

Технологии освещения нового поколения

Адаптивная световая среда с учётом физиологии человека

Алексей Ананьин

SEC-2025-LIGHT-ЕМО

Период работы: со 2 марта 2025 года по 1 сентября 2026 года

Аннотация

Предлагается концепция адаптивной световой среды, объединяющей суточное управление экспозицией, спектральную настройку источников, пространственную организацию света и персональную обратную связь. Исходным основанием служит авторское наблюдение: качество освещения определяется совокупностью условий, в которых человек находится на протяжении суток. Статья развивает общую исследовательскую позицию группы учёных, космонавтов, биологов, нейробиологов и врачей, включая врачей-космонавтов, с которыми автор обсуждает эту проблематику.

Работа имеет концептуальный характер. Её материалы включают авторские наблюдения, тематический анализ опубликованных источников и проект экспериментального исследования. Рассматриваются воспроизведение динамики естественного освещения, плазменные и полупроводниковые источники, организация электропитания и управление с участием искусственного интеллекта. Для каждого направления определены измеряемые параметры и границы интерпретации. Предложены проверяемые гипотезы, сравнительный протокол и математические модели для описания экспозиции, управления, энергопотребления и результатов эксперимента. Центральный вывод состоит в целесообразности проектирования света как управляемого фактора среды обитания с обязательной оценкой зрительных, физиологических и эксплуатационных показателей.

Ключевые слова: световая среда; циркадные ритмы; меланопическая экспозиция; адаптивное освещение; плазменные источники; искусственное небо; искусственный интеллект; космическая среда обитания.

1 Постановка задачи

Свет одновременно обеспечивает зрительную деятельность и участвует в регуляции физиологических процессов. В здании эти функции реализуются через конкретную геометрию помещений, свойства поверхностей, расположение окон и источников, режим работы оборудования и поведение людей. Поэтому единицей проектирования предлагается считать световую среду человека в течение суток.

Авторское наблюдение, положенное в основу работы, касается различия между восприятием естественной среды и длительным пребыванием в искусственно освещённых помещениях. Оно задаёт исследовательский вопрос о вкладе суточной экспозиции, распределения яркости, направления света и его изменчивости в самочувствие. Причинные связи между этими признаками и физиологическими исходами составляют предмет экспериментальной проверки.

Цель статьи состоит в переводе исходной концепции в систему измерений и проверяемых инженерных решений. Предлагаемый подход адресован специалистам по светотехнике, хронобиологии, нейрофизиологии, медицине, архитектуре и системам жизнеобеспечения.

2 Физиологические основания и световая экспозиция

Сетчатка содержит несколько типов фоторецепторов, совместно участвующих в зрительных и физиологических ответах на свет. Особое значение для циркадной регуляции имеют меланопсинсодержащие светочувствительные ганглиозные клетки, обозначаемые ipRGC. Стандарт CIE S 026/E:2018 задаёт спектральные функции и величины для описания стимуляции пяти типов фоторецепторов, участвующих в таких ответах. Эта метрология позволяет связывать характеристики источника с экспозицией в плоскости глаза ^[1].

Для инженерного обсуждения удобно использовать меланопическую эквивалентную дневную освещённость, melanopic EDI, далее M-EDI. Величина выражается в люксах и соответствует освещённости стандартным дневным излучением D65, создающим такую же меланопическую облучённость. Цветовая температура характеризует цветность света; расчёт M-EDI требует его спектрального распределения. При одинаковой цветовой температуре источники могут иметь различные спектры и значения M-EDI.

Brown и соавторы предлагают для здоровых взрослых с обычным дневным распорядком ориентиров M-EDI в плоскости глаза: от 250 лк в дневное время, до 10 лк в течение как минимум трёх часов перед привычным временем сна и до 1 лк во время сна. Это экспертные рекомендации для определённой популяции. Применение к детям, сменным работникам и людям с заболеваниями требует отдельного обоснования ^[2]. Позиция CIE по интегративному освещению объединяет зрительные и физиологические задачи и подчёркивает значение времени воздействия ^[3].

В предлагаемой системе суточный профиль задаётся относительно распорядка пользователя. Утренний переход связывается с временем пробуждения, дневной режим с периодом активности, вечерний с подготовкой ко сну. Для сменного графика формируется отдельный сценарий. Местное солнечное время и погода служат дополнительными входными данными.

Измерительная программа должна охватывать рабочее место, зоны отдыха, вечерние перемещения и спальню. Спектрорадиометрические измерения выполняются в характерных положениях головы и направлениях взгляда. Регистрируются дневной свет из окон, искусственные источники, экраны и отражённый свет. Мобильный датчик на одежде требует сопоставления с экспозицией у глаза, поскольку ориентация и затенение меняют показания.

Для интерпретации результатов фиксируются возраст, хронотип, привычное время сна, предшествующая световая экспозиция и условия зрительной работы. Суточная интегральная экспозиция полезна для сравнения режимов. Модель физиологического ответа дополнительно должна учитывать момент воздействия и индивидуальную чувствительность. Тем самым задача управления приобретает временную структуру: одинаковое количество света в разные часы может сопровождаться различными ответами.

3 Пространственная структура и динамика естественного света

Естественный свет меняется по направлению, спектру, яркости и доле рассеянного излучения. В ясную погоду прямой солнечный компонент формирует выраженные тени; облачность увеличивает долю рассеянного света и смягчает их границы. При низком положении Солнца тени вертикальных объектов удлиняются. С ростом высоты Солнца их длина сокращается. Эта геометрия должна воспроизводиться согласованно с освещением реальных поверхностей.

Предлагается разделять управление направленным компонентом и светящимися поверхностями большого углового размера. Первый формирует направление и структуру теней, второй задаёт рассеянное заполнение пространства. Яркость рабочих поверхностей, стен и потолка согласуется с направлением взгляда и зрительной задачей. Локальная подсветка дополняет освещение окружения, поддерживая комфортный диапазон яркостных переходов.



Рисунок 1. Дневная и вечерняя световая среда. Фотографии из личного архива автора служат визуальными референсами для обсуждения направления, рассеяния и распределения яркости. Количественные характеристики устанавливаются инструментальными измерениями; фотографическая экспозиция и обработка камеры изменяют видимые соотношения.

