

*А.В. Бармасов, А.М. Бармасова, Т.Ю. Яковлева*

## **БИОСФЕРА И ФИЗИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ. СВЕТОВОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

*A.V. Barmasov, A.M. Barmasova, T.Yu. Yakovleva*

## **THE BIOSPHERE AND THE PHYSICAL FACTORS. LIGHT POLLUTION OF THE ENVIRONMENT**

*В статье показана опасность светового загрязнения окружающей среды и его воздействие на биосферу и здоровье человека в особенности. Приведена краткая информация о фоторецепторах. Показана возможная связь между повсеместным переходом на источники света на основе люминофорных светодиодов, нарушением циркадного цикла, подавлением синтеза мелатонина и потенциальным ростом числа онкологических заболеваний. Указаны основные группы риска. Предложены способы решения проблемы.*

*Ключевые слова: световое загрязнение, фоторецепторы, родопсин, мелатонин, циркадный цикл, онкологические заболевания, люминофорные светодиоды.*

*The article illustrates the danger of light pollution and its impacts on the biosphere and human health in particular. Brief information on photoreceptors is cited. A possible link between the widespread adoption of light sources based on phosphor LEDs, violation of the circadian cycle, the suppression of the synthesis of melatonin and the potential growth of oncological diseases is shown. The main risk groups are specified. Ways to solve the problem are suggested.*

*Key words: light pollution, photoreceptors, rhodopsin, melatonin, circadian cycle, cancer, phosphor LEDs.*

Воздействие на биосферу взаимодействующих с ней физических факторов весьма обширно и проявляется практически через все составляющие известных на сегодняшний день фундаментальных взаимодействий макромира: гравитационного и электромагнитного. Влияние на биосферу проявлений гравитационного взаимодействия (например, шумового загрязнения окружающей среды) будет предметом следующих исследований, а сейчас остановимся на одном из проявлений электромагнитного воздействия.

Электромагнитное излучение (ЭМИ) можно условно разделить на три основные области спектра: радиоизлучение, световой диапазон (инфракрасное (ИК) излучение, видимый свет и ультрафиолетовое (УФ) излучение), а также рентгеновское и

гамма-излучения. Исследования влияния электромагнитных полей (ЭМП) на биосферу ведутся уже долгое время. Но если загрязнение окружающей среды в двух из указанных областей спектра (постоянные электрические и магнитные поля и ЭМП от сверхдлинных радиоволн до ИК диапазона, а также рентгеновские и гамма-лучи) исследуется и контролируется достаточно активно (см. [18] и цитированную там литературу), то световое загрязнение (*light pollution*) окружающей среды не столь очевидно и до последнего времени почти не учитывалось. Однако последние открытия в области фоторецепторов, ускоряющееся в настоящее время внедрение искусственного освещения, а также предполагаемый повсеместный переход на люминофорные светодиоды в качестве экономичных, относительно недорогих и на первый взгляд экологически безопасных источников искусственного освещения делает разработку заявленной темы чрезвычайно актуальной и целесообразной.

Факторы окружающей среды действуют на элементы биосферы по-разному. Одни из них обеспечивают им жизнь, другие — оказывают отрицательное воздействие, третьи могут быть безразличны для них. Поскольку биосфера исторически пронизана всеми видами физических полей (естественными гравитационными и электромагнитными полями), то отрицательное воздействие физических факторов на биосферу может быть связано только с существенным превышением значений этих факторов над естественными величинами, т. е. в основном с антропогенными факторами (факторами воздействия человеческой деятельности на природную среду).

Само наличие на поверхности Земли ЭМИ светового диапазона, полученного нашей планетой от Солнца, не только не сказывается отрицательно на биосфере, но, наоборот, без солнечного света («заботливо» отфильтрованного земной атмосферой) жизнь на Земле, если бы и существовала, то была бы такой же скудной, как в глубинах мирового океана, куда солнечный свет не проникает. В тех областях Земли, которые в среднем за год получают мало солнечного света, обычно встречается малое разнообразие биологических видов и низкорослая растительность. У значительной части живой природы свет вызывает изменение 24-часового биоритма («циркадного ритма»). Подробный анализ литературных данных по теме биологического воздействия видимого света на организм человека дан в работе [8]. Показано, что длительное световое голодание приводит к ослаблению иммунобиологической реактивности организма и к функциональным нарушениям нервной системы. Свет воздействует на психику и эмоциональное состояние человека. В пасмурные дни у многих людей возникает психическая депрессия. Экспериментально доказано, что подобную депрессию можно снять, если человека помещать на несколько часов в течение ряда дней подряд в ярко освещённую комнату [14].

Долгое время считалось, что в глазах человека присутствуют два типа фоторецепторов: палочки и колбочки, расположенные на сетчатке глаза. Палочки более активны при тусклом освещении, в то время как колбочки более активны в условиях хорошей освещённости. Животные, ведущие ночной образ жизни, имеют гораздо больше зрительных палочек. Палочки расположены в окрашенном слое, содержат родопсин. Единственная фотохимическая реакция в зрительном акте — это цис-транс изомеризация хромофорной группы родопсина — 11-цис-ретинала. Самый первый продукт после фотоизомеризации — фотородопсин образуется с уникально высокой

скоростью – примерно за 200 фс [12]. Изучение строения и функционирования рецепторов, сопряжённых с G-белком (G protein-coupled receptors, GPCRs), является одной из важнейших задач современных биохимии и биофизики, поскольку они регулируют множество важнейших функций организма, и более трети лекарств, разрабатываемых в настоящее время, направлены на лечение заболеваний, связанных с нарушениями работы данных белков [47]. Родопсин – наиболее исследованный белок из семейства GPCR-рецепторов, и закономерности, полученные для него, могут быть использованы для изучения структуры и функциональных особенностей других рецепторов этого семейства [10, 16]. Однако структура большинства GPCRs на сегодня неизвестна. Впрочем, бурное развитие методов твердотельного ядерного магнитного резонанса (ЯМР) и экспрессии белков [46] позволяет рассчитывать на существенный прогресс в этой области уже в ближайшее время [17].

Ещё один фотозависимый белок – церулоплазмин – медь-содержащий белок (гликопротеин), присутствующий в плазме крови [20, 21, 22]. Врождённый дефицит церулоплазмينا приводит к дефектам развития головного мозга и печени. В мозге человека белок производится определёнными популяциями глиальных клеток, связанных с микрососудами, а в сетчатке глаза – клетками внутреннего нуклеарного слоя [33].

