фотометрическая радиансность, воспринимаемая как яркость источника; кд/м².
Меланопическая DER	Отношение меланопического и фотопического ответа для источника.
Меланопическая EDI	Эквивалентная дневному свету освещенность, взвешенная по меланопсину.
Метамер	Спектрально различный стимул, формирующий сходное зрительное восприятие цвета.
MMP / Δψ	Митохондриальный мембранный потенциал.
NIR	Ближнее инфракрасное излучение, начинающееся примерно от 780 нм по определению ICNIRP.
OCR	Скорость потребления кислорода, прямой показатель клеточного дыхания.
OLED	Органический светодиод с излучающими органическими слоями.
ONL	Наружный ядерный слой сетчатки, содержащий ядра фоторецепторов.
PBM	Фотобиомодуляция, дозированное воздействие красным или NIR-излучением малой или умеренной мощности.
PAVM	Показатель видимости фантомного массива.
PFD	Плотность потока фотонов, обычно в мкмоль фотонов/(м²·с).
Фотопическая освещенность	Освещенность, взвешенная по функции V(λ) и ориентированная на дневное зрение.
PstLM	Метрика кратковременной заметности прямого мерцания.
PWM	Широтно-импульсная модуляция, управление посредством изменения рабочего цикла импульсов.
Радансность	Мощность излучения на единицу проецируемой площади и телесного угла.
RPE	Ретинальный пигментный эпителий, метаболически активный поддерживающий слой за фоторецепторами.
Rf/Rg	Индексы точности цветопередачи и охвата цветовой гаммы TM-30.
Группа риска	Классификация IEC 62471 для заданных расстояния, длительности и геометрии.
ROS	Активные формы кислорода, выполняющие сигнальную функцию или вызывающие повреждение в зависимости от количества и контекста.
Саккада	Быстрое движение глаза, способное сделать фантомные массивы видимыми.
SPD	Спектральное распределение мощности как функция длины волны.
SVM	Показатель видимости стробоскопического эффекта.
TLM	Временная модуляция света, любое изменение светового выхода во времени.
UGR	Обобщенный показатель дискомфорта блескости для внутреннего освещения.
Фиолетовый первичный излучатель	LED-архитектура с возбуждением около 405-420 нм и люминофорной конверсией.
Цайтгебер	Внешний временной сигнал, синхронизирующий биологические ритмы.

Библиография

Первичные исследования, систематические обзоры, стандарты и официальные оценки, использованные в отчете.

1. Phillips AJK et al. High sensitivity and interindividual variability in the response of the human circadian system to evening light. [DOI / источник](#)
2. Souman JL et al. Spectral tuning of evening ambient light and melatonin suppression. [DOI / источник](#)
3. Blume C et al. Effects of melanopic illuminance on melatonin, sleep and alertness. [DOI / источник](#)
4. Rahman SA et al. Blue-depleted LED lighting and evening circadian responses. [DOI / источник](#)
5. Chang AM et al. Evening use of light-emitting eReaders negatively affects sleep and circadian timing. [DOI / источник](#)
6. Mason IC et al. Light exposure during sleep impairs cardiometabolic function. [DOI / источник](#)
7. Chamorro R et al. Dim light during sleep and glucose regulation. [DOI / источник](#)
8. Scheer FAJL et al. Adverse metabolic and cardiovascular consequences of circadian misalignment. [DOI / источник](#)
9. Morris CJ et al. Endogenous circadian system and circadian misalignment on glucose tolerance. [DOI / источник](#)
10. Harmsen JF et al. Natural daylight versus artificial office light in type 2 diabetes. [DOI / источник](#)
11. Brown TM et al. Recommendations for daytime, evening and nighttime indoor light exposure. [DOI / источник](#)
12. Windred DP et al. Personal light exposure and type 2 diabetes incidence. [DOI / источник](#)
13. Windred DP et al. Day and night light exposure and mortality. [DOI / источник](#)
14. Windred DP et al. Night light exposure and cardiovascular disease incidence. [DOI / источник](#)
15. Liang S et al. Outdoor light at night and mortality in UK Biobank. [DOI / источник](#)
16. Tian et al. Outdoor ALAN and cause-specific mortality in 6.3 million Dutch adults. [DOI / источник](#)
17. IARC Monographs Volume 124. Night shift work. [DOI / источник](#)
18. Palomar-Cros A et al. Light at night and hormone-related cancers meta-analysis. [DOI / источник](#)
19. Travis RC et al. Night shift work and breast cancer incidence: pooled prospective studies. [DOI / источник](#)
20. Jones BA. Artificial light at night and breast cancer mortality: Los Angeles LED synthetic control. [DOI / источник](#)
21. Lindén J et al. Cortical responses to high-frequency temporal light modulation measured with 7T fMRI. [DOI / источник](#)
22. Veitch JA et al. Pupil and neurophysiological responses to 100 and 500 Hz TLM. [DOI / источник](#)
23. Wilkins AJ et al. Fluorescent lighting, headaches and eyestrain. [DOI / источник](#)
24. Sekulovski D et al. Long-term office exposure to 100 Hz modulation. [DOI / источник](#)
25. Miller NJ et al. Phantom array visibility and migraine susceptibility. [DOI / источник](#)
26. IEA 4E SSLC. Temporal Light Modulation performance analysis 2014-2025. [DOI / источник](#)
27. Mantela et al. Temporal light artefacts in LED lamps before and after regulatory change. [DOI / источник](#)
28. IEEE 1789-2015. Recommended Practices for Modulating Current in High-Brightness LEDs. [DOI / источник](#)
29. CIE TN 012:2021. Guidance on the Measurement of Temporal Light Modulation. [DOI / источник](#)
30. EU Regulation 2019/2020 consolidated. Ecodesign requirements for light sources. [DOI / источник](#)
31. Kaynezhad P et al. Acute exposure to 420 nm light and retinal mitochondrial/hemodynamic signals. [DOI / источник](#)
32. Godley BF et al. Blue light induces mitochondrial DNA damage and free radical production in epithelial cells. [DOI / источник](#)
33. Roehlecke C et al. Stress reaction in retinal pigment epithelium after blue light exposure. [DOI / источник](#)
34. Kuse Y et al. Damage of photoreceptor-derived cells in culture induced by light emitting diode-derived blue light. [DOI / источник](#)
35. Arnault E et al. Phototoxic action spectrum on A2E-loaded retinal pigment epithelium. [DOI / источник](#)
36. Marie M et al. Blue-violet light effects on mitochondrial functions in A2E-loaded RPE. [DOI / источник](#)
37. Françon M et al. Low-dose blue/white light responses in hiPSC-derived RPE. [DOI / источник](#)
38. Shang YM et al. White LED and retinal damage in a rat model. [DOI / источник](#)
39. Krigel A et al. Light-induced retinal damage using different light sources and rat pigmentation. [DOI / источник](#)
40. Jaadane I et al. Retinal damage induced by commercial light emitting diodes. [DOI / источник](#)
41. Jaadane I et al. Effects of white LED exposure on RPE and blood-retinal barrier. [DOI / источник](#)
42. Sun et al. Long-term LED exposure and retinal vascular/inflammatory changes in rats. [DOI / источник](#)
43. O'Hagan JB et al. Optical radiation hazards of light emitting diodes in domestic lighting and screens. [DOI / источник](#)
44. CIE Position Statement on the Blue Light Hazard. [DOI / источник](#)
45. ICNIRP Guidelines on limits of exposure to incoherent visible and infrared radiation. [DOI / источник](#)
46. SCHEER. Opinion on potential risks to human health of LEDs. [DOI / источник](#)
47. ANSES. LEDs and blue light: health effects and recommendations. [DOI / источник](#)
48. Roddick CM et al. Effects of ambient near-infrared light on stress, affect and cognition. [DOI / источник](#)
49. Roddick CM et al. Corrigendum: corrected NIR dose. [DOI / источник](#)
50. Giménez MC et al. Dose and season dependent effects of 850 nm light. [DOI / источник](#)
51. Kennedy DO et al. Transdermal photobiomodulation and sleep. [DOI / источник](#)
52. Chen et al. Near-infrared and white light interventions in older adults with insomnia. [DOI / источник](#)
53. Powner MB, Jeffery G. Whole-body 670 nm exposure and glucose tolerance. [DOI / источник](#)
54. Jeffery G et al. Remote 850 nm exposure and human color contrast thresholds. [DOI / источник](#)

55. Shinhmar H et al. Morning 670 nm light and color contrast sensitivity. [DOI / источник](#)
56. Barrett P, Jeffery G. Incandescent supplementation in an LED workplace. [DOI / источник](#)
57. Grewal MK et al. 670 nm photobiomodulation in intermediate AMD. [DOI / источник](#)
58. LIGHTSITE III randomized trial. [DOI / источник](#)
59. Sipion M et al. Long-term blinded photobiomodulation in 5xFAD mice. [DOI / источник](#)
60. Nash TR et al. Daily blue-light exposure shortens lifespan and causes brain neurodegeneration in Drosophila. [DOI / источник](#)
61. Hoh Kam J et al. 420 nm light alters mitochondrial function in Drosophila. [DOI / источник](#)
62. Yang J et al. Blue light alters metabolites and neurotransmitters in eyeless flies. [DOI / источник](#)
63. Begum R et al. Near-infrared light improves mitochondrial function in aged Drosophila. [DOI / источник](#)
64. He M et al. Effect of time spent outdoors on myopia prevention among children. [DOI / источник](#)
65. Torii H et al. Violet light exposure can be a preventive strategy against myopia progression. [DOI / источник](#)
66. Kyba CCM et al. Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent. [DOI / источник](#)
67. Kyba CCM et al. Citizen scientists report rapid global reductions in the visibility of stars. [DOI / источник](#)
68. Sánchez de Miguel A et al. Environmental risks from artificial nighttime lighting in Europe. [DOI / источник](#)
69. Boyes DH et al. Street lighting has detrimental impacts on local insect populations. [DOI / источник](#)
70. Giavi S et al. Artificial light at night can modify daytime plant-pollinator interactions. [DOI / источник](#)
71. Elvidge CD et al. Spectral identification of lighting type and spectra 350-2500 nm. [DOI / источник](#)
72. EMPIR PhotoLED database of 1494 LED product spectra. [DOI / источник](#)
73. DOE. LED Color Characteristics factsheet. [DOI / источник](#)
74. DOE. Life-cycle assessment of energy and environmental impacts of LED lighting. [DOI / источник](#)
75. McColl SL, Veitch JA. Full-spectrum fluorescent lighting: a review of its effects on physiology and health. [DOI / источник](#)

Итоговое заключение для публичного обсуждения

Этот документ сознательно оставляет открытыми несколько неудобных вопросов. Массовая система освещения могла создать значимый хронический фактор среды, который стандарты, построенные вокруг энергопотребления, визуального комфорта и острой безопасности, описывают неполностью. Одновременно существующая литература не позволяет объявить всю LED-технологию единым токсикантом.

Научная задача состоит в измерении полного светового вектора, разделении факторов и проверке клинических исходов. Авторы приветствуют исправления, отрицательные результаты, независимые репликации и предложения более сильного экспериментального дизайна.

КОНЕЦ ОТЧЕТА