Как ставить научные вопросы о свете?

История пересмотра исследовательской программы

3 октября 2026 года

Предисловие

Пишу руками, не интеллектом. В статье отражены и личная исследовательская позиция и позиция группы энтузиастов, учёных и специалистов, занимающихся безопасностью и работой человека в особых условиях. Нас интересует производительность человеческих сообществ в среде, где привычные условия жизни приходится создавать и поддерживать собственными силами. В этом круге задач находятся космос, Арктика и Антарктида, высокогорье Гималаев (особенно «мертвая зона»), подземные пространства и другие места, в которых ошибка системы жизнеобеспечения может быстро стать критической.

Слово «производительность» здесь требует пояснения. NASA предложило термин «human performance», отсюда выросли термины «производительность (мощность) человека и популяции» Вкладываю в него способность сообщества жить на пределе возможностей, сохранять здоровье, выполнять сложную работу, принимать сложные решения и передавать знания. Для постоянного поселения к этому добавляются способность к репродукции, воспитание следующих поколений, обслуживание техники и восстановление после сбоев. Увеличение выработки за одну смену представляет лишь небольшую часть такой задачи. Меня интересует, какой ценой получен этот результат и сможет ли сообщество поддерживать его дальше.

Предельная постановка нашего вопроса звучит так: как создать и поддерживать цивилизацию с нуля в космосе? Под «с нуля» я понимаю развёртывание среды жизни из ограниченного набора людей, знаний, оборудования и ресурсов. Земной вариант того же вопроса возникает там, где окружающая среда сама по себе не обеспечивает устойчивое существование человека. Выражение «зона смерти» использую здесь как образ предельной негостеприимности среды. Конкретные угрозы в высокогорье, полярных районах и под землёй различны, поэтому для каждого места потребуется собственная модель.

Именно в этой постановке мы пришли и к свету. В искусственной среде необходимо решить, что человек будет видеть, как будут устроены его сутки, где он сможет отдыхать и как освещение будет связано с работой остальных систем. Одновременно свет потребуется растениям, измерительным приборам и производственным процессам. Всё это должно работать в пределах доступной энергии, обслуживания и запасных частей.

Параллельно возникла идея системного обновления освещения на Земле. Моё первоначальное ощущение сформулировал прямо: а что если мы пользуемся светом неправильно? Сейчас уточняю эту мысль. Очевиден каскад проблем и накопленной ошибки, системную проблему в ситуациях, когда решение принимают по удобному показателю светильника или рабочей поверхности, забывая про предусмотренные природой и эволюцией полные сутки человека. Масштаб ущерба еще требует глубокого исследования и дополнительных измерений.

Эта статья описывает, как менялась моя постановка вопросов в ходе работы с научной группой и библиотекой исследований. Программа исследований обновляется постоянно, тут у мы крепко рассчитываем и на себя и на компьютерный разум (сверхинтеллект). Главный результат нашего обсуждения состоит в том, что перед инженерными вопросами о светильнике

появились два более общих вопроса: **как** организм **взаимодействует** со светом и **в какой пропорции** ему необходимы свет, **темнота** и **переходы** между ними.

1. Исходник программы

Первоначально попросил собрать научные вопросы, которые уже поставлены в Академии Света и на связанных с ней площадках. Получился перечень из 46 вопросов, объединённых в шесть направлений: человек и полные сутки; биологические эффекты; источники и ресурс; управление и участие человека; экономика; город, живые системы и космос [1].

Мы спрашивали, какой свет человек действительно получает в течение дня, насколько расчёт соответствует реальному помещению, что определяет зрительный комфорт и как проверить пользу согласованного суточного режима. Рядом стояли вопросы о спектре, временной модуляции, ресурсе светодиодной системы, плазменных и тепловых источниках, ремонтопригодности и полной стоимости эксплуатации.

Отдельная часть касалась управления. Что поручать автоматике? Как проверить дополнительную пользу ИИ по сравнению с расписанием и обычными датчиками? Что произойдёт при отказе связи или ошибке алгоритма? Как согласовать потребности нескольких людей? В космической части возникали вопросы о совместном освещении человека, растений и замкнутой среды жизнеобеспечения.

Это была уже содержательная программа. У неё уже имелись приоритеты и возможные способы проверки. Мы подготовили заключительный раздел Академии «Наука» и отдельный материал для самопроверки и вклада участников. Сформулировал требование к выпускнику: «Выпускник Академии должен иметь свой вариант ответов на эти вопросы, так или иначе. Или по крайней мере направление, куда искать».

Когда мы подошли к дальнейшей редактуре, меня остановило ощущение, что в перечне пропущено основание. Вопросы были во многом поставлены изнутри светотехнической практики. Мы уже обсуждали, как улучшить воздействие, хотя ещё недостаточно ясно договорились, что именно считаем воздействием света и какие системы организма включаем в рассмотрение.

Тогда возник вопрос: «А именно, как вообще человек воспринимает свет? Чем?».

Тут стало слишком заметно колея старого мышления светотехнического подхода и стандартного искусственного интеллекта. Главное упустили. С этого места порядок работы изменился. Сначала потребовалось определить самого участника взаимодействия со светом. Следующим шагом стало уточнение времени и условий этого взаимодействия. Только после этого можно было вернуться к выбору оборудования и коммерции.

2 Что означает воспринимать свет?

Первый ответ естественно начинается с глаза. Известная постановка - палочки и колбочки сетчатки участвуют в зрении. Помимо них, существуют внутренне светочувствительные ганглиозные клетки, содержащие меланопсин. Через связанные с ними пути свет участвует в настройке суточных ритмов и других реакциях, которые человек может не осознавать как отдельное ощущение. Работы Самера Хаттара, Дэвида Берсона, Кинг-Вай Яу и их коллег стали важной частью экспериментального основания этого направления [2, 3].

Но даже здесь фраза «глаз воспринимает свет» слишком общая. Увидеть предмет, различить цвет, изменить размер зрачка и сдвинуть фазу суточного ритма означает получить разные

ответы системы. Их нельзя оценивать одним испытанием. Человек может хорошо читать текст в условиях, которые совсем иначе действуют на его вечернюю физиологию.

И тут мы стали различать несколько значений слова «восприятие». В узком смысле это субъективный зрительный опыт. В физиологии можно говорить о фоторецепции: поглощении излучения, после которого запускается определённая сигнальная цепь. Ещё шире находится фотохимия тканей, где свет изменяет молекулы без возникновения зрительного образа. Поглощение излучения также может нагревать ткань. Наконец, первичный ответ в одном месте способен повлиять на другие органы через нервные, сосудистые или химические сигналы.

Это различение оказалось практически полезным. Наличие эффекта в организме ещё не сообщает, где был поглощён свет. Изменение функции глубокого органа может возникнуть после сигнала из глаза или кожи. Для утверждения о прямом действии на этот орган нужно показать, что излучение достигло нужной ткани в достаточной дозе и запустило соответствующий механизм.

Когда я спросил, воспринимаем ли мы свет кожей и глубинными системами, речь поэтому пошла сразу о нескольких разных задачах. Какие ткани обладают собственной светочувствительностью? Какие лишь получают сигнал от других тканей? Где речь идёт о физиологическом ответе, а где о повреждении? Какие наблюдения относятся к человеку в обычной среде, какие получены в культуре клеток или на животных?

> Теперь формулирую **первый вопрос** так: **чем человек воспринимает свет?** То есть какой свет достигает определённой части организма, что его там поглощает, какой процесс начинается и какой результат этого процесса можно подтвердить?

В такой формулировке сохраняется широта замысла и появляются точки, в которых предположение можно проверить.

3 За пределами глаза: кожа, митохондрии, белки(!), иммунные клетки и жировая ткань воспринимают и реагируют на свет

Кожа дала первый убедительный повод расширить рассмотрение. В работе Н. Уикс и коллег из группы Елены Оанчи показано, что UVA-излучение запускает в человеческих меланоцитах сигнальные процессы, связанные с ранним образованием меланина. Исследование выполнено на клетках человека и относится к конкретному механизму пигментации [4]. Из него можно сделать вывод о фоточувствительной реакции клеток кожи. Ответ на вопрос о пользе определённого комнатного освещения потребует другого исследования.

Особенно поучительным оказался пример **белка** опсина OPN3. В работе К. Регаццетти и коллег, включая Тьерри Пассерона, этот белок связывали с реакцией меланоцитов на синий свет. Позднее Р. Оздесьлик и соавторы из группы Оанчи описали участие OPN3 в регуляции пигментации через взаимодействие с рецептором меланокортина, причём в их условиях такой эффект не требовал света [5, 6]. Я вижу здесь конкретный научный спор о механизме и условиях опыта. Сам факт обнаружения белка ещё не позволяет объявить доказанной любую предполагаемую функцию этого белка.

Есть и исследования на людях, в которых воздействие на кожу сопровождалось системным ответом. Д. Лю, Ричард Уэллер, Мартин Филиш и коллеги наблюдали после UVA-облучения изменения сосудистых показателей и артериального давления, связанные с высвобождением

оксида азота из кожных запасов. В эксперименте участвовали 24 здоровых добровольца [7]. Другая работа, М. Штерна и соавторов, исследовала острый сосудистый ответ на облучение тела синим светом у 14 здоровых мужчин [8].

Для моей задачи существенна сама возможность такой цепи: свет действует на кожу, затем регистрируется ответ за её пределами. Продолжительность наблюдения, площадь облучения и экспериментальная доза ограничивают перенос этих результатов на повседневную жизнь. По ним нельзя заключить, что любое освещение того же цвета улучшает здоровье или что облучение следует назначать всем.

Дальнейший поиск вывел нас к **иммунным клеткам и жировой ткани.** Т. Фан и коллеги показали светозависимое усиление подвижности Т-лимфоцитов в клеточных экспериментах [9]. К. Ондрусова и соавторы описали светочувствительную сигнальную систему в подкожных белых адипоцитах, включая опыты с клетками человека [10]. Такие работы ставят новые механистические вопросы. Клинические утверждения об «укреплении иммунитета светом» или управлении массой тела через обычное освещение выходят далеко за пределы этих результатов.

С глубинными структурами необходима ещё большая точность. Группа Ричарда Ланга исследовала у мышей участие OPN5-содержащих нейронов гипоталамуса в светозависимой регуляции теплопродукции [11]. В работе Т. Цудзи и коллег на мышах показана цепь от светочувствительной жировой ткани к гипоталамусу и метаболической регуляции [12]. Это разные причинные маршруты. Во втором случае воздействие на глубокую систему может передаваться химическим сигналом из периферической ткани. Для человека оба направления требуют самостоятельной проверки.

Похожее различение нужно и при обсуждении биологических часов. Э. Бур, Рассел Ван Гелдер, Ричард Ланг и коллеги исследовали локальную световую настройку часов в коже мышей с участием OPN5 [13]. Однако в эксперименте М. Рюгер и соавторов освещение подколенной области у людей не воспроизвело циркадные и острые эффекты, наблюдавшиеся при воздействии на глаза [14]. Фоточувствительность кожи и настройка центрального суточного ритма человека через кожу остаются разными утверждениями.

Таким образом, расширение картины не даёт основания перечислять все клетки тела как равнозначные «органы зрения». Я получаю карту механизмов с разной степенью подтверждения. На этой карте каждый результат должен сохранять свой адрес: вид организма, ткань, спектр, доза, условия опыта и измеренный ответ.

4 Митохондрии и свет

Митохондрии возникли в нашем обсуждении потому, что вопрос о свете постепенно дошёл до клеточной энергетики. Здесь легко соединить несколько интересных работ в слишком широкое объяснение. Удобнее разбирать каждую предполагаемую роль отдельно.

Одна роль связана с обеспечением энергетических процессов в клетке. Другая обнаруживается непосредственно в оптике фоторецептора. Дж. Болл, С. Чэнь и В. Ли показали на колбочках сетчатки суслика, что скопления митохондрий способны работать как микролинзы и направлять свет к светочувствительной части клетки [15]. Это конкретное наблюдение на конкретной структуре. Распространять его на все митохондрии организма пока нет оснований.

Следующая область связана с фотобиомодуляцией, то есть изменением биологических процессов под действием заданного оптического воздействия. В исследовании Майкла Паунера и Глена Джеффри 30 здоровых добровольцев распределили между группами

воздействия и контроля. После облучения участка спины красным светом с длиной волны 670 нм авторы обнаружили изменение ответа на глюкозную нагрузку [16]. Работа представляет интерес как исследование на людях. Она не проверяет длительную жизнь под бытовым освещением и сама по себе не подтверждает всю предполагаемую митохондриальную цепь.

Возможные механизмы тоже остаются предметом проверки. В дискуссии о красном и ближнем инфракрасном свете часто фигурирует цитохром-с-оксидаза, фермент дыхательной цепи. Б. Квирк и Г. Уилан в эксперименте с изолированным ферментом не обнаружили ожидаемого изменения потребления кислорода при выбранных условиях облучения [17]. Отрицательный результат ограничивает конкретную модель механизма. При этом другие условия, ткани и наблюдаемые эффекты требуют собственных опытов.

Ещё один уровень связан **с собственным сверхслабым фотонным излучением** организма. М. Кобаяси и коллеги зарегистрировали его у пяти здоровых мужчин с помощью чувствительной камеры и описали суточные изменения [18]. Регистрация фотонов не доказывает существование развитой системы межклеточной оптической связи. Для такого утверждения потребуется показать источник, приёмник, передачу информации и функцию, которая нарушается при блокировании предполагаемого канала (Проводится отдельная серия исследований, в том числе с особым вниманием на фасцию).

Граница знания продолжает двигаться. В 2026 году Аксель Йайбман, Тильман Коттке, Лукас Гётц-Цинк и коллеги описали изменения структуры человеческого **белка** криптохрома CRY1 при определённых фотохимических превращениях в лабораторной системе [19]. Авторы предложили модель возможной светозависимой функции. Физиологическую роль этого механизма в целом организме человека ещё предстоит установить.

> Для меня итог этого этапа состоит в требовании доводить любопытство до проверяемой цепи. Если мы предполагаем действие света на митохондрии в определённой ткани, нужно выяснить, сколько излучения туда приходит, что его поглощает, что меняется и насколько это изменение существенно для человека. Фраза «**митохондрия реагирует на свет**» без этих уточнений оставляет слишком много разных возможностей.

5 Потребность и право на темноту

После обсуждения механизмов возникла ещё одну аналогию. В питании мы рассматриваем еду и промежутки между приёмами пищи. В работе учитываем нагрузку и восстановление. При обсуждении звуковой среды обращаем внимание на шум и возможность тишины. Почему же свет мы так часто обсуждаем отдельно от темноты и переходов к ней?

> Поэтому сформулирован **второй вопрос** как вопрос о **балансе света и тьмы**, включая сумерки. В этой формулировке нас интересует, что получает человек в течение полных суток и как одно состояние подготавливает другое. Включение светильника становится лишь одним событием внутри продолжительной последовательности.

Аналогия с питанием помогает поставить вопрос, но у неё есть пределы. Человек не получает от обычного освещения питание в том смысле, в котором получает энергию из пищи. Нельзя автоматически перенести понятия голода, калорий или пищевого дефицита на отсутствие отдельных участков спектра. Выражение «световой голод» потребует операционального определения: какого воздействия недостаёт, для какой функции и по какому показателю это установлено.

Темнота тоже требует определения. В измерениях это режим низкого оптического воздействия в выбранном диапазоне, в определённом месте и в течение определённого времени. Для сетчатки имеет значение свет, попадающий в глаз; для кожи важны другие условия экспозиции. Ночное помещение с затемнённым окном и ярким индикатором рядом с лицом нельзя описать одним словом «темно». Нужны остаточный спектр, геометрия и продолжительность, включая пробуждения и краткие включения света.

Под балансом я теперь понимаю согласование режима с биологическим временем, задачами и восстановлением человека. Само по себе равенство часов света и темноты ничего не доказывает. Время воздействия способно изменить даже направление ответа. В исследовании С. Халсы, Чарльза Чейслера и коллег одинаковый тип светового стимула, поданный в разные фазы, вызывал различный сдвиг человеческого суточного ритма [21]. Поэтому отметка на настенных часах должна соотноситься с внутренней фазой конкретного человека.

Имеет значение и предшествующая история. Энн-Мари Чанг, Фрэнк Схер и Чарльз Чейслер показали, что реакция на ночной свет зависит от того, в каких световых условиях человек находился до этого [22]. Одинаковое измерение вечером ещё не гарантирует одинакового физиологического воздействия у двух людей, проживших разные дни.

В экспертных рекомендациях Тимоти Брауна и большого международного коллектива уже рассматриваются дневное, вечернее и ночное освещение. Они адресованы здоровым взрослым с дневным режимом и описывают разные ориентиры для бодрствования, подготовки ко сну и сна [20]. Это хорошая отправная точка для проектирования исследований. Перенос на ночные смены, детей, пожилых людей или изолированное поселение потребует уточнения условий и проверки результатов.

Когда мы заметили в самом начале погружения в вопросы света, наука света *кажется* однобокой, поэтому следовало отделить собственное впечатление от оценки всей области. Хронобиология давно изучает чередование света и темноты. В позиции Международной комиссии по освещению 2024 года прямо рассматривается необходимость подходящего света в подходящее время [25]. Поэтому уточняю предмет своей критики: меня интересует, насколько знания о целых сутках действительно переходят в проектирование, закупку и эксплуатацию. Для ответа нужен аудит практики, включая объекты, документы и измерения.

6 Сумерки как отдельная исследовательская задача

Сумерки привлекают тем, что представляют переходное состояние. Вместе с уровнем света меняются его спектральный состав и пространственное распределение. Субъективный опыт показывает особые режимы мышления и восприятия окружающего мира в сумерках. Естественный вектор на интраспекцию. Но из естественного происхождения этого процесса не следует, что любая его имитация автоматически полезна. Сначала нужно понять, какие именно признаки перехода важны и для какого результата.

Исследования Константина Даниленко, Анны Вирц-Юстис и коллег показывали сдвиг циркадной фазы после искусственно воспроизведённых рассветов [23]. Это даёт основание изучать такие сценарии. Оптимальную длительность перехода для любого человека и помещения из этих опытов вывести нельзя. Комфортное пробуждение, изменение циркадной фазы и улучшение следующего рабочего дня должны измеряться отдельно.

Цветовое впечатление тоже нельзя принимать за готовую биологическую характеристику. Кристина Блюме, Кристиан Кайохен, Мануэль Шпичан и коллеги сравнивали специально откалиброванные изменения по сине-жёлтой оси при одинаковом возбуждении меланопсина.

В исследовании с 16 участниками они не получили убедительных данных о различиях между условиями по изученным показателям циркадного ответа и сна [24]. Область вывода ограничена этим протоколом, но пример показывает, зачем разделять видимый цвет и действие на конкретную рецепторную систему.

Я бы проверял постепенный и резкий переход в сопоставимых условиях, заранее описав спектральную экспозицию, её суммарную величину и временную форму. Даже равная суммарная доза не делает воздействия эквивалентными, поскольку чувствительность меняется во времени. Поэтому задача состоит в оценке формы перехода при явно заданных ограничениях. Возможен результат, при котором человеку приятнее один сценарий, а измеряемая циркадная фаза почти не различается. Это полноценный ответ, который помогает выбрать область применения.

7 Как теперь формулируются главные научный вопросы?

Стало полезно разделять исходное недоумение, гипотезу и вопрос для эксперимента. Недоумение может быть широким: почему мы плохо спим в удобном помещении? Гипотеза предлагает причинное объяснение. Экспериментальный вопрос указывает, какое наблюдение позволит отличить это объяснение от других.

Начинаю с результата, который хочу понять. «Хороший свет» слишком легко объединяет несовместимые ожидания. Для одной задачи нужен надёжный визуальный контроль, для другой требуется сон, для третьей важен рост растения. Даже в пределах человека приятность среды, скорость реакции, число ошибок и самочувствие могут изменяться по-разному. До выбора прибора следует назвать основной результат и критерий практически существенного изменения.

Затем определяю участников и условия. Возраст, режим работы, хронотип, состояние зрения и предшествующая экспозиция могут менять применимость вывода. Если опыт выполнен на здоровых молодых добровольцах, его результат должен сохранить это описание. Проверка на нескольких десятках участников в течение недели не отвечает на вопрос о здоровье поселения через двадцать лет.

Следующий шаг касается самого воздействия. Название технологии, цветовая температура и мощность светильника недостаточны для описания биологического эксперимента. Нужны спектр, временная структура, положение человека, направление света и параметры на уровне предполагаемой мишени. Для глаз и открытой кожи эти параметры придётся описывать по-разному. Стандарт CIE S 026 предлагает величины для оценки возбуждения рецепторных систем сетчатки; при переносе на кожу или митохондрии потребуется обоснование другой метрики [2].

Дальше задаю сравнение. Чтобы проверить пользу алгоритма управления, нужно сопоставить его с определённым альтернативным режимом. Чтобы оценить вклад спектра, придётся по возможности удержать постоянными другие условия или явно включить их в модель. Если вместе со светом меняются температура, расписание, рабочее задание и внимание исследователей, причинный вывод становится значительно труднее.

Особое место занимает путь от источника к результату. Стараюсь выписать его словами: излучение источника, воздействие на ткань, первичный механизм, измеряемый ответ, значение для жизни человека. Каждый переход требует своих данных. Установленный механизм делает гипотезу правдоподобной. Польза в реальных условиях проверяется на соответствующих исходах. Между этими утверждениями может оставаться несколько непроверенных звеньев.

Наконец, спрашиваю: какой результат заставит меня пересмотреть собственное ожидание? Если любое изменение объявляется подтверждением, вопрос сформулирован плохо. До начала работы следует выбрать основной показатель, срок наблюдения, способ анализа и минимальную величину эффекта, ради которой имеет смысл менять практику. Размер выборки рассчитывается под эту задачу. Для отрицательного результата нужно различать отсутствие практически значимого эффекта и недостаточную точность исследования.

Строгость начинается и с описания света. В 2026 году CIE выпустила техническую записку с перечнем ENLIGHT для отчётности о световых воздействиях в лабораторных исследованиях на людях. Р. Наджар, Л. Кервезе, Р. Лок, Э. Макглэшин и М. Шпичан предлагают согласованный набор характеристик, позволяющий лучше сопоставлять работы [26]. Для нашей программы такой документ представляет конкретный инструмент повышения воспроизводимости.

Естественно, мы перестали воспринимать все публикации как одинаковые единицы доказательств. Молекулярный опыт отвечает на вопрос о возможном взаимодействии. Клеточный опыт помогает разобрать механизм. Животная модель позволяет исследовать целостную систему в определённых условиях. Исследование на человеке проверяет человеческий ответ, а полевое наблюдение помогает оценить реальную экспозицию и длительные связи. Для конкретного вывода нужно сочетание подходящих методов и независимых проверок.

Значение контрольных условий хорошо видно в работе Джона Стокли и коллег о повреждении клеток при освещении. Авторы показали, что состав культуральной среды способен влиять на фототоксичность [27]. Поэтому эффект в чашке может частично зависеть от среды, в которой находятся клетки. При обсуждении похожего результата мы должны проверить это объяснение прежде, чем переносить вывод на ткань человека.

8 Меняются привычные вопросы о светотехнике

Вопрос «вредны ли светодиоды» объединяет слишком разные устройства и режимы. Я бы начал с конкретной экспозиции и конкретного исхода. Например: различаются ли частота ошибок и зрительный дискомфорт при двух заранее описанных формах временной модуляции, если средняя освещённость, спектр и рабочая задача сопоставимы? Так можно получить ответ, который действительно относится к проверенному различию. Название источника само по себе причинного механизма не описывает.

Аналогично следует разбирать утверждение о необходимом добавлении (ближнего) инфракрасного излучения. Интерес к фотобиомодуляции оправдывает исследование, но практическая гипотеза должна назвать ткань, дозу и ожидаемый результат. Для сравнения придётся контролировать нагрев, видимый свет и ожидания участников. Затем потребуется выяснить, достижимо ли нужное воздействие в обычном помещении и сохраняется ли эффект при повторном применении. Для этого недостаточно сослаться на один опыт с медицинским или лабораторным облучателем.

Вопрос «можно ли поднять производительность светом» я тоже уточняю. Какая работа выполняется? Сколько ошибок допустимо? Что происходит со сном после смены? Останется ли выигрыш через несколько недель? Рост темпа в одном коротком задании может оказаться бесполезным для автономного поселения, если одновременно ухудшаются восстановление или надёжность последующих действий. Здесь исследователь обязан описать, что именно он оптимизирует.

Даже экономический вопрос требует причинной проверки. **Если после замены освещения выручка магазина выросла, вместе с ним могли измениться сезон, ассортимент, цены и поток покупателей**. Утверждение о приросте на определённый процент требует данных с подходящим сравнением. В нашей программе такую величину следует сохранять как проверяемую гипотезу, пока не получены соответствующие результаты.

То же относится к компьютерному интеллекту. Я хочу узнать, какой дополнительный результат даёт обучаемая система по сравнению с хорошо настроенным расписанием и датчиками. Нужно измерить качество среды, расход энергии, вмешательства человека и поведение при сбоях. Сложность алгоритма сама по себе не показывает его ценность. Человек задаёт цели и границы управления, проверяет объяснения и сохраняет возможность изменить режим. Агент помогает исследовать и настраивать систему в этих условиях.

9 Как сегодня выглядит порядок вопросов

После этого пересмотра сохраняю первоначальные инженерные направления, но помещаю их в более явную последовательность. Нумерация ниже показывает порядок рассуждения. Часть знаний уже получена наукой; открытые задачи возникают на границах механизмов, условий применения и проверяемых результатов.

1 Какими путями организм взаимодействует со светом?

Здесь начинаю с глаза и затем рассматриваю кожу, доступные излучению ткани, фотохимические процессы и передачу сигналов внутри организма. Открытый вопрос состоит в количественном вкладе разных путей при реальной экспозиции человека. Для каждого предполагаемого пути нужно установить мишень, механизм, диапазон воздействий и границы доказательств. Наличие пути у животного задаёт направление поиска, но ещё не определяет проектное решение для человека.

2 Как организовать суточный световой режим?

Меня интересуют длительность и время световых периодов, непрерывность ночного покоя, предшествующая история и регулярность режима. Сюда входят рассвет, сумерки и краткие ночные включения. Открытая задача состоит в выборе сценариев для определённых групп людей и задач, с отдельной оценкой сна, циркадной фазы, работоспособности и удобства. Для сменного режима и полярной среды особенно важно заранее определить, к какому расписанию должна адаптироваться система.

3 Как измерить индивидуальную световую экспозицию?

Паспорт светильника не описывает все перемещения, повороты головы, экраны и наружное освещение. Мне нужен способ сопоставить расчёт помещения с индивидуальной экспозицией и указать погрешность этого сопоставления. Ближайшая исследовательская задача состоит в проверке измерений на уровне глаз и, когда это необходимо, кожи. Без неё трудно понять, почему один и тот же проект даёт разные результаты у разных людей.

4 Какие последствия имеют практическое значение?

Требуется связать измеренное воздействие с исходами, ради которых создаётся среда. Я хочу знать, насколько изменились качество сна, точность работы, утомление и возможность восстановления. Биомаркер полезен, если понятно, на какой вопрос он отвечает. Подавление мелатонина, субъективная бодрость и уменьшение числа рабочих ошибок не заменяют друг

друга. Длительные последствия требуют наблюдения на соответствующем временном горизонте.

5 Где необходима индивидуальная настройка?

Персонализация должна показать дополнительную пользу по сравнению с разумным общим режимом. Предстоит определить, какие индивидуальные признаки позволяют надёжно выбрать сценарий и какие различия слишком непостоянны для управления. В общей комнате возникает отдельная задача: как согласовать несколько потребностей, включая отдых одного человека во время работы другого. Проверять такую систему нужно в условиях совместной жизни, с учётом поведения и возможности ручной настройки.

6 Какие световые системы лучше решают заданную задачу?

После определения цели можно сравнивать светодиодные, тепловые, плазменные и гибридные решения. Меня интересует весь работающий комплекс: источник, питание, оптика, управление, монтаж и обслуживание. Сравнение должно учитывать одинаковую полезную функцию, реальные режимы и окружающую температуру. Открыты вопросы о ресурсе слабого элемента, деградации качества, ремонте и суммарных затратах в течение срока службы.

7 Как управлять средой и сохранять её устойчивость?

Алгоритм должен выдерживать проверку ошибочными данными, отключением связи и изменением расписания. Вопрос о максимальной экономии дополняется вопросом о поведении системы при отказе. Для автономной базы полезно заранее определить минимальный световой режим, который сохраняет критические функции. Участие человека включает понимание режима, возможность вмешательства и оценку того, не создаёт ли управление дополнительную нагрузку на экипаж.

8 Какой результат получает всё сообщество?

На этом уровне нужно учитывать общую энергию, выделение тепла, обслуживание, запасные части и взаимодействие с выращиванием пищи. Экономия на одном светильнике может изменить нагрузку других систем, поэтому границы расчёта следует задавать заранее. Я хочу сравнивать варианты по способности поддерживать жизнь и работу сообщества при конкретных ограничениях. Эффект на уровне отдельного прибора представляет исходные данные для такого расчёта.

9 Какие новые механизмы заслуживают отдельной программы?

Сюда отношу внеокулярную фоторецепцию, отдельные гипотезы фотобиомодуляции, возможные функции криптохромов и сверхслабого излучения. Для каждого направления нужен первый различающий опыт: какое наблюдение отделит предполагаемый механизм от нагрева, реакции среды, побочного сигнала или ошибки измерения? Самая дальняя гипотеза должна иметь такую же ясную проверку, как ближайшая инженерная задача. Срок и стоимость этой проверки могут существенно различаться.

Порядок исполнения определял бы отдельно. На первом этапе нужны исходные измерения полных суток, проверка приборов, выбор значимых исходов и несколько воспроизводимых сравнений световых режимов. Затем можно расширять персонализацию и испытывать новые источники и управление. Долгосрочные исследования и механизмы с неопределённой применимостью требуют отдельного планирования. Приоритет здесь отражает зависимости между работами и доступные ресурсы; он не является оценкой истинности гипотезы.

10 Что меняется в космосе и предельной земной среде?

Теперь возвращаюсь к исходной цели нашей группы. В автономном поселении освещение должно поддерживать жизнь при ограниченных ресурсах и длительном отсутствии внешней помощи. Вопрос о «лучшем свете» приобретает конкретные условия: состав сообщества, режим работ, доступная энергия, возможности ремонта, потребности растений и устройство жилого пространства.

В такой программе я бы раздельно исследовал обычный режим, длительную работу и аварийное сокращение ресурсов. То, что годится для краткого поддержания дежурства, может оказаться неподходящим для повседневной жизни. Сценарий, удобный для взрослого экипажа, потребует пересмотра при появлении детей и пожилых жителей. Расширение поселения изменит постановку задачи даже при тех же светильниках.

Высокогорье, подземная база и полярная станция могут дать полезные модели отдельных ограничений. Но сходство условий нужно доказывать по конкретным признакам. Результат земного опыта не переносится на космическое поселение целиком. В исследовательском протоколе я должен заранее указать, какую часть будущей ситуации воспроизводит модель и какие воздействия остаются за её пределами.

Для производительности сообщества предлагаю учитывать надёжность выполнения задач и цену восстановления. В проекте исследования это могут быть число существенных ошибок, время безопасного выполнения операции, устойчивость результатов по неделям и состояние сна. Для длительного поселения потребуется более широкий набор показателей жизнеспособности. Сводить их к одному индексу допустимо лишь после обсуждения весов, ограничений и возможных потерь, скрытых усреднением.

Так идея системного изменения земного освещения получает проверяемую основу. Можно начать с помещений, где люди действительно проводят значительную часть суток, и сопоставить согласованный режим с исходным. Затем проверить воспроизводимость на другом объекте и в другой группе. Масштабирование будет опираться на полученные результаты. Наш интерес к космосу помогает поставить полную задачу; её отдельные части можно исследовать уже на Земле.

11 Что должен понимать выпускник Академии

Требование к выпускнику после этого разговора стало для меня точнее. Он должен уметь объяснить поставленный вопрос, показать, какие ответы уже существуют, назвать оставшуюся неопределённость и предложить способ её уменьшить. Это относится и к учёному, и к человеку, который проектирует, продаёт или эксплуатирует свет.

Проектировщику нужно связать техническое решение с распорядком жизни и измеряемыми условиями. Продавцу важно различать подтверждённые характеристики изделия, результаты исследований при определённых условиях и ещё непроверенные обещания. Эксплуатирующей организации необходимо наблюдать фактические режимы, учитывать изменения пространства и проверять качество после ремонта или перенастройки. У каждой роли есть собственная часть доказательства.

Я хочу, чтобы один и тот же смысл можно было изложить на трёх уровнях. Ребёнку достаточно сказать, что глаза помогают видеть и сообщают телу о времени суток, а некоторые клетки кожи тоже умеют отвечать на свет. Дальше можно объяснить, зачем нужны день, вечер и возможность спокойно спать. Для обычного взрослого следует добавить различие между

приятным ощущением, бодростью и долгосрочным результатом. Учёному и инженеру придётся показать спектры, дозы, контрольные условия и неопределённость измерений.

Такая смена языка проверяет понимание. Если я не могу объяснить, где заканчивается установленный результат и начинается моя гипотеза, красивое оформление не поможет. Если я перечисляю рецепторы, но не могу сказать, какое измерение требуется для выбора светового режима, связь с практикой тоже остаётся неполной.

Вклад участника Академии поэтому может быть вполне конкретным: воспроизведённый расчёт, набор измерений с описанной погрешностью, разбор противоречащих работ, отрицательный эксперимент или исправленная формулировка вопроса. ИИ способен помогать с поиском, сопоставлением и расчётами. Ответственность за вывод остаётся у человека, который проверяет первоисточники и понимает ограничения метода. Убедительность текста агента не служит самостоятельным научным доказательством.

12 Актуальная постановка задачи

Я начинал с намерения собрать вопросы для заключительного раздела Академии. В ходе разговора выяснилось, что их порядок зависит от более ранних решений: кого мы исследуем, что называем воздействием и какой результат считаем значимым.

Вопрос о восприятии света вывел нас за пределы зрительного образа и заставил различать прямое поглощение, локальную реакцию и системный ответ. Вопрос о темноте добавил время, историю и восстановление. Интерес к митохондриям показал, насколько внимательно нужно проходить путь от отдельного механизма к практическому обещанию. Космическая постановка вернула нас к длительной жизни сообщества и цене каждого технического решения.

Сегодня я формулирую общую задачу так: определить, какой световой режим поддерживает жизнь и деятельность конкретного человеческого сообщества в заданной среде, через какие механизмы он действует, как проверить результат и какими ресурсами этот результат обеспечивается.

Эта формулировка допускает, что часть моих ожиданий не подтвердится. Возможно, некоторые привычные решения выдержат проверку. Возможно, наиболее полезное изменение окажется простым: в другом расписании, в лучшем затемнении или в устранении конкретного источника дискомфорта. Новые механизмы могут потребовать гораздо более длительной работы. Я хочу сохранить возможность каждого из этих ответов.

Для меня правильно поставленный научный вопрос соединяет любопытство с возможностью проверки. Он помогает понять, какие данные нужны сейчас, какой вывод можно сделать после опыта и что придётся исследовать дальше. Именно этому способу мышления я хочу придать место в Академии Света.

Литература и исходные материалы

Номера в тексте ведут к соответствующей записи. Ссылки на публикации открывают первоисточник.

1. Открытая Академия Света. Наука. Исходная программа из 46 вопросов. Версия от 2 октября 2026 года.
https://xpower.agency/academy/light/science/

2. CIE. CIE S 026/E:2018. CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light. 2018.
CIE S 026/E:2018 · страница стандарта

3. Hattar S., Liao H. W., Takao M., Berson D. M., Yau K. W. Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity. Science. 2002;295:1065–1070.
https://doi.org/10.1126/science.1069609

4. Wicks N. L., Chan J. W., Najera J. A., Ciriello J. M., Oancea E. UVA phototransduction drives early melanin synthesis in human melanocytes. Current Biology. 2011;21:1906–1911.
https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.09.047

5. Regazzetti C. et al. Melanocytes Sense Blue Light and Regulate Pigmentation through Opsin-3. Journal of Investigative Dermatology. 2018;138:171–178.
https://doi.org/10.1016/j.jid.2017.07.833

6. Ozdeslik R. N. et al. Human nonvisual opsin 3 regulates pigmentation of epidermal melanocytes through functional interaction with melanocortin 1 receptor. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2019.
https://doi.org/10.1073/pnas.1902825116

7. Liu D. et al. UVA irradiation of human skin vasodilates arterial vasculature and lowers blood pressure independently of nitric oxide synthase. Journal of Investigative Dermatology. 2014;134:1839–1846.
https://doi.org/10.1038/jid.2014.27

8. Stern M. et al. Blue light exposure decreases systolic blood pressure, arterial stiffness, and improves endothelial function in humans. European Journal of Preventive Cardiology. 2018;25:1875–1883.
https://doi.org/10.1177/2047487318800072

9. Phan T. X., Jaruga B., Pingle S. C., Bandyopadhyay B. C., Ahern G. P. Intrinsic Photosensitivity Enhances Motility of T Lymphocytes. Scientific Reports. 2016;6:39479.
https://doi.org/10.1038/srep39479

10. Ondrusova K. et al. Subcutaneous white adipocytes express a light sensitive signaling pathway mediated via a melanopsin/TRPC channel axis. Scientific Reports. 2017;7:16332.
https://doi.org/10.1038/s41598-017-16689-4

11. Zhang K. X. et al. Violet-light suppression of thermogenesis by opsin 5 hypothalamic neurons. Nature. 2020;585:420–425.
https://doi.org/10.1038/s41586-020-2683-0

12. Tsuji T. et al. Light-responsive adipose-hypothalamus axis controls metabolic regulation. Nature Communications. 2024;15:6768.
https://doi.org/10.1038/s41467-024-50866-0

13. Buhr E. D., Vemaraju S., Diaz N., Lang R. A., Van Gelder R. N. Neuropsin (OPN5) Mediates Local Light-Dependent Induction of Circadian Clock Genes and Circadian Photoentrainment in Exposed Murine Skin. Current Biology. 2019;29:3478–3487.e4.
https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.08.063

14. Rüger M., Gordijn M. C. M., Beersma D. G. M., de Vries B., Daan S. Acute and phase-shifting effects of ocular and extraocular light in human circadian physiology. Journal of Biological Rhythms. 2003;18:409–419.
https://doi.org/10.1177/0748730403256650

15. Ball J. M., Chen S., Li W. Mitochondria in cone photoreceptors act as microlenses to enhance photon delivery and confer directional sensitivity to light. Science Advances. 2022;8:eabn2070.
https://doi.org/10.1126/sciadv.abn2070

16. Powner M. B., Jeffery G. Light stimulation of mitochondria reduces blood glucose levels. Journal of Biophotonics. 2024;17:e202300521.
https://doi.org/10.1002/jbio.202300521

17. Quirk B., Whelan H. T. Effect of Red-to-Near Infrared Light and a Nitric Oxide Donor on the Oxygen Consumption of Isolated Cytochrome c Oxidase. Photobiomodulation, Photomedicine, and Laser Surgery. 2021;39:463–470.
https://doi.org/10.1089/photob.2020.4978

18. Kobayashi M., Kikuchi D., Okamura H. Imaging of Ultraweak Spontaneous Photon Emission from Human Body Displaying Diurnal Rhythm. PLOS ONE. 2009;4:e6256.
https://doi.org/10.1371/journal.pone.0006256

19. Jeibmann A., Qi M., Hellmich M., Godt A., Kottke T., Goett-Zink L. The Human Circadian Clock Protein Cryptochrome-1 Responds to Photochemistry by Conformational Changes. Journal of the American Chemical Society. 2026;148:33217–33228.
https://doi.org/10.1021/jacs.6c06484

20. Brown T. M. 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:e3001571.
https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001571

21. Khalsa S. B. S., Jewett M. E., Cajochen C., Czeisler C. A. A phase response curve to single bright light pulses in human subjects. The Journal of Physiology. 2003;549:945–952.
https://doi.org/10.1113/jphysiol.2003.040477

22. Chang A. M., Scheer F. A. J. L., Czeisler C. A. The human circadian system adapts to prior photic history. The Journal of Physiology. 2011.
https://doi.org/10.1113/jphysiol.2010.201194

23. Danilenko K. V., Wirz-Justice A., Kräuchi K., Cajochen C., Weber J. M., Fairhurst S., Terman M. Phase advance after one or three simulated dawns in humans. Chronobiology International. 2000;17:659–668.
https://doi.org/10.1081/CBI-100101072

24. Blume C., Cajochen C., Schöllhorn I., Slawik H. C., Spitschan M. Effects of calibrated blue–yellow changes in light on the human circadian clock. Nature Human Behaviour. 2024;8:590–605. Опубликовано онлайн 22 декабря 2023 года.
https://doi.org/10.1038/s41562-023-01791-7

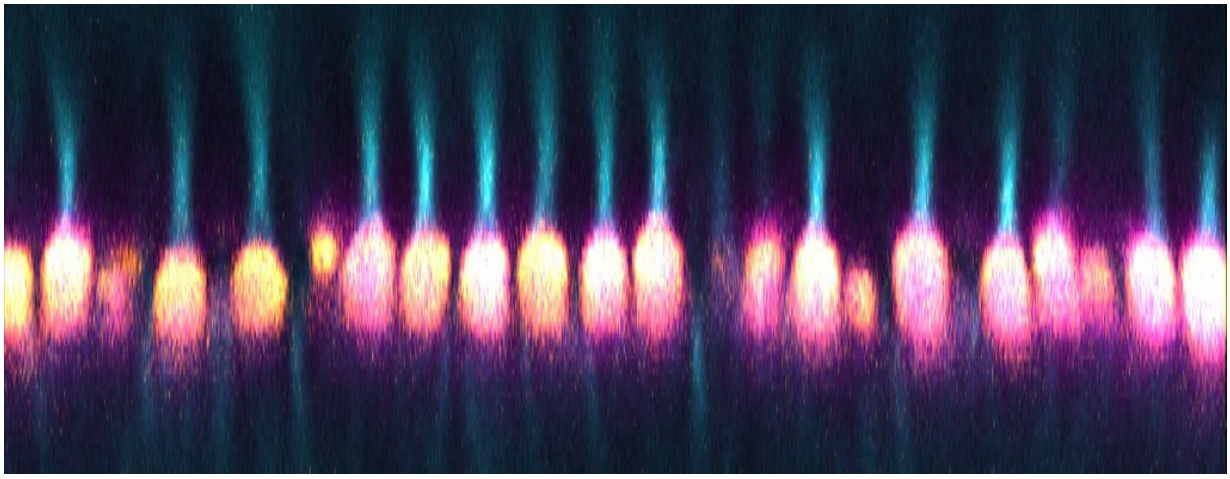
25. CIE. CIE Position Statement on Integrative Lighting: Recommending Proper Light at the Proper Time. 3rd edition. CIE PS 001:2024. 2024.
https://doi.org/10.25039/PS.b2twa77g

26. Najjar R. P., Kervezee L., Lok R., McGlashan E., Spitschan M. A comprehensive checklist for reporting light characteristics in laboratory-based human studies using light as an intervention. CIE TN 016:2026. 2026.
https://doi.org/10.25039/TN.016.2026

27. Stockley J. H. et al. Surpassing light-induced cell damage in vitro with novel cell culture media. Scientific Reports. 2017;7:849.
https://doi.org/10.1038/s41598-017-00829-x

1. Митохондрии как микролинзы

К разделу 4 «Митохондрии и свет»



Микроскопическое изображение из исследования колбочек сетчатки суслика. Скопления митохондрий концентрируют проходящий свет в направлении светочувствительной части клетки. Наблюдение выполнено с помощью модифицированного конфокального микроскопа; цвета служат для визуализации. Результат относится к определённой структуре фоторецептора.

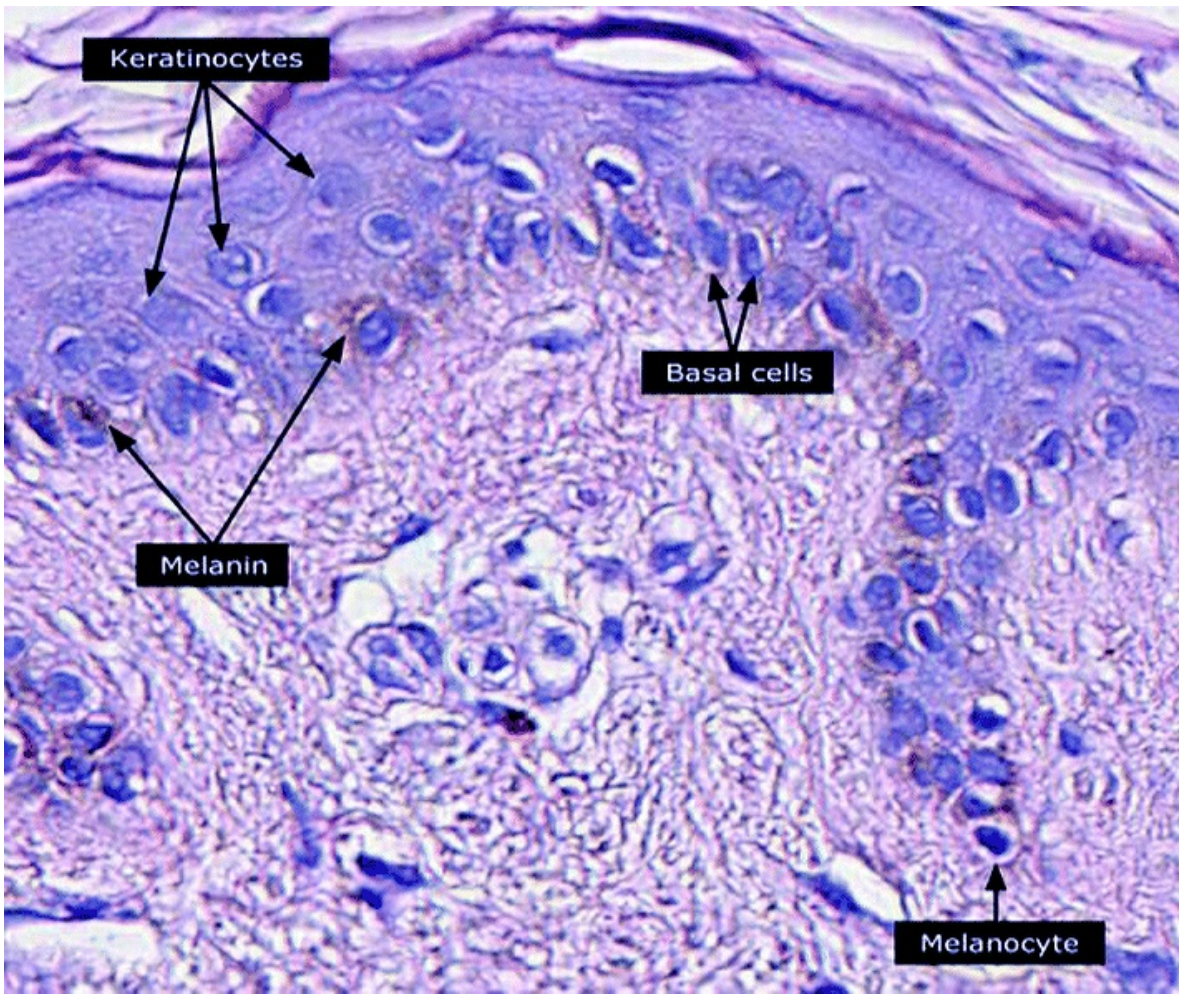
Изображение: John Ball, Ph.D., National Eye Institute / NIH, 2022. Общественное достояние (Public domain).

NIH Image Gallery: оригинал и условия использования

Исследование: Ball J. M., Chen S., Li W., 2022 [15]

2. Клетки эпидермиса

К разделу 3 «За пределами глаза»



Микрофотография эпидермиса с обозначениями кератиноцитов, базальных клеток, меланина и меланоцита. Снимок показывает клеточное устройство ткани. Фоточувствительные реакции этих клеток исследуются отдельными экспериментами, рассмотренными в статье.

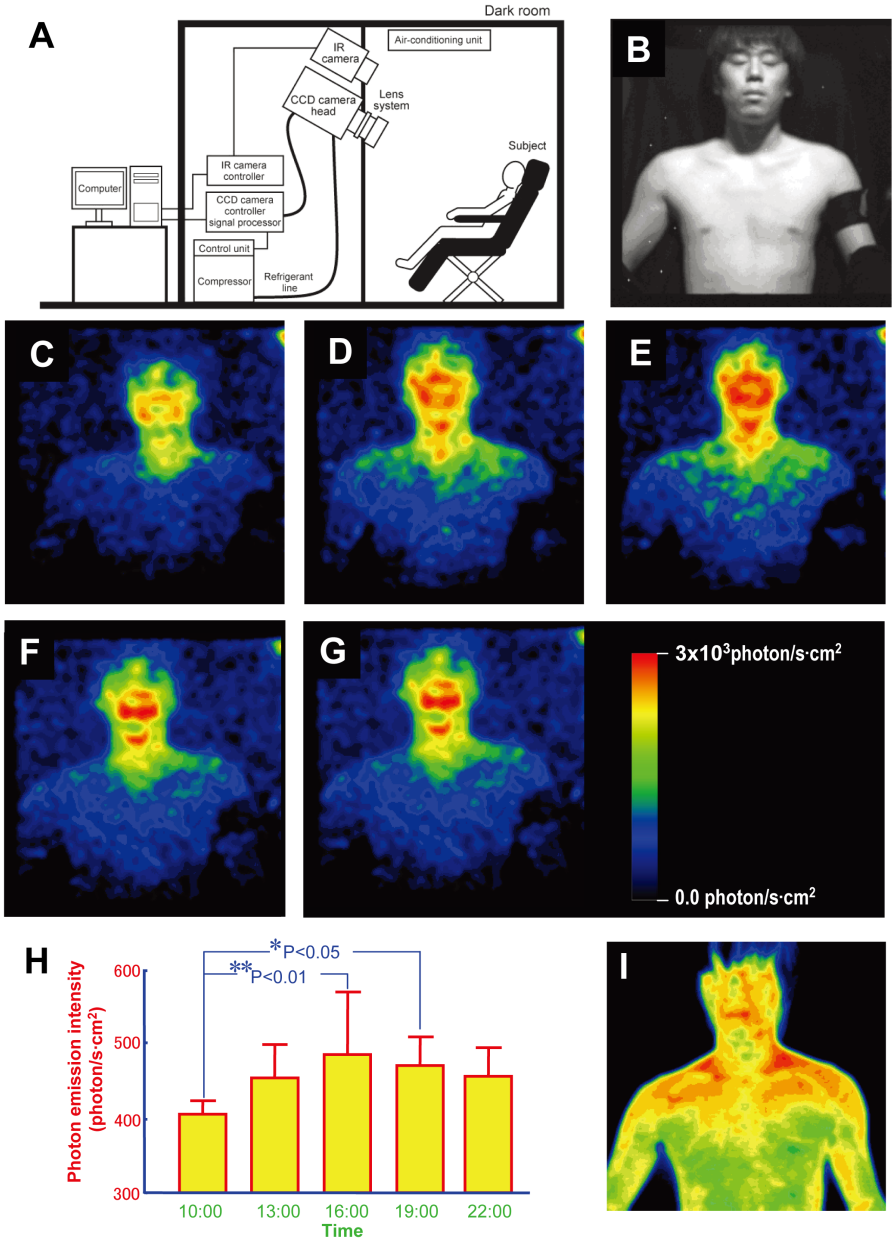
Источник: Setijanti H. B., Rusmawati E., Fitria R., Erlina T., Adriany R., Murtiningsih. Development the Technique for the Preparation and Characterization of Reconstructed Human Epidermis (RHE). Springer, 2019, рис. 2.

Публикация: doi.org/10.1007/978-981-13-2447-5_3

Файл и сведения об авторах · CC BY 4.0 · Изображение воспроизведено без изменений.

3. Сверхслабое излучение человека

К разделу 4 «Митохондрии и свет»



A: установка; B: фотография при обычном освещении; C-G: регистрация сверхслабого фотонного излучения в разное время суток; H: данные пяти добровольцев; I: тепловизионный снимок для сравнения. Условные цвета C-G обозначают интенсивность зарегистрированного излучения. Его обнаружение само по себе не устанавливает функцию межклеточной оптической связи.

Kobayashi M., Kikuchi D., Okamura H. PLOS ONE. 2009;4:e6256. Рисунок 1 [18]. © 2009 Kobayashi et al. Creative Commons Attribution (CC BY). Без изменений.

Публикация и условия использования: doi.org/10.1371/journal.pone.0006256

4. Рассвет с орбиты

К разделам 5, 6 и 10



Восход Солнца над южной частью Индийского океана, снятый с Международной космической станции 29 сентября 2023 года. Вдоль горизонта видны освещённые слои атмосферы. Фотография возвращает к двум вопросам статьи: как устроен переход от темноты к свету и какой суточный режим следует создавать для человека в космосе.

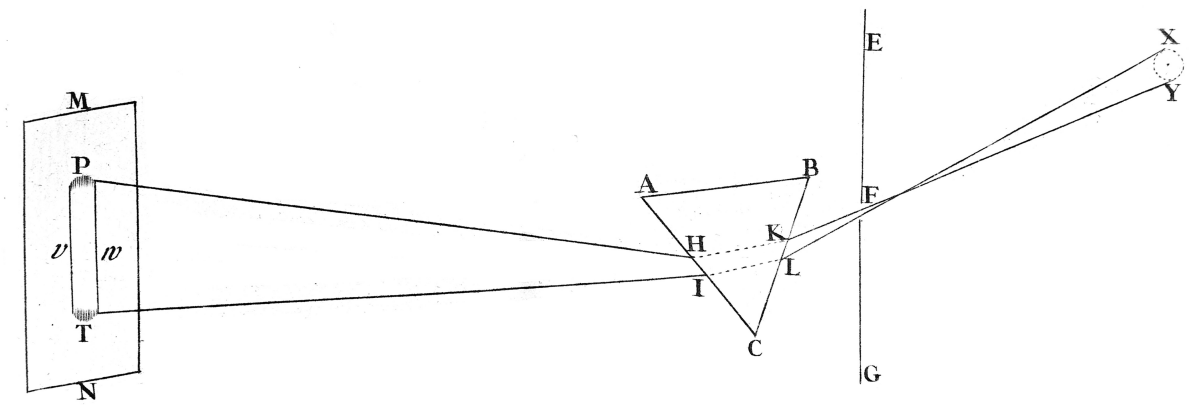
NASA / JSC, экипаж 70-й экспедиции МКС. Кадр ISS070-E-1178. Публикация NASA Earth Observatory: Sunrise from the Station. NASA сообщает о кадрировании, коррекции контраста и удалении артефактов объектива.

NASA Earth Observatory: фотография и описание

NASA: условия использования изображений

5. Ньютон: вопрос, поставленный в опыте

К разделу 7 о постановке научного вопроса



Историческая схема получения спектра при преломлении света в призме из третьего издания «Оптики» Исаака Ньютона, 1721 год. Рисунок показывает геометрию лучей, призму и экран. Он завершает подборку примером того, как вопрос о природе света получает конкретную экспериментальную постановку.

Isaac Newton. Opticks, 3rd edition, 1721. Цифровая репродукция: Wellcome Library, London / Wellcome Images. M0010896.

Wellcome Collection: запись изображения

Файл и описание репродукции · CC BY 4.0 · Без изменений.