Солнце – основной источник энергии для всех процессов, совершающихся на Земле. Без солнечного света был бы невозможен фотосинтез – сложный цикл фотохимических и темновых реакций синтеза органических веществ из углекислого газа и воды [4]. Одним из продуктов фотосинтеза является кислород [4, 42]. Таким образом, фотосинтез обеспечивает возможность существования большинства видов жизни на Земле. Животные существуют за счёт растений, которые преобразуют энергию Солнца в энергию химических соединений и кислород [27]. ИК излучение является носителем тепловой энергии. УФ излучение – обязательное условие нормальной жизнедеятельности человека. Оно обладает бактерицидным действием, нормализует обмен минеральных веществ, активирует кортико-адреналовую систему, повышает стойкость организма к различным заболеваниям. При недостатке УФ облучения нарушается фосфорно-кальциевый обмен, увеличивается чувствительность организма к инфекционным заболеваниям и к простуде (дети, получавшие достаточное количество УФ света, в 10 раз менее подвержены простудным заболеваниям, чем дети, не получавшие достаточного количества УФ облучения), возникают функциональные расстройства центральной нервной системы, обостряются некоторые хронические заболевания, снижается общая физиологическая активность, а следовательно, и работоспособность человека. Под действием УФ света в коже человека вырабатывается витамин D (или естественная форма витамина D – витамин D<sub>3</sub>). Самой важной функцией витамина D является регулирование метаболизма кальция и фосфатов, что способствует правильной минерализации костей и росту скелета. Поэтому витамин D препятствует вымыванию кальция из костей и зубов, защищает сердце и сосуды и предотвращает появление некоторых раковых заболеваний. При недостатке витамина D возникает серьёзное заболевание – рахит. Благодаря витамину D в коже происходит равномерное распределение меланина, и она получает ровный оттенок загара. Солнечный свет может помочь при лечении кожных заболеваний путём активизации иммунной системы в поверхностных слоях кожи. Под действием солнечного света определённые клетки

кожи переводят витамин D<sub>3</sub> в активную форму. Это вызывает миграцию Т-клеток иммунной системы, которые разрушают инфицированные клетки и регулируют другие иммунные процессы. Солнечное излучение стимулирует выработку эндорфинов, поэтому солнечный свет – лучший природный антидепрессант.

Однако «и саго, употреблённое не в меру, может причинить вред» [15]. В естественной природе всё оптимально сбалансировано: солнечные дни чередуются с тёмными ночами, когда фотозависимые процессы могут приостановиться в пользу темновых процессов.

С развитием цивилизации, а особенно с развитием электричества и созданием в XIX–XX вв. искусственных источников света в различных диапазонах длин волн (ведь миллионы лет единственным источником, например, УФ света было Солнце, да и то поверхности Земли достигал только свет ближнего (самого безопасного) УФ диапазона). Если в первые годы интенсивность искусственного света была весьма незначительна, то в последние годы приходится уже говорить о световом загрязнении окружающей среды, влияющем на устоявшуюся экосистему и имеющем многочисленные последствия.

В «ГОСТ 30772-2001. Межгосударственный стандарт. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Термины и определения» (введён Постановлением Госстандарта России от 28.12.2001 № 607-ст) в п. 6.10 дано следующее определение светового загрязнения: «Форма физического загрязнения окружающей среды, связанная с периодическим или продолжительным превышением уровня естественной освещённости местности, в том числе и за счёт использования источников искусственного освещения».

Основными источниками светового загрязнения являются крупные мегаполисы. Световое загрязнение создаётся в первую очередь уличным освещением и рекламными щитами. Значительная часть излучаемого света отражается вверх, что создаёт над городами так называемые «световые купола», достигающие высоты 60 км. Эффект осветления неба усиливается распространёнными в воздухе частицами пыли (аэрозолями), дополнительно преломляющими, отражающими и рассеивающими излучаемый свет (здесь световое загрязнение дополняется традиционным загрязнением атмосферы, которое также наиболее значительно в районах мегаполисов) [11]. В результате световое загрязнение получило и другое название – «световой смог». И масштабы светового загрязнения окружающей среды уже таковы, что не учитывать его больше нельзя. В густонаселённой Европе около половины населения так или иначе регулярно сталкивается со световым загрязнением, а ежегодный рост светового загрязнения в Европе достигает 6–12 %. Как уверяют специалисты, из-за световых куполов над городами две трети жителей Земли никогда не видели настоящего тёмного неба (в Европе и в США таких жителей ещё больше). Каждый пятый землянин (среди европейцев – каждый второй) не может наблюдать Млечный путь. В целом световые купола создают большую проблему для астрономических наблюдений (фоновые засветки неба приводят к увеличению шумов в регистрирующей аппаратуре телескопов). Так, сплошная жилищная и общественно-деловая застройка территорий вокруг обсерватории, строительство нового терминала аэропорта «Пулково» существенно затруднили работу Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук, расположенной всего в 19 км к югу от центра Санкт-Петербурга. Пулковская

обсерватория была основана в 1839 г., место для её строительства выбиралось долго и тщательно, а охранная зона, установленная вокруг обсерватории после её открытия, способствовала сохранению астроклимата. В 1966–1976 гг. Уокер вёл измерения световой засветки в зависимости от расстояния до населённых пунктов в Калифорнии. В результате им была получена эмпирическая зависимость, позволяющая оценить влияние засветки от города и определить минимальное расстояние от обсерватории до города, при котором городское освещение создаёт добавочную яркость неба не более 10 % в зените и не более 20 % на высоте 45° [9]. В случае Пулковской обсерватории фоновые засветки возросли за последние 10–15 лет почти в 5 раз и привели к потере двух звёздных величин при фотографических наблюдениях (с 17-й до 15-й звездной величины), в 1,5 раза возросли среднеквадратические ошибки в определении положений планет [2]. В 2006 г. было предложено перебазировать Пулковскую обсерваторию в более благоприятные районы, например, на Кольский полуостров «в связи с увеличением антропогенного влияния» и всё ухудшающимися условиями для астрономических наблюдений «по причинам урбанистического характера». Однако это, вероятно, одно из самых безобидных последствий светового загрязнения окружающей среды.

Другим последствием чрезмерного использования искусственного света является перерасход энергии. Считается, что только 40 % света от обычных уличных светильников освещает то, что они должны освещать, 10 % представляет собой излишне яркий свет, а 50 % – не просто бесполезное, но и вредное световое загрязнение. Образовавшаяся в 1998 г. в США некоммерческая организация «Международная ассоциация тёмного неба» (International Dark-Sky Association, IDA) утверждает, что на ночное освещение по всему миру ежегодно тратится свыше 1,5 млрд долл США, а также вырабатывается более чем 12 млн т диоксида углерода, что усиливает так называемый «парниковый эффект» (оставим за скобками сейчас дискуссию о самом факте так называемого «глобального потепления», связанного с увеличением концентрации парниковых газов). Это последствие светового загрязнения окружающей среды уже более серьёзное, но и оно далеко не самое главное.