Техническую реализуемость оптического воспроизведения неба и солнечного направления иллюстрируют системы CooLux^[4]. Их характеристики подтверждают возможность создания определённого зрительного образа. Влияние такого образа на самочувствие, сон и работоспособность составляет отдельный исследовательский вопрос.

Рабочая гипотеза состоит в том, что согласованная пространственная динамика может повышать субъективный комфорт при сопоставимой суточной M-EDI. Проверка требует отдельного изменения геометрии и спектральной экспозиции. В базовом протоколе предлагаются плавные переходы и стабильные периоды зрительной работы. Частоту, амплитуду и предсказуемость изменений следует фиксировать как самостоятельные параметры воздействия.

4 Источники света и плазменное направление

Выбор источника определяется требуемым спектром, диапазоном регулирования, пространственным распределением, временной стабильностью, тепловым режимом и полным энергопотреблением. Название технологии описывает физический способ генерации излучения. Физиологическую значимость устанавливают через измеренную экспозицию и результаты сравнительного исследования.

В исходной концепции особое место занимает плазменное направление. Газоразрядные источники формируют излучение в возбуждённой и частично ионизированной среде. Спектр зависит от состава рабочего вещества, давления, температуры и режима возбуждения; в нём могут присутствовать линии, полосы и континуум. Поэтому исследовательскую ценность представляет конкретная оптическая система с заданными характеристиками.

Примером технически реализованного широкополосного плазменного источника служат лазерно поддерживаемые ксеноновые системы Energetiq LDLS. Производитель описывает компактную плазму с высокой спектральной яркостью и излучением, охватывающим ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазоны. Такие устройства предназначены прежде всего для научных и метрологических применений ^[5]. Перенос подобного принципа в освещение помещений требует самостоятельного проектирования оптики, фильтрации, отвода тепла и системы питания.

Для плазменного прототипа предлагается измерять полезную световую отдачу всей установки, температуру доступных поверхностей, спектр на выходе оптики, временную модуляцию, акустический шум, пусковые режимы и стабильность при диммировании. Миниатюризация оценивается вместе с ресурсом, ремонтпригодностью и затратами на обслуживание. Энергетический баланс включает возбуждение плазмы, преобразователи, охлаждение и потери при формировании полезного пучка.

Полупроводниковые источники дают широкие возможности спектрального синтеза и регулирования. В качестве базового сравнения целесообразно использовать качественную многоканальную LED-систему с измеренными характеристиками. Такой эталон позволяет оценить дополнительную ценность плазменной реализации по конкретным показателям. Отдельная серия испытаний может сравнивать источники при одинаковых фотопической освещённости и M-EDI, сходной цветности и сопоставимом распределении яркости.

Временная модуляция зависит от источника, схемы питания и режима регулирования. Материалы Министерства энергетики США рассматривают её как отдельную характеристику светового сигнала и различают мерцание, стробоскопический эффект и другие временные артефакты ^[6]. Поэтому протокол включает запись временной формы сигнала во всём рабочем диапазоне. Для отдельных критериев могут применяться PstLM и SVM с указанием метода расчёта и области применения.

Рабочая гипотеза для плазменного направления формулируется через измеримый результат: определённая конструкция способна обеспечить полезное сочетание спектральных и эксплуатационных свойств для выбранного сценария. Сравнительные данные должны показать величину эффекта, затраты на его получение и условия воспроизводимости.

5 Электропитание и электромагнитная обстановка

Организация питания входит в проект световой среды наравне с оптикой. Она определяет потери энергии, тепловую нагрузку, акустические характеристики, электромагнитную совместимость и удобство обслуживания. Практический интерес представляют вынесенные преобразователи, низковольтное распределение, автономные светильники и передача света от удалённого источника по оптическому тракту.

Исходная идея сокращения технической нагрузки на жилое пространство сохраняет инженерный смысл. Её проверка требует отдельной оценки физических факторов. Для электрических и магнитных полей регистрируются частотный диапазон, пространственное распределение, режим работы и расстояние до человека. Для акустического шума применяются собственные измерения; для световой модуляции используются фотометрические данные. Объединение этих факторов в один показатель «шума среды» требует заранее определённой модели и обоснования весов.

При беспроводной передаче энергии электромагнитное поле участвует в самом механизме передачи. Проектное сравнение должно учитывать КПД от входа передатчика до питания светового модуля, потери при смещении приёмника, поля в доступных зонах и работу при изменении нагрузки. Оптическая передача энергии дополнительно требует оценки доступного излучения и защиты при пересечении луча. Автономный светильник включает аккумулятор и электронный преобразователь; его характеристики определяются всей схемой.

Материалы ВОЗ рассматривают оценку воздействия электромагнитных полей через уровни экспозиции, механизмы взаимодействия и качество имеющихся данных ^[7]. Для радиочастотного диапазона одним из международных ориентиров служат рекомендации ICNIRP 2020, охватывающие частоты от 100 кГц до 300 ГГц ^[8]. При выборе критериев испытания конкретного изделия фиксируются применимые к нему диапазоны и требования.

Предполагаемая связь бытовой электромагнитной обстановки с субъективной усталостью в данной работе имеет статус отдельной гипотезы. Её исследование требует контролируемой экспозиции, слепого распределения условий и учёта акустических, тепловых и световых различий. Это позволяет отделить вклад каждого физического фактора от ожиданий участника и сопутствующих условий.

Для первого прототипа предлагается использовать архитектуру с доступными точками измерения и простым энергетическим балансом. Более сложные способы передачи энергии включаются в сравнительные испытания после стендовой оценки. Преимущество любой схемы подтверждается на уровне всей установки: качество света, электрические потери, обслуживание и характеристики среды рассматриваются совместно.

6 Адаптивное управление и участие человека

Система управления объединяет измерения среды, расписание пользователя и обратную связь. На вход поступают данные о световой экспозиции, присутствии, времени суток, дневном свете и текущей задаче. На выходе формируются настройки спектральных каналов, светового потока, направления и скорости переходов. История команд сохраняется вместе с измерениями, что обеспечивает воспроизводимость режима.

Базовый регулятор реализует заданное расписание и корректирует освещение по фактическому дневному свету. Алгоритм персонализации уточняет параметры по повторным наблюдениям. Искусственный интеллект целесообразен там, где требуется учитывать сочетание условий и индивидуальные ответы. Его дополнительная ценность проверяется сравнением с прозрачным регулятором по расписанию и датчикам освещённости.

Физиологические показатели используются как вероятностные признаки состояния. Частота сердечных сокращений, вариабельность ритма, движение и температура зависят от физической активности, дыхания, положения тела и множества других факторов. Оценку состояния следует строить по согласованному набору наблюдений, включая самоотчёт пользователя. Точность такой оценки устанавливается отдельно от качества управления светом.

Исходную задачу управления эмоциями предлагается сформулировать как исследование влияния световых сценариев на субъективное состояние. Измеряемыми исходами могут служить сонливость, напряжение, приятность среды и готовность к работе. Для каждого исхода выбираются шкала, время опроса и ожидаемое направление изменения. Возможный эффект рассматривается с учётом индивидуальных предпочтений и контекста деятельности.

Периодическая пульсация ради предполагаемого успокоения представляет отдельное вмешательство. Её изучение требует собственного протокола, параметров модуляции и оценки переносимости. В базовой версии системы предпочтительны плавные переходы между устойчивыми режимами. Это облегчает интерпретацию результатов и позволяет оценивать суточное управление независимо от специальных стимулов.

Пользователь определяет задачу, сообщает об ощущениях и может в любой момент изменить режим вручную. Сбор физиологических данных проводится с согласия участника; объём данных ограничивается целями исследования. Архитектура должна предусматривать локальную обработку чувствительных показателей, понятную историю изменений и возврат к заранее выбранному режиму при сбое датчиков.

Врач участвует в исследованиях с клиническими задачами, определяет критерии включения и индивидуальные ограничения, оценивает переносимость и изменения состояния. Для бытовой эксплуатации основой служат верифицированные технические режимы и управление пользователем. Светотерапевтические назначения относятся к медицинскому протоколу с соответствующими показаниями и наблюдением.

7 Исследовательские гипотезы и программа проверки

Программа строится вокруг трёх основных гипотез. Н1: согласование суточной экспозиции с режимом сна улучшает выбранный показатель сна по сравнению с исходным режимом. Н2: пространственная динамика, воспроизводящая отдельные свойства естественного света, повышает субъективный комфорт при сопоставимых экспозиции и зрительной задаче. Н3: персонализация по обратной связи даёт дополнительный эффект относительно заранее заданного адаптивного расписания. Для каждой гипотезы планируется отдельное сравнение.

Стендовый этап включает измерение спектра, освещённости, распределения яркости, временной модуляции, электрической мощности и температуры оборудования. Проверяются повторяемость настроек, переходные процессы и дрейф характеристик. Отдельно оцениваются плазменный и LED-прототипы. В исследование с участием людей передаются режимы, прошедшие техническую проверку.

Первое исследование Н1 целесообразно выполнить как рандомизированное перекрёстное сравнение двух режимов. Каждый участник последовательно проходит режим А с исходным расписанием и режим В с согласованной суточной экспозицией. Последовательности АВ и ВА распределяются случайно. Продолжительность периодов и интервал восстановления определяются с учётом адаптации циркадной системы и уточняются в пилотном исследовании. Параметры первичного анализа фиксируются до набора основной выборки.

В качестве первичного исхода предлагается средняя эффективность сна за оценочные ночи каждого периода, определяемая как отношение времени сна ко времени в постели. Актиграфия сопоставляется с дневником сна; алгоритм обработки выбирается заранее. Вторичные исходы включают время засыпания, субъективную сонливость и комфорт. Для подгруппы с лабораторным наблюдением может измеряться время начала вечернего подъёма мелатонина при тусклом освещении, DLMO.

В течение обоих периодов регистрируются фактическая экспозиция, время пребывания вне помещения, использование экранов, кофеин, физическая активность и отклонения от режима сна. Измерения синхронизируются по времени. Заранее определяются правила обработки пропусков, критерии пригодности ночи и достаточности соблюдения режима. Аналитик получает кодированные обозначения условий; ожидания участников оцениваются отдельным вопросом.

Для Н2 сравниваются статичная и динамическая пространственные сцены при согласованных спектральных и временных параметрах. Для Н3 применяется одно и то же оборудование с двумя способами управления. Такое разделение позволяет оценить вклад геометрии и алгоритма. Набор плазменных прототипов рассматривается в самостоятельном технологическом сравнении, поскольку одновременное изменение источника и режима затрудняет атрибуцию эффекта.

Объём выборки рассчитывается по ожидаемому практически значимому различию и дисперсии внутрисубъектных разностей из пилота. Итоговый отчёт должен содержать оценки эффектов с доверительными интервалами, соблюдение режима и данные о переносимости. Представленная статья задаёт этот протокол; численные результаты относятся к последующему экспериментальному этапу.

8 Области применения и границы концепции

Предлагаемая архитектура применима к жилым помещениям, рабочим пространствам и средам с ограниченным доступом к дневному свету. Для каждой области задаются свои зрительные задачи, распорядок, правила эксплуатации и критерии результата. В многопользовательском помещении персонализация требует согласования общих режимов и локальных зон, поскольку свет одного рабочего места влияет на соседние.

Космические и изолированные среды представляют отдельный исследовательский интерес. На МКС уже применяются управляемые светодиодные модули, разработанные с учётом сна и циркадных задач экипажа; NASA описывает эту работу как пример переноса космических исследований в земные применения ^[9]. Для дальнейших проектов световая среда должна согласовываться с распорядком экипажа, ресурсом оборудования, электромагнитной совместимостью и возможностями ремонта.

Связь с космонавтикой в этой концепции выражается в постановке задачи жизнеобеспечения. Освещение рассматривается вместе с тепловой нагрузкой, энергоснабжением, обитаемостью и работоспособностью. Земной стенд даёт возможность проверить такие связи в воспроизводимых условиях и затем адаптировать решения к конкретной миссии.

Основные границы концепции связаны с переносом лабораторных результатов в повседневную среду, индивидуальной вариабельностью и точностью измерения персональной экспозиции. Субъективный комфорт, циркадная фаза, качество сна и производительность требуют отдельных критериев. Улучшение одного показателя оценивается вместе с изменениями остальных. Аналогичный подход применяется к энергии: расход сопоставляется при одинаковом объёме полезной работы и заданных требованиях к свету.

9 Выводы для профессионального обсуждения

Общая рабочая позиция группы состоит в следующем: проектирование освещения должно охватывать суточную экспозицию человека, зрительную задачу, пространственную структуру света и обратную связь. Авторский вклад данной работы заключается в объединении этих направлений в единую исследовательскую постановку, связывающую светотехнику, физиологию и инженерные системы среды обитания.

Первоочередной результат программы должен включать измеренный световой профиль, воспроизводимый прототип и оценку эффекта в контролируемом сравнении. Плазменные источники, искусственное небо и персонализация получают собственные критерии проверки. Такая структура позволяет обсуждать каждую технологию по её измеримому вкладу.

К профессиональному обсуждению предлагаются выбор первичного исхода, достаточность контроля экспозиции, критерии сравнения источников и модель индивидуальной адаптации. Опубликованные данные служат основанием физиологической и метрологической части; гипотезы и проектные решения представлены как программа дальнейших исследований.

Литература и технические источники

1. CIE. CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light. CIE S 026/E:2018. Vienna: CIE, 2018. DOI: 10.25039/S026.2018. [Открыть источник](#)
2. Brown T. M., Brainard G. C., Cajochen C. et al. Recommendations for daytime, evening, and nighttime indoor light exposure to best support physiology, sleep, and wakefulness in healthy adults. PLOS Biology. 2022;20(3):e3001571. DOI: 10.1371/journal.pbio.3001571. [Открыть источник](#)
3. CIE. Position Statement on Integrative Lighting. Recommending Proper Light at the Proper Time. 3rd edition. CIE PS 001:2024. DOI: 10.25039/PS.b2twa77g. [Открыть источник](#)
4. CoeLux. Artificial Skylights for Natural Sunlight Indoors. Официальные материалы производителя о воспроизведении солнечного и небесного света в помещении. [Открыть источник](#)
5. Energetiq Technology. Laser-Driven Light Sources. Описание принципа, спектрального диапазона и эксплуатационных характеристик плазменных источников LDLS. [Открыть источник](#)
6. U.S. Department of Energy. Flicker Basics. Материал о временной модуляции света и зрительных артефактах. [Открыть источник](#)
7. World Health Organization. Radiation: Electromagnetic fields. Questions and answers. 4 August 2016. [Открыть источник](#)
8. ICNIRP. Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). Health Physics. 2020;118(5):483-524. DOI: 10.1097/HP.0000000000001210. [Открыть источник](#)
9. NASA. NASA Research Boosts LED Lamps for Home and Garden. 2021. Материал о разработке освещения для МКС и земных применений. [Открыть источник](#)

Источники проверены при подготовке к открытому обсуждению 15 сентября 2026 года. Подбор имеет тематический характер. Материалы производителей используются для описания технических решений; физиологические положения соотносятся с научными публикациями и метрологией CIE.

Период работы над документом SEC-2025-LIGHT-ЕМО: со 2 марта 2025 года по 1 сентября 2026 года. Конфиденциальность снята 15 сентября 2026 года. Математическое приложение ниже формализует предложенную программу. Его расчётные примеры имеют иллюстративный статус.

Приложение А Метрология световой среды

Спектр и фотопическая освещённость

Для фиксированных точки наблюдения и ориентации приёмника введём спектральную облучённость $E_\lambda(\lambda, t)$, выраженную в Вт·м⁻²·нм⁻¹. При интегрировании по длине волны в нанометрах фотопическая освещённость рассчитывается по стандартной функции видности $V(\lambda)$:

$$E_v(t) = K_m \int_{380}^{780} E_\lambda(\lambda, t) V(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

Здесь $E_v(t)$ измеряется в люксах; $K_m = 683$ лм/Вт. В данной записи спектр задаётся в видимом диапазоне от 380 до 780 нм. Для практического расчёта используются табличная функция $V(\lambda)$, измеренный спектр и согласованный шаг дискретизации. Показания в плоскости глаза и на рабочей поверхности рассчитываются отдельно.

Меланопическая эквивалентная дневная освещённость

Определения согласованы с CIE S 026/E:2018 ^[1]. При функции меланопической чувствительности $S_{mel}(\lambda)$ сначала вычисляется меланопическая облучённость $E_{mel}(t)$, затем M-EDI, обозначенная $M(t)$:

$$E_{mel}(t) = \int_{380}^{780} E_\lambda(\lambda, t) s_{mel}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$M(t) = \frac{E_{mel}(t)}{K_{mel, D65}} \quad (3)$$

Коэффициент $K_{mel, D65}$ имеет размерность Вт·м⁻²·лк⁻¹. Он равен отношению меланопической облучённости стандартного излучения D65 к его фотопической освещённости при той же нормировке спектральной функции. Для вычислений применяется значение из соответствующего набора данных CIE. Отношение $DER_{mel} = M/E_v$ является безразмерным и характеризует спектр в точке измерения.

Интегральная экспозиция

Световой профиль в интервале от t_a до t_b можно описать интегралом:

$$D_{mel} = \int_{t_a}^{t_b} M(t) dt \quad (4)$$

При времени в часах D_{mel} измеряется в лк·ч. Дневной, вечерний и ночной интервалы анализируются отдельно. Такая величина описывает накопленную экспозицию; прогноз циркадного ответа требует модели с учётом времени воздействия, предыстории и чувствительности человека.

Иллюстративно, при $E_v = 400$ лк и $DER_{mel} = 0,70$ получаем $M = 280$ лк. В вечернем сценарии $E_v = 30$ лк и $DER_{mel} = 0,20$ дают $M = 6$ лк. Значения DER в этом примере выбраны условно. Для изделия они определяются по фактическому спектру у глаза.

Приложение Б Геометрия и адаптивное управление

Геометрия направленного компонента

Для вертикального объекта высотой h на горизонтальной плоскости и параллельного направленного света под углом α к горизонту длина тени ℓ задаётся выражением:

$$\ell = \frac{h}{\tan \alpha}, \quad 0 < \alpha < \pi/2 \quad (5)$$

При $h = 1$ м и $\alpha = 15^\circ$ длина составляет около 3,73 м; при $\alpha = 60^\circ$ около 0,58 м. Модель описывает идеализированную геометрию. Размер источника определяет полутень, а рассеянный компонент меняет контраст. Для близко расположенного искусственного источника применяется геометрия лучей с учётом его координат.

Модель состояния

Предлагаемая дискретная модель связывает настройки освещения и наблюдаемые показатели:

$$x_{k+1} = f_\theta(x_k, u_k, d_k) + w_k \quad (6)$$

$$y_k = h_\theta(x_k) + v_k \quad (7)$$

Вектор x_k описывает оцениваемое состояние, например световую предысторию и уровень сонливости; u_k содержит нормированные команды каналам света; d_k включает время суток, дневной свет и задачу пользователя. Вектор y_k объединяет измерения и самоотчёты. Члены w_k и v_k описывают ошибки модели и измерения. Параметры θ определяются на обучающих данных и проверяются на отложенных участниках. Точность оценки скрытого состояния указывается вместе с прогнозом.

Управление с прогнозом

На горизонте N шагов предлагается минимизировать нормированный функционал:

$$J = \sum_{j=0}^{N-1} [w_M e_{M,j}^2 + w_V e_{V,j}^2 + w_C c_j + w_P p_j + w_U \|\Delta u_j\|^2] \quad (8)$$

Здесь $e_{M,j}$ и $e_{V,j}$ представляют отклонения прогнозируемых M-EDI и фотопической освещённости от целевых значений, делённые на фиксированные масштабы; c_j является нормированной оценкой дискомфорта, p_j нормированной электрической мощностью. Команды u_j безразмерны; $\Delta u_j = u_j - u_{j-1}$. Веса w_M , w_V , w_C , w_P и w_U задают приоритеты и фиксируются до сравнительного испытания. Величины в сумме безразмерны.

Минимизация выполняется при ограничениях на диапазон команд, скорость переходов, допустимые уровни экспозиции, температуру и технические характеристики. Эти ограничения задаются жёстко, отдельно от весов качества. На каждом шаге применяется первая команда рассчитанной последовательности, затем прогноз обновляется. Уравнения (6)-(8) представляют предлагаемую структуру управления; параметры и точность предстоит установить экспериментально.

Приложение В Анализ эффекта и энергетический баланс

Статистическая модель перекрёстного исследования

Для среднего исхода участника i в периоде p предлагается модель со случайным интерсептом:

$$Y_{ip} = \beta_0 + \beta_1 T_{ip} + \beta_2 Q_p + \beta_3 S_i + \gamma^T z_{ip} + b_i + \varepsilon_{ip} \quad (9)$$

Здесь Y_{ip} является средней эффективностью сна за оценочные ночи периода; T_{ip} обозначает исследуемый режим, Q_p второй период, S_i последовательность АВ или ВА. Вектор z_{ip} содержит заранее выбранные ковариаты; b_i учитывает индивидуальный уровень участника, ε_{ip} остаточную вариацию. Коэффициент β_1 оценивает различие режимов в процентных пунктах, если исход задан в процентах. Линейная модель применяется при приемлемом поведении остатков; для выраженной асимметрии предусматривается подходящая модель долей.

Применимость оценки предполагает достаточное восстановление между периодами. Возможный перенос эффекта учитывается на этапе планирования длительности и анализируется по заранее установленному сценарию чувствительности. Для распределённых по времени исходов правила агрегации и ковариаты фиксируются до раскрытия кодов условий.

Приближённая оценка числа завершивших исследование участников для парного сравнения:

$$n \approx \frac{(z_{1-\alpha/2} + z_{1-\beta})^2 \sigma_{\Delta}^2}{\delta^2} \quad (10)$$

Здесь σ_{Δ} является стандартным отклонением внутрисубъектной разности, δ заранее выбранным практически значимым эффектом; α задаёт двусторонний уровень значимости, $1 - \beta$ статистическую мощность, z соответствующий квантиль стандартного нормального распределения. При $\alpha = 0,05$, мощности 0,80 и $\delta/\sigma_{\Delta} = 0,50$ получается около 32 завершивших участников. Это условный расчёт. Для ожидаемой доли выбывания 15% ориентир набора составляет 38 человек; окончательный объём уточняется по пилоту и выбранной модели.

Полное энергопотребление

Энергия системы за период T определяется на общей границе учёта:

$$W_{sys} = \int_0^T [P_{light}(t) + P_{ctrl}(t) + P_{aux}(t)] dt \quad (11)$$

P_{light} включает источники и их питание, P_{ctrl} датчики и вычисления, P_{aux} дополнительное оборудование и выделенное охлаждение. При мощности в ваттах и времени в часах W_{sys} измеряется в ватт-часах. Каждая нагрузка учитывается один раз. Изменение нагрузки на общую систему кондиционирования оценивается отдельно при расширении границы баланса.

$$S = \frac{W_A - W_B}{W_A} \times 100 \% \quad (12)$$

Здесь W_A и W_B являются расходами базового и исследуемого режимов при сопоставимых условиях. Положительное S означает сокращение расхода. Вместе с S публикуются достигнутые характеристики света, длительность использования и физиологические исходы. Уравнения (9)-(12) задают план расчёта; приведённые числа иллюстрируют метод и относятся к проектированию будущего исследования.

Открытые научные вызовы

Продолжением авторской концепции служат исследовательские вопросы, сформулированные в обсуждениях «Института света». Их объединяет задача согласования физических свойств излучения с потребностями живого организма, использованием ресурсов и участием человека в управлении средой. Ниже эти вопросы представлены как программа дальнейшего исследования.

Можно ли создать световую среду, которая в изменяющихся условиях соответствует потребностям человека, поддерживает его деятельность и восстановление, а затраты энергии и материалов на её создание оцениваются на протяжении полного жизненного цикла системы?

1 Идеальный свет и измеримое качество среды

Исследовательский вопрос состоит в определении сочетаний спектра, интенсивности, направления и временной структуры света, наиболее подходящих для конкретного человека и вида деятельности. Понятие «идеальный свет» здесь задаёт направление поиска. Его операциональное содержание предлагается выражать через достижимые сочетания зрительного комфорта, качества сна, бодрствования и ресурсных затрат в заданных условиях.

Центральная задача состоит в построении связи между физическими измерениями и шкалой ощущений человека. Для этого предлагается сопоставлять спектральную экспозицию у глаза, распределение яркости и временную модуляцию с повторными оценками комфорта, сонливости и зрительного напряжения. Субъективное предпочтение и физиологический результат регистрируются отдельно. При анализе учитываются время суток, световая предыстория, возраст, хронотип и характер зрительной задачи.

Ожидаемый результат представляет собой проверенную на независимой выборке модель, позволяющую прогнозировать выбранные исходы вместе с интервалами неопределённости. Область её применимости должна включать описание участников, условий и длительности наблюдения. Такой подход переводит вопрос о качестве света в сопоставимую систему физических и человеческих показателей.

2 Жизненный цикл света и полезное действие энергии

Вторая постановка рассматривает свет как ресурс с прослеживаемой цепью преобразований: от природного или искусственного источника через распространение и взаимодействие со средой к полезному результату. Исследовательская задача состоит в установлении того, как направлять излучение и организовывать его использование, чтобы получать заданное качество среды при обоснованных затратах энергии и материалов.

Для строгого анализа предлагается различать три объекта учёта: поток излучения, преобразования энергии и жизненный цикл оборудования. Модель должна связывать поступление энергии, оптические потери, экспозицию человека, тепловую нагрузку, обслуживание и последующее использование материалов. Границы системы, длительность расчётного периода и правила распределения затрат фиксируются заранее. Полезный результат описывается достигнутыми характеристиками среды и длительностью её использования.

Критерием решения станет воспроизводимое сравнение конструкций и режимов при сопоставимом качестве освещения. Оно должно показывать, где сокращаются потери, какой ресурс требуется для поддержания результата и как ремонт, обновление и повторное использование компонентов меняют итоговый баланс.

Участие человека и совместная проверка

3 Человек как участник управления световой средой

Третий вызов касается роли человека в системе, которая измеряет состояние среды и предлагает изменения освещения. Как распределить управление между пользователем и алгоритмом, чтобы система учитывала индивидуальные потребности, сохраняла понятность своих действий и поддерживала самостоятельный выбор режима?

Предлагается сравнить три способа управления: индивидуальные ручные настройки, автоматическое расписание и адаптивный алгоритм с доступной ручной коррекцией. Основными предметами оценки служат устойчивость предпочтений, частота коррекций, удобство использования и заранее выбранные показатели сна, бодрствования и комфорта. История настроек связывается с фактической экспозицией. Это позволит оценить вклад персонализации и определить ситуации, в которых участие пользователя улучшает результат.

Отдельная задача состоит в исследовании коллективных пространств, где предпочтения и распорядки людей различаются. Здесь проверяются локальные световые зоны, способы согласования режима и возможность индивидуальной коррекции. Критерий решения включает измеримый результат для участников, понятную процедуру выбора и устойчивую работу при изменении состава группы или доступности датчиков.

Общие условия проверки

Все три вызова предлагается исследовать в единой системе регистрации: характеристики среды, история воздействия, действия пользователя, выбранные исходы и расход ресурсов. Для каждого сравнения заранее определяются основная гипотеза, контрольное условие, практически значимый эффект и метод анализа. Модели из приложений А, Б и В задают исходную структуру расчёта и подлежат уточнению по экспериментальным данным.

Исследовательская программа должна охватывать полный суточный цикл, включая активность, вечерний переход и условия сна. Наземные помещения позволяют оценивать решения при доступном дневном свете. Автономная среда обитания ставит дополнительную задачу сохранения суточной организации жизни средствами искусственного освещения. Для неё отдельно проверяются режимы отдыха, рабочие смены, ручное управление и восстановление заданного режима после сбоя.

Результаты следует представлять через величину эффекта, точность оценки, ресурсные затраты и условия воспроизводимости. Расхождение измерений и ожиданий становится основанием для уточнения модели. Такой формат позволяет связывать авторское наблюдение, лабораторное исследование и эксплуатацию в последовательно проверяемую программу.

Эти вопросы адресованы профессиональному сообществу как приглашение к совместной работе. Предметом обсуждения становятся критерии качества, способы измерения, устройство сравнительных испытаний и границы переноса результатов из одной среды обитания в другую.

Фотоприложение

Источники и история светотехники

Авторские фотографии документируют наблюдения, знакомство с оборудованием и рабочие обсуждения. Серия представляет контекст исследования; количественные характеристики света и физиологические эффекты требуют самостоятельных измерений.



Рисунок 2. Карточный каталог. Библиографический поиск помогает сопоставить современные задачи с историей их постановки и найти первичные источники.



Историческая иллюстрация конструкций электрических ламп. Даты и имена воспроизведены в составе сфотографированного изображения; историческая атрибуция требует обращения к первоисточникам.

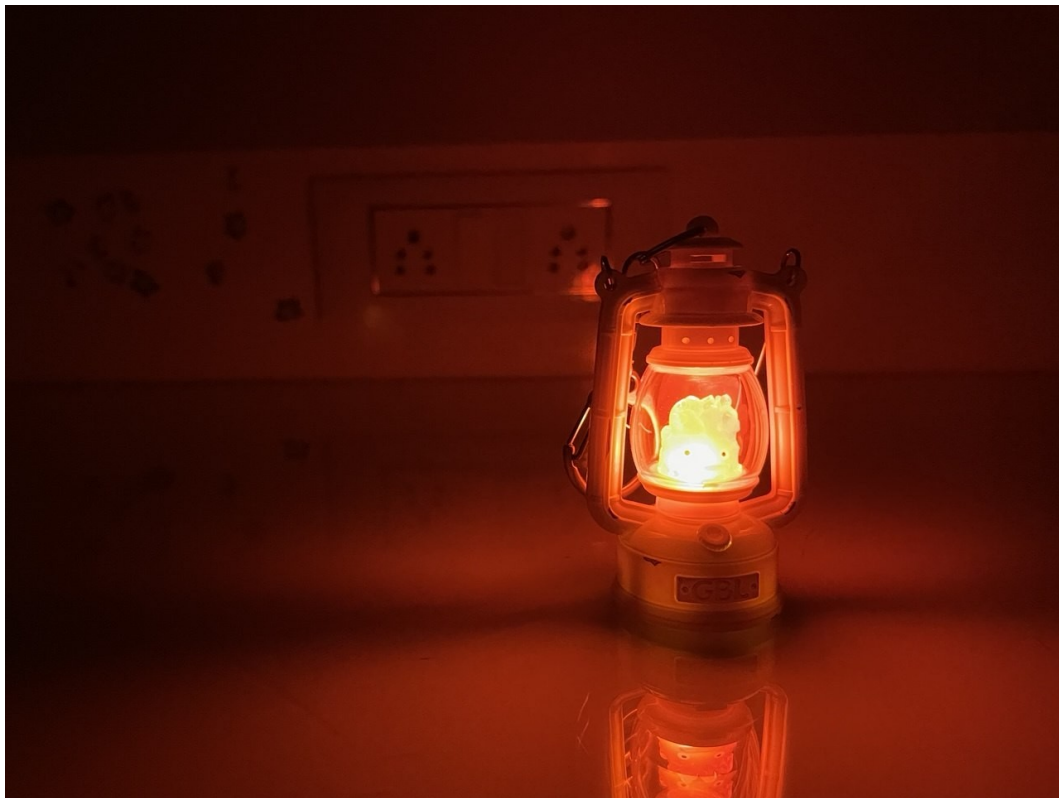
Фотографии автора. Материалы исследовательского поиска.

Световые условия жилого пространства

Фотофиксация позволяет выделить источники, отражающие поверхности и яркие участки сцены. Для сравнения режимов требуются согласованные условия съёмки и измерения на уровне глаз.



Рисунок 3. Слева: дневной свет из окон и локальное свечение печи. Справа: интерьер при преобладающем красном освещении. Кадры показывают разные световые условия и точки съёмки.



Локальный источник в корпусе фонаря и его отражение на поверхности. Видимый оттенок изображения зависит от источника, экспозиции и цветопередачи камеры.

Фотографии автора. Материалы исследовательского поиска.

Естественное освещение и пространственный контраст

Природные сцены дают материал для постановки вопросов о направлении света, яркостных отношениях и глубине пространства.

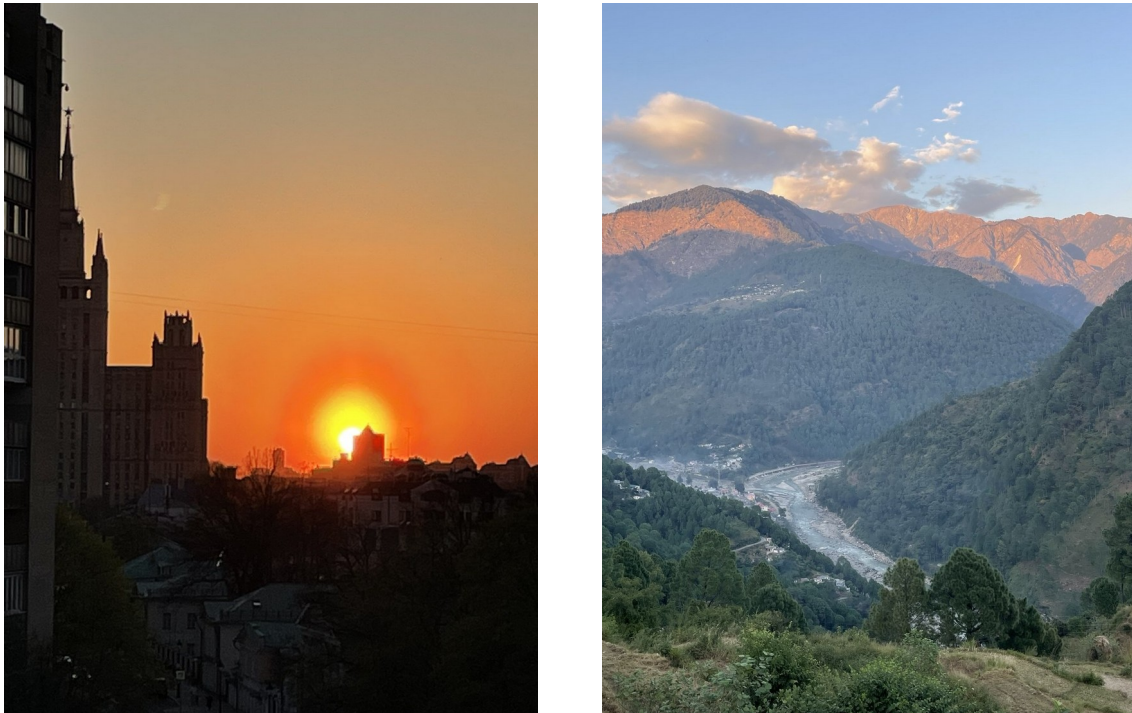


Рисунок 4. Слева: низкое солнце у городского горизонта и силуэты зданий. Справа: освещённые горные гребни над затенённой долиной. В обоих кадрах различимы световые зоны и пространственные планы.

Для переноса таких наблюдений в проект освещения следует описывать положение источников, распределение яркости и изменения сцены во времени. Фотография служит ориентиром для выбора этих параметров. Спектральный состав и световую экспозицию определяют по данным приборной регистрации.

Фотографии автора. Материалы исследовательского поиска.

Распределение света в интерьере

Архитектура формирует световую сцену через геометрию проёмов, расположение источников и свойства поверхностей.



Рисунок 5. Два вида жилого интерьера. Солнечные пятна и тени от проёмов показывают геометрию направленного света; окружающие поверхности участвуют в отражённом освещении.



Общественный интерьер с несколькими уровнями освещения. Контурная подсветка потолка, настольные светильники и свет из окон формируют общую сцену.

Фотографии автора. Материалы исследовательского поиска.

Оптические элементы и распределение света

Осмотр светильников связывает видимую структуру сцены с геометрией оптических элементов и расположением излучающих поверхностей.



Рисунок 6. Слева: видимые пучки в рассеивающей среде. Справа: осмотр настенных светильников с протяжёнными светопропускающими элементами. Сцены показывают разные способы пространственного распределения света.



Кольцевая конструкция с многогранными светопропускающими элементами. В кадре видны локальные яркие участки, возникающие при взаимодействии света с поверхностями элементов.

Фотографии автора. Материалы исследовательского поиска.

Материалы и изготовление стеклянных элементов

Производственные наблюдения дополняют изучение готовых изделий. Геометрия и свойства оболочки входят в описание оптической системы.

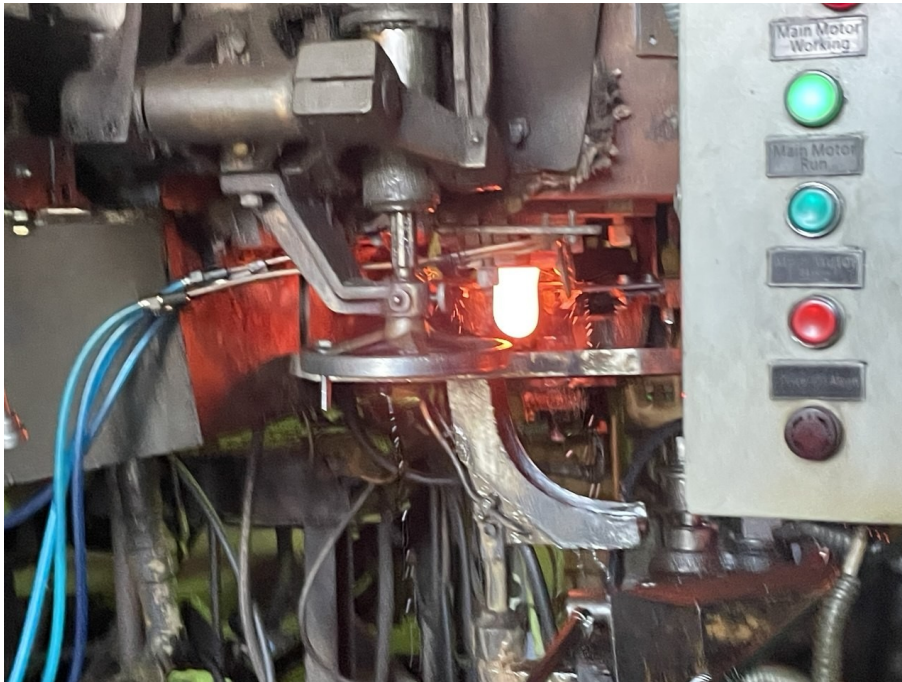


Рисунок 7. Светящаяся разогретая заготовка на производственном оборудовании. Кадр фиксирует стадию обработки материала; температуру и технологический режим определяют по данным процесса.



Окрашенные стеклянные оболочки на производственном участке. Их форму и цвет можно описать по изображению; спектральное пропускание определяют отдельным измерением.

Фотографии автора. Материалы исследовательского поиска.

Видимое свечение и тепловые процессы

Сопоставление светящихся объектов требует учитывать физический механизм, тепловой режим и назначение устройства. Цветовая фотография фиксирует видимую сцену.

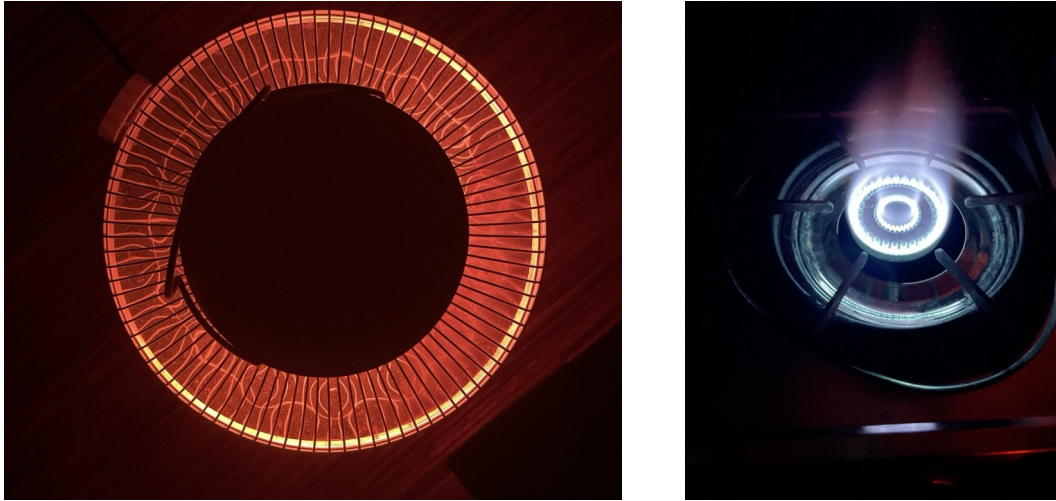


Рисунок 8. Слева: кольцевой прибор с красным свечением за защитной решёткой. Справа: газовое пламя кухонной горелки. Для количественного сравнения требуются спектральные и тепловые измерения.



Фонарь рядом с работающей газовой горелкой. В сцене сочетаются источники с различным видимым оттенком и отражения от металлических и гладких поверхностей.

Фотографии автора. Материалы исследовательского поиска.

Рабочие обсуждения и осмотр образцов

Обсуждение конструкций и осмотр образцов помогают сформулировать проверяемые требования к источникам, оптике и световой среде.



Рисунок 9. Обсуждение световых конструкций в экспозиционном пространстве. Пространственная сеть светящихся точек позволяет рассматривать геометрию размещения источников и направления наблюдения.



Слева: осмотр образца лампы при локальном освещении. Справа: прозрачная колба и светотеневой рисунок на поверхности. Видимые детали помогают выбрать объекты последующего измерения.

Фотографии автора. Материалы исследовательского поиска.