Наиболее важным всё-таки стоит считать влияние светового загрязнения именно на биосферу. Световое загрязнение отрицательно влияет на растительный мир. Так, деревья, находящиеся рядом с искусственными источниками освещения, не чувствуют приближения зимы по сокращению продолжительности светового дня, оказываются физиологически не готовыми к холодам и могут вымерзнуть. Увеличение периода фотосинтеза, вызванного применением искусственного света, ведёт к неестественному росту растений и смещению фазы цветения.

Организм человека и большинства животных исторически сформировался под воздействием циркадного ритма с активной дневной фазой и фазой отдыха ночью. Свет синхронизирует повторяемость этого биоритма. Вся жизнедеятельность животных периодична. Внешними факторами, регулирующими ритмы, являются суточные и годовые колебания интенсивности света, температуры, уровня шумов и др. Периодичность освещения, соотношения длительности дня и ночи являются важными синхронизаторами суточных и годовых ритмов жизнедеятельности организмов. Световые сигналы регулируют внутренние часы независимо от фоторецепторов. Рецепторы света при фотопериодической регуляции существенно отличаются у разных животных. Так,

у птиц — это средняя часть мозга. У рыб, амфибий, рептилий — эпифиз. У млекопитающих — в глазах. Г. Ван Ден Бельд утверждает, что действие видимого света зависит от уровня освещённости, спектральной чувствительности, продолжительности и времени суток [6]. Уровень освещённости порядка 1000–2000 лк на глаз в течение 3 ч может привести к фазовому сдвигу от 2 до 4 ч в зависимости от времени суток (минимальное требование к освещённости супермаркета — 500 лк, а освещённость при студийной фотосъёмке может достигать 10000 лк и более).

Искусственный свет в ночное время полностью меняет среду обитания всех ночных существ и ведёт к гибели птиц, земноводных, насекомых и млекопитающих, ведущих ночной образ жизни. Распространённые источники белого света с преобладанием в спектре голубого цвета мешают ориентации многих видов насекомых, а также сбивают с пути перелётных птиц.

Известно, что бабочки и многие насекомые летят к источникам света (тончайшее восприятие света насекомыми делает их зависимыми даже от фазы Луны). Если они и не гибнут при столкновении с искусственным источником света, они всё равно расходуют энергию в бессмысленном полёте. Согласно наблюдениям, каждый уличный светильник ежедневно является причиной гибели 150 насекомых. С учётом числа светильников в одной только Германии каждую ночь от них погибает более миллиарда насекомых. При этом не учтены многие другие источники света (такие как освещение жилых домов, промышленных комплексов, светящаяся реклама). Австрийские учёные посчитали, что одна световая реклама средних размеров за год убивает 350 тыс. насекомых [40]. Кроме того, многие виды, дезориентированные ночным освещением, не способны вести себя адекватно — добывать пищу и воспроизводиться, что тоже сокращает их численность, а следовательно, и численность тех, кто ими питается, параллельно нарушая ритмы и объёмы опыления. Даже малейший перекокс в экосистеме ведёт к колебанию всей цепочки: порванное звено нарушает целостность всей системы. Даже если насекомые не гибнут, притягиваясь к источнику света, они расходуют свою энергию в бессмысленном полёте, теряя время и силы для продолжения потомства.

Вторая группа существ, которые оказались в опасности из-за светового загрязнения: жабы, лягушки и морские черепахи. Взрослая черепаха откладывает яйца раз в 2 года. Она плывёт вдоль побережья, разыскивая безопасный пляж. Безопасный для черепах — это значит тёмный. Черепаха выходит на тёмный берег, вырывает ямку и кладёт туда яйца. Если она такого берега не находит, она выбрасывает все яйца в воду. Маленькие морские черепашки, которые всё-таки вылупляются в песке на берегу, в обычных условиях ползут ночью в воду, ориентируясь по отражённому водой свету Луны и звёзд — ночью берег темнее воды. Теперь очень часто черепашки ползут в сторону более светлого берега и освещённых автострад, т.е. в противоположном от воды направлении и гибнут от колёс автомобилей, обезвоживания или голода. Небезразличные люди даже организовались в службу Sea Turtle Oversight Protection, помогающую черепашкам.

Лягушки в большинстве своём являются существами, ведущими ночной образ жизни — именно ночью они охотятся, размножаются и питаются. Приблизительно 3500 разновидностей лягушек живут в земной, водной или древесной среде, и каждая особь обладает разнообразием способов визуальной адаптации к этим видам среды

обитания. Увеличение распространённости ночных источников освещения влечёт за собой как положительные последствия для лягушек, так и отрицательные. Около источников света много насекомых, которыми лягушки питаются. Но с другой стороны, свет привлекает в поисках пищи и тех, кто питается самими лягушками, ведь они становятся видны в ночи. Некоторые разновидности жаб, которые могут размножаться только в крошечной тьме, перестают это делать совсем.

Вредит световое загрязнение и млекопитающим, ведущим ночной образ жизни. На границе американского штата Техас с Мексикой установлены прожекторы, освещающие приграничную зону. Яркий свет прожекторов, установленных на протяжении всей границы, сделал практически непригодной среду обитания оцелотов – маленьких диких котов – ночных хищников. Особи, ведущие ночной образ жизни, вынуждены, скрываясь от искусственного ночного освещения, нарушать свой естественный природный ритм.

В швейцарских Альпах стала искусственно освещаться долина Bagnes (кантон Valais). И одна из популяций летучих мышей почти исчезла в этой местности. До иллюминации там доминировала Mehely's Horseshoe Bat (*Rhinolophus mehelyi*), а освещение просто уничтожило их, и остались только нетопыри.

В «зоне повышенного риска» оказались ночные саламандры, некоторые виды рыб (например, лосось, сельдь, пескарь и многие другие). Излишнее освещение водоёмов приводит к цветению воды – развитию фитопланктона. Как следствие – истощение запаса кислорода и омертвление водоёмов.

Ещё одна группа существ, гибнущих от света чаще других, – птицы. Механизм ориентации перелётных птиц до конца не изучен. Вероятно, он включает в себя целый комплекс ориентиров – и магнитное поле Земли, и природные ориентиры, и созвездия. Теперь же световые купола мегаполисов сбивают систему птичьей навигации. Стаи резко меняют курс и направляются к светящимся высотным зданиям, башням, маякам и ярко освещённым судам. Орнитологи считают, что ослеплённые птицы перестают замечать препятствия на своём пути и на скорости 75–120 км·ч<sup>-1</sup> врезаются в препятствия. Ежегодно только в США гибнет около 4 млн мигрирующих птиц при столкновении с освещёнными телевизионными и радиовышками. 7 октября 1954 г. около 50 тыс. птиц, привлечённых светом маяка на американской военно-воздушной базе, погибли, разбившись о землю. В 1981 г. более 10 тыс. птиц врезались в освещённую прожекторами дымовую трубу электростанции на озере Онтарио. Осенью 1996 г. в Марбурге (Германия) световая реклама ночной дискотеки привела к тому, что сбитая с курса стая летящих на юг журавлей несколько часов кружила вокруг неё, а потом, обессиленная, опустилась на город, жители которого потом находили сотни мёртвых или покалеченных птиц. Лишь один чикагский небоскрёб Willis Tower (бывший Sears Tower) высотой 443,2 м (110 этажей), ежегодно уносит жизни около 1500 мигрирующих птиц.

Городские птицы также страдают от искусственного освещения. В 2010 г. в британском научном журнале *Current Biology* группой учёных из немецкого Института орнитологии им. Макса Планка (Max Planck Institute for Ornithology) были опубликованы результаты изучения влияния искусственного ночного освещения на утреннее «брачное» пение пяти видов лесных певчих птиц [32]. У четырёх из пяти видов самцы в

условиях уличного освещения начинали петь значительно раньше, чем самцы в неосвещённых частях леса. Самки возле уличных фонарей отложили свои яйца в среднем на день раньше, а самцы рядом с фонарями были более успешными в привлечении самок, что хорошо для конкретных самцов, но совсем нехорошо для всего вида. «Раньше пение во время утренней зари говорило о качествах самцов, поскольку им приходилось меньше отдыхать, подвергаться опасности погибнуть в когтях хищника, — поясняется в комментарии к статье. — Кроме того самка спаривалась с несколькими партнёрами, что повышало уровень потомства. Теперь же связь между ранним пением и качествами самца утрачена, и это может привести к вырождению самцов».

Последние исследования показали, что световое загрязнение может иметь самые серьёзные последствия и для здоровья человека [13]. Этот факт указывает на необходимость учёта мощности излучения и спектра ламп при оценке условий освещения [8]. Рассмотрим воздействие искусственного освещения на здоровье человека подробнее.

Вредное действие синего света на сетчатку глаза было впервые доказано в многочисленных исследованиях на животных. Воздействуя на обезьян большими дозами синего света, исследователи Ronald S. Harwerth и H. Sperelung ещё в 1971 г. установили, что это приводит к продолжительной утрате спектральной чувствительности в синем диапазоне, возникающей из-за повреждений сетчатки [30]. В 1980-е гг. эти результаты были подтверждены другими учёными, которые обнаружили, что воздействие синим светом приводит к образованию фотохимических повреждений сетчатки, в особенности, её пигментного эпителия и фоторецепторов. В 1988 г. в опытах на приматах Young установил взаимосвязь между спектральным составом излучения и риском возникновения повреждений сетчатки. Он подтвердил логичное предположение, что достигающие сетчатки различные компоненты спектра излучения опасны в разной степени, а риск поражения экспоненциально возрастает с увеличением энергии фотонов. При воздействии на глаза светом диапазона от ближней ИК области до середины видимого спектра повреждающие эффекты были незначительными и слабо зависели от времени облучения. Но при достижении длины волны светового излучения 510 нм было обнаружено резкое увеличение повреждающего воздействия. Был сделан вывод, что при прочих равных условиях синий свет в 15 раз более опасен для сетчатки, чем все другие диапазоны видимого спектра вместе взятые. Эти данные были подтверждены другими экспериментальными исследованиями, в том числе исследованием Remé, в котором было показано, что при облучении глаз крыс зелёным светом не было обнаружено апоптоза или других вызванных светом повреждений, при этом наблюдалась массовая апоптотическая гибель клеток после облучения синим светом. В исследованиях также было показано, что изменение тканей после длительного воздействия ярким светом было таким же, какое связывают с симптомами возрастной дегенерации макулы (ВДМ).

Для установления чёткой корреляции между действием синего света и ВДМ были проведены широкомасштабные эпидемиологические исследования. В 2004 г. в США были опубликованы первые результаты начавшегося ещё в 1987 г. исследования The Beaver Dam Study, в котором в течение 5–10 лет проводились наблюдения над 6 тыс. человек. Окончательно исследование завершилось в 2010 г. Результаты исследования показали, что у людей, которые летом подвергаются воздействию солнечного света



более 2 ч в день, риск развития ВДМ в 2 раза выше, чем у тех, кто проводит летом на солнце менее 2 ч. При этом не было выявлено однозначной взаимосвязи между длительностью солнечного облучения и частотой обнаружения ВДМ. Был сделан вывод, что вредное действие солнечного света, проявляющееся в риске возникновения ВДМ, связано, скорее, с видимой, а не УФ составляющей солнечного света. Последующие исследования также не обнаружили взаимосвязи между ВДМ и УФ диапазоном, но была установлена взаимосвязь между ВДМ и воздействием на глаза синего света. В настоящее время повреждающее воздействие синего света на фоторецепторы и пигментный эпителий сетчатки доказано. Синий свет вызывает фотохимическую реакцию с выделением свободных радикалов, которые оказывают повреждающее воздействие на фоторецепторы – колбочки и палочки. Образующиеся вследствие фотохимической реакции продукты метаболизма не могут быть нормально утилизированы эпителием сетчатки, накапливаются и вызывают её дегенерацию. Меланин – пигмент, обуславливающий цвет глаз, защищает сетчатку и препятствует её повреждению. Люди со светлой кожей и голубыми или светлоокрашенными глазами потенциально более подвержены развитию ВДМ, так как у них меньшая концентрация меланина. Голубые глаза пропускают во внутренние структуры в 100 раз больше света, чем глаза тёмной окраски. Интересно, что голубые глаза – некая «ошибка природы» – результат совсем недавней мутации (от 6 до 10 тыс. лет назад). Профессору Hans Eiberg из Department of Cellular and Molecular Medicine at the University of Copenhagen, начавшему исследование в 1996 г., удалось идентифицировать ген OCA2, который в указанный отрезок времени мутировал у одного человека [28]. Таким образом, изначально природой не предполагалась высокая чувствительность глаза человека к синей области спектра. Но случайная мутация нарушила этот защитный механизм. Впрочем, есть ещё большая «зона риска» – дети. Дело в том, что чувствительность глаза человека к синей области спектра существенно снижается с возрастом. Для профилактики развития ВДМ рекомендуется применять очки с линзами, отсекающими синюю область видимого спектра.

На самочувствие человека, по некоторым исследованиям, оказывает влияние освещённость уже более 1000 лк (солнечные лучи в полдень на средних широтах создают освещённость порядка 100000 лк, 1000 лк – это освещённость на открытом месте в пасмурный день), причём и цветовой диапазон также имеет значение [39]. В 2002 г. David Verson обнаружил в сетчатке млекопитающих новый тип фоторецепторов, который отвечает за биологическое воздействие света [23]. Чувствительность нового фоторецептора неодинакова к свету различных длин волн. В работе [25] показано, что оптическое излучение в диапазоне 430–470 нм оказывает прямое воздействие на образование в организме человека мелатонина. Хотя действие мелатонина в организме не вполне ясно, опыты на животных дают основания полагать, что он усиливает функции таких стимулирующих жизнедеятельность организма эндокринных желез, как гипофиз, надпочечники, половые железы и поджелудочная железа. Кроме того, мелатонин участвует в регуляции кровяного давления, функций пищеварительного тракта, работы клеток головного мозга. Этот важнейший гормон, исполняющий антиоксидантную и иммуномодуляторную функции, может вырабатываться только в темноте. У взрослого человека в норме за сутки синтезируется около 30 мкг мелатонина, его концентрация в сыворотке крови ночью в 30 раз больше, чем днём, причём

пик активности приходится на 2 ч ночи, уже к 9 ч утра его содержание в крови падает до минимальных значений – у человека на ночные часы приходится 70 % суточной продукции мелатонина. Эксперименты на лабораторных животных показали [1], что при недостатке мелатонина, вызванном удалением рецепторов, животные начинали быстрее стареть: раньше начиналась менопауза, накапливались свободнорадикальные повреждения клеток, снижалась чувствительность к инсулину, развивались ожирение и рак. Исследования показали, что, возможно, новый фоторецептор, реагирующий на синий (голубой) свет, сигнализирует организму о наступлении дня или ночи, лета или зимы. Повышение и снижение показателей мелатонина регулируется количеством света, который захватывают наши глаза (сильнее всего выработка мелатонина подавляется светом с длиной волны 450–480 нм) и передают в шишковидную железу (эпифиз). Когда темнеет, выработка мелатонина в эпифизе увеличивается. Яркое освещение тормозит синтез мелатонина. Синий свет сдвигает в сторону дня стрелку биологических часов в среднем на три часа, а зелёный – только на полтора, и эффект синего света держится дольше. Поэтому синий искусственный свет становится угрожающе опасным в ночное время [5]. Нарушение синтеза мелатонина как количественно, так и по ритму является пусковым механизмом, приводящим на начальных этапах к возникновению десинхроза, за которым следует возникновение органической патологии.

Еще в 1964 г. немецкий ветеринарный врач Wolfgang Jöchle установил, что мыши, содержащиеся при круглосуточном освещении, гораздо чаще болели раком молочной железы и умирали от него, чем животные, находившиеся при обычном световом режиме. В СССР первое научное исследование о связи рака и постоянного освещения было проведено в 1966 г. в Институте экспериментальной патологии и терапии рака АМН СССР (Российский онкологический научный центр им. Н.Н. Блохина РАМН). В результате было обнаружено, что через 7 месяцев после начала воздействия постоянного освещения у 78–88 % самок крыс развились гиперпластические процессы в молочной железе и мастопатии. В 2005 г. на научной конференции «Световой режим, старение и рак» в г. Кондопога учёные из Петрозаводского государственного университета доложили о результатах исследований, связанных с изменением светового режима. При содержании в условиях постоянного освещения до 18 месяцев доживало чуть больше половины самок крыс, при этом у 30 % были обнаружены спонтанные опухоли. Среди животных, содержащихся при стандартном световом режиме, до 18 месяцев доживали почти 90 % самок крыс, а опухоли были выявлены только у 16 %. Таким образом, можно утверждать, что опыты с грызунами убедительно свидетельствуют об ингибирующем действии световой депривации на канцерогенез молочной железы.

Эпидемиологические данные также подтверждают такой вывод. Американский эпидемиолог Richard G. Stevens из U.S. Department of Energy's Pacific Northwest National Laboratory обнаружил связь между раком молочной железы и световым загрязнением в конце 1980-х гг., когда установил, что вероятность развития рака молочной железы была значительно выше в промышленно развитых странах, где ночное освещение более интенсивно, чем в развивающихся регионах. При этом заболевания работниц ночных смен были в 2 раза выше [43]. William Hrushesky из Dorn Veterans Affairs Medical Center, Южная Каролина (США) тоже обнаружил, что женщины, работающие в ночную смену,

больше заболели раком молочной железы, чем другие работающие женщины. Он также установил, что у слепых женщин концентрации мелатонина выше, а показатели рака молочной железы необычно низкие. Американский эпидемиолог R. Khan в 1991 г. сообщил о результатах анализа свыше ста тысяч выписных эпикризов, опубликованных в Национальном госпитальном регистре. Риск развития рака молочной железы оказался в 2 раза меньшим у первично слепых женщин по сравнению со зрячими. В ряде исследований, выполненных в последние годы учёными Швеции и Финляндии, было обнаружено существенное снижение риска всех видов рака среди слепых. В 1999 г. в работе [24] прямо указывалось на связь между воздействием электромагнитного поля и света на мелатонин и риском возникновения рака молочной железы (табл. 1).

Таблица 1.

Световой режим и риск рака молочной железы у женщин [Davis, 2001]

| Особенности образа жизни  | Риск рака молочной железы |
|---------------------------|---------------------------|
| Бессонница по ночам       |                           |
| 1 раз в неделю            | 1,14 (1,01÷1,28)          |
| 3 раза в неделю           | 1,4 (1,0÷2,0)             |
| > 4 раз в неделю          | 2,3 (1,2÷4,2)             |
| Яркое освещение в спальне | 1,4 (0,8÷2,6)             |
| Работа в ночную смену     | 1,6 (1,0÷2,5)             |

Для снижения риска рака молочной железы с учётом светового загрязнения окружающей среды, учёные рекомендуют спать в тёмной комнате, лишённой как интерьерного (экран компьютера), так и внешнего (уличные фонари) света, не менее 9 ч в сутки. Согласно исследованиям 12 тыс. финских женщин, большие риски заболеть имели те, кто спал только 7 или 8 ч. Даже яркий свет в туалетной комнате способен спровоцировать появление злокачественных опухолей молочной железы у женщин. Некоторые исследователи утверждают, что двух часов чтения с компьютерного экрана при максимальной яркости достаточно, чтобы подавить нормальную выработку ночного мелатонина. А если читать с яркого экрана в течение многих лет, то это может привести к нарушению циркадного ритма. В настоящее время предлагаются специальные компьютерные программы, делающие свечение экрана адаптированным к времени суток. Свечение монитора плавно меняется от холодного днём к тёплому ночью, и работать за монитором в любое время суток становится значительно комфортнее.

Были также изучены люди, работающие в условиях большой освещённости. Выявленные у них повышенное кровяное давление, частые головные боли, тенденции к беспокойству — всё это связывают именно со световым загрязнением. Многие исследования последних лет находили связь между работой в ночную смену и воздействием искусственного света на возникновение или обострение у наблюдаемых работников болезней сердца, сахарного диабета, ожирения, а также рака предстательной железы. Исследователи из Гарварда, пытаясь пролить свет на связь циркадного цикла с диабетом и ожирением, провели эксперимент среди 10 участников. Им постоянно смещали

с помощью света сроки их циркадного цикла. В результате уровень сахара в крови значительно возрос, вызвав преддиабетное состояние, а уровень гормона лептина, отвечающего за чувство сытости после еды, напротив, понизился.

В последнее время число исследований, посвящённых негативному влиянию светового загрязнения окружающей среды на биосферу, существенно возросло (см., например, [41, 36, 38, 45, 37, 29, 44]). В 2008–2009 гг. исследователи из University of Haifa (Израиль) при участии профессора Richard G. Stevens из University of Connecticut (США) сопоставили данные Международного агентства по исследованию рака по заболеваемости раком предстательной железы в 164 странах мира с уровнями ночного освещения в этих странах, определёнными по спутниковым снимкам [34, 35]. Оказалось, что в странах с низким уровнем ночного освещения раком предстательной железы болеет 66,77 человек из 100 тысяч. При средней ночной освещённости заболеваемость возрастает на 30 % (87,11 случаев на 100 тыс. человек), а при высокой – на 80 % и составляет 157 случаев на 100 тыс. человек.

Исследования, проведённые в University of Haifa, также подтвердили, что освещение в ночное время вредит не только человеку, но и нарушает циркадные ритмы у животных и растений. Результаты исследований показывают, что коротковолновый свет синих светодиодов негативно влияет на лабораторных животных. Так, у крыс и слепышей он вызывает нарушение метаболизма, производства гормонов и повышенный риск развития опухолей. К похожим выводам пришли исследователи из Ohio University (США), проводившие опыты на хомячках. Они выяснили, что даже тусклый свет в ночное время способен вызвать у зверьков депрессивное поведение [31]. Учёные считают, что синий свет смартфонов, компьютеров и телевизоров может оказывать такой же эффект на человека. Особенно страдают от этого воздействия жители развитых стран, которые постоянно используют подобные приборы. Специалисты рекомендуют для сна использовать плотные шторы, надевать тёмную маску на глаза, чтобы защититься от уличного освещения, а также советуют отказаться от телевизора и компьютера в спальне. Специалисты НИИ онкологии им. Н.Н. Петрова в Санкт-Петербурге уже несколько лет изучают влияние светового загрязнения на здоровье людей и пришли к выводу, что постоянный яркий свет подавляет активность ферментов, которые помогают превратить гормон бодрости серотонин в гормон сна – мелатонин. Чем интенсивнее ночной свет, тем больше он угнетает синтез мелатонина, причём голубое освещение действует сильнее, чем обычное. Обнаружено, что женщины более чувствительны к действию ночного освещения, чем мужчины. Световое загрязнение у них не только увеличивает риск развития рака молочной железы и толстой кишки, но и вызывает преждевременное старение репродуктивной системы.

Итак, чем опасно световое загрязнение для человека? Постоянное освещение вызывает: увеличение вероятности различных онкологических заболеваний, угнетение синтеза и секреции мелатонина, увеличение синтеза и секреции пролактина, увеличение порога чувствительности гипоталамуса к торможению эстрогенами, индукцию ановуляции (нарушения менструального цикла, при котором отсутствует овуляция) и кист яичника, стимуляцию пролиферативных процессов и рака молочной железы и эндометрии, усиление образования активных форм кислорода, стимуляцию атеросклероза.

А каковы пути решения этой проблемы? Невозможно и не нужно отказываться от ночного освещения городов вообще, но следует сделать его более рациональным. Для этого обычно предлагаются вполне осуществимые меры: минимальное освещение закрытых на ночь заведений, грамотное распределение светового потока подсветки зданий, памятников архитектуры и ландшафта, использование оборудования с «правильной» оптикой, позволяющей точно направлять световой поток. Подсветка должна быть фрагментарной и никогда не направляться в небо. Что касается световой рекламы, то она должна быть разумно ограничена.

Первой европейской страной, в которой к проблеме светового загрязнения подошли на законодательном уровне, стала Словения, в 2007 г. принявшая закон, запрещающий направлять свет прожекторов в небо. По словам астронома-любителя Andrej Mohar, который лоббировал введение новых правил освещения, после этого ночное небо над Люблянкой стало почти на 20 % темнее. В США федеральное Агентство по защите окружающей среды (United States Environmental Protection Agency) разработало программу, цель которой резко снизить потребление энергии на освещение. Здесь также создаются общественные центры по борьбе с лишним освещением. Кроме того, в США была принята программа по защите мигрирующих птиц, согласно которой запрещается включать ночную фасадную подсветку высотных зданий на время перелёта птиц. В Toronto (Канада) эти правила действуют с 1996 г. Помимо привлечения внимания общественности к проблеме светового загрязнения в городах, IDA пропагандирует сведение к минимуму ночного освещения заповедников. Начиная с 2006 г. уровень ночного освещения контролируется почти в 20 заповедных зонах (включая заповедник на юго-востоке Намибии The NamibRand Nature Reserve с 2012 г.). В Европе наибольшее число зон «Тёмного неба» расположено в Великобритании и Венгрии. Так, в Великобритании в зону «Тёмного неба» входят Galloway Forest Park в Шотландии (с ноября 2009 г.), Exmoor National Park в Англии (с 2011 г.) и др. Постановление Правительства Москвы «О Концепции единой светоцветовой среды города Москвы» вышло ещё 11 ноября 2008 г., однако и в Москве, и в других российских мегаполисах борьба со световым загрязнением окружающей среды практически отсутствует. При этом очевидно, что роль муниципальных образований в обеспечении системы экологической безопасности территорий достаточно велика [19]. Но не следует преуменьшать и роль формирования экологического правосознания молодых специалистов и иных категорий граждан в РФ [7] (опыт неправительственных организаций типа IDA это подтверждает).

Целью исследования, проведённого астрономами, физиками и биологами из итальянского Научно-технологического института светового загрязнения, Национального центра геофизических данных (Колорадо, США) и израильского Univeristy of Haifa, было изучение вклада различных типов ламп в световое загрязнение, а также влияния испускаемого ими света на синтез мелатонина. Сравнение влияния света, испускаемого лампами разных типов, показало, что белый свет галогенных ламп (рис. 1), часто используемых помимо прочего для освещения стадионов, подавляет синтез мелатонина более чем в 3 раза сильнее, чем жёлтый свет натриевых ламп высокого давления (рис. 2). Однако наиболее опасными оказались светодиодные лампы, испускающие свет с длиной волны 440–500 нм (рис. 3). Такой свет подавляет синтез мелатонина в 5 раз сильнее, чем свет натриевых ламп высокого давления.

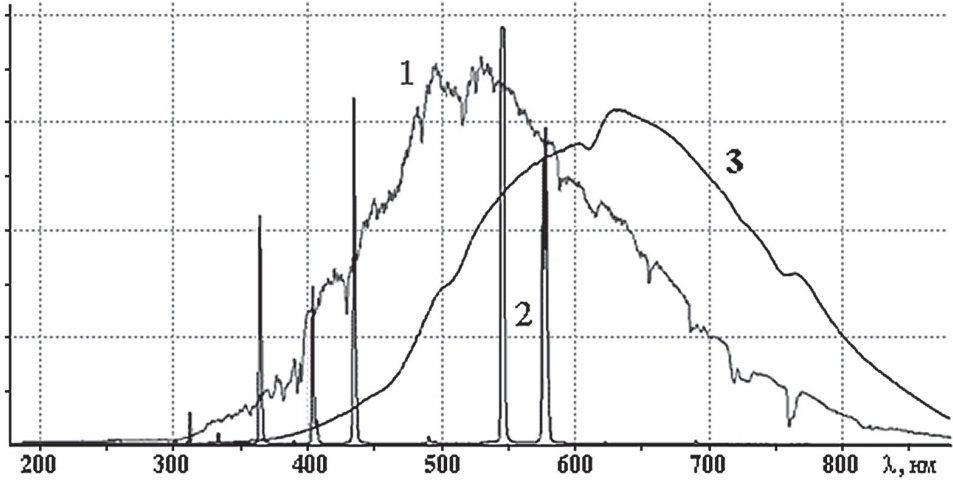


Рис. 1. Спектры испускания: 1 – Солнца (14.00 20 июня 2005 г., Бристоль, Великобритания); 2 – ртутной лампы (ReptileUV Zoo MegaRay); 3 – галогенной лампы (GE 50w MR-16-GU10).

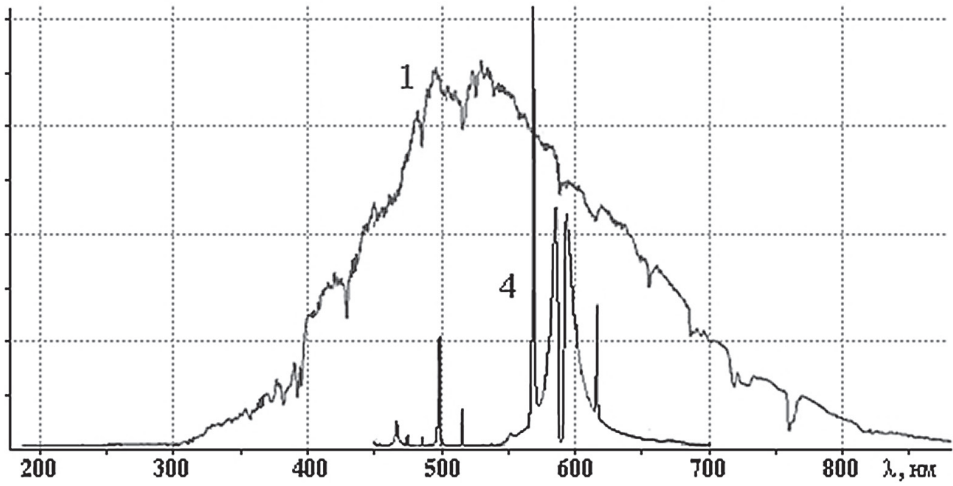


Рис. 2. Спектры испускания: 1 – Солнца (14.00 20 июня 2005 г., Бристоль, Великобритания); 4 – натриевой лампы высокого давления.

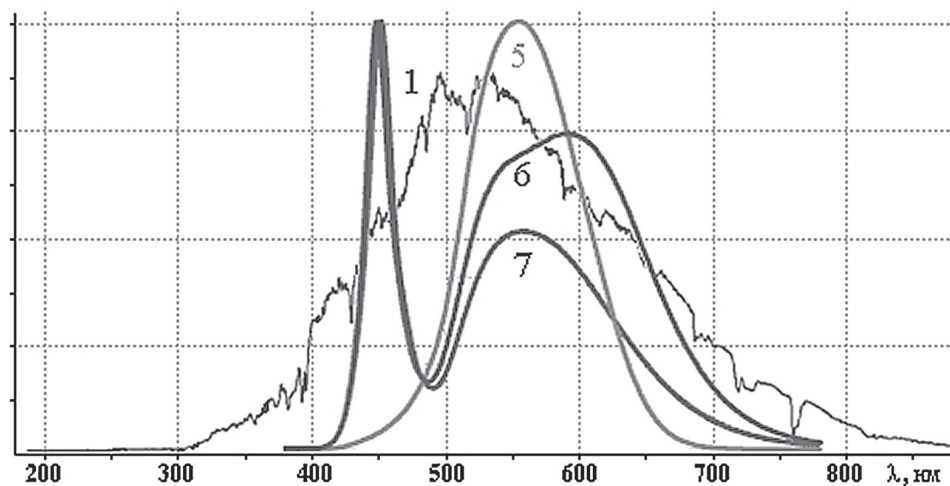


Рис. 3. Спектры испускания: 1 – Солнца (14.00 20 июня 2005 г., Бристоль, Великобритания); 6 – светодиода «натурального» белого цвета (CCT (Correlated Color Temperature, т. е. цветовая температура) = 4000 K); 7 – «белого» светодиода (CCT = 6500 K).  
5 – стандартная кривая чувствительности глаза.

Очевидно, что повсеместный переход на светодиодное освещение неизбежен. Уже сегодня светодиодные источники света всё больше применяются в уличном, промышленном, бытовом освещении, в светофорах, в автомобильных фарах, в подсветке жидкокристаллических экранов, в фонариках и т.п. Использование светодиодов в бытовом освещении пока ещё сдерживается относительно высокой стоимостью мощных светодиодов (стоимость которых достигает 8–10 долл США), но постоянно снижается (в настоящее время стоимость светодиодов мощностью в несколько ватт меньше доллара США). По такому важному параметру, как световая отдача, современные светодиоды сравнялись и превзошли натриевые газоразрядные лампы и металлогалогенные лампы, достигнув  $160 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$ . Длительный срок службы и отсутствие ртути, фосфора и УФ излучения, несомненно, сделают светодиодные лампы наиболее популярными в качестве источников бытового освещения. Но повсеместный переход к светодиодным лампам приведёт к усилению подавления синтеза мелатонина в организмах людей и животных и одним из последствий может стать существенный рост числа онкологических заболеваний.

На сегодняшний день существуют два основных вида белых светодиодов: многокристальные светодиоды, имеющие в своём составе три полупроводниковых излучателя красного, зелёного и синего свечения, объединённые в одном корпусе, и более перспективные люминофорные светодиоды, создаваемые на основе УФ или синего светодиода, имеющие в своём составе слой специального люминофора, преобразующего в результате фотолюминесценции часть излучения светодиода в свет в относительно широкой (и меньшей по интенсивности по сравнению с синей) спектральной полосе с максимумом в области жёлтого света (рис. 3). Комбинация этих двух полос излучения

и даёт «белый» цвет излучения люминофорного светодиода. Но именно интенсивная полоса излучения в области 455 нм и может представлять угрозу здоровью человека.

Авторы настоящей работы предлагают, во-первых, провести серьёзное целенаправленное научное исследование влияния светодиодных источников света на здоровье человека с учётом приведённых в данной работе результатов, и, во-вторых, начать массовую (промышленную) установку защитных светофильтров (уменьшающих излучение в области 400–500 нм) хотя бы на бытовых светодиодных источниках освещения. Установка таких светофильтров, конечно, несколько повысит стоимость бытовых светильников и несколько снизит привлекательность светодиодов из-за снижения их наиболее привлекательных качеств – экономичности и белизны излучения. Однако очевидно, что это повышение стоимости будет незначительным по сравнению с возможными потерями. С этой целью, возможно, будет необходимо пересмотреть технические условия и стандарты, предъявляемые к бытовым источникам света на основе белых люминофорных светодиодах.

В качестве светофильтра, уменьшающего пропускание света в области 400–500 нм, можно предложить, например, жёлтые стёкла (ЖС), см. рис. 4.

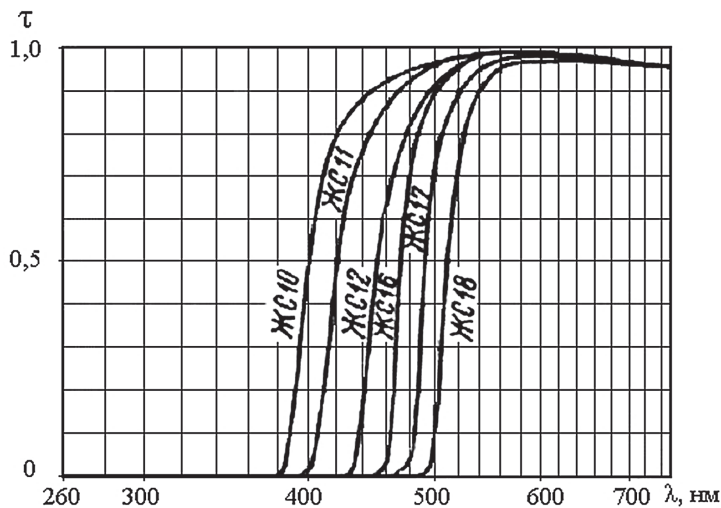


Рис. 4. Спектры пропускания светофильтров ЖС ( $\tau$  – коэффициент пропускания при толщине 3 мм).

Жёлтые стёкла (ЖС10-ЖС18) в разной степени сократят голубое излучение светодиода, почти не уменьшив излучение в других областях спектра. В результате световая отдача светодиода несколько понизится, цвет станет более желтоватым (напоминая цвет традиционной лампы накаливания), но зато существенно снизится риск подавления синтеза мелатонина в организме человека.

Физический закон, определяющий ослабление параллельного монохроматического пучка света при распространении его в поглощающей среде – закон Бугера-Ламберта: пучок монохроматического света интенсивностью  $I_0$ , пройдя через слой



поглощающего вещества толщиной  $l$ , выходит ослабленным до интенсивности  $I$ , определяемой выражением:

$$I(l) = I_0 e^{-k_\lambda l},$$

где  $k_\lambda$  — показатель поглощения [3].

Таким образом, применяя тот или иной светофильтр и варьируя его толщину, можно создать оптимальное соотношение яркости и спектрального распределения излучения источника света на основе белого люминофорного светодиода.

### Литература

1. Анисимов В.Н. Хронометр жизни. // Природа, 2007, № 7, с. 3–10.
2. Бронникова Н.М., Шахт Н.А. О точности измерений галактик и звезд AGK3. // Известия ГАО, 1987, № 204, с. 52–55.
3. Бугер П. Оптический трактат о градации света. / Пер. с франц. — М., 1950.
4. Букнина М.Н., Бармасов А.В., Кононов А.И., Баранова Л.Н., Холмогоров В.Е. Спектроскопические исследования слоев тетрапиррольных пигментов. I. Слои из экстрактов пигментов листьев высших растений. // Вестн. С.-Петерб. у-та. Сер. 4, 2008, вып. 1, с. 48–55.
5. Вайтцель Р., Ваккер Р.А., Мюллер Ш., Хальтбритер В. О влиянии света на человека с учетом новых воззрений (взгляд изготовителей ламп). // Светотехника, 2005, № 5, с. 12–15.
6. Ван Ден Бельд Г. Свет и здоровье. // Светотехника, 2003, № 1, с. 4–8.
7. Ермолина М.А. К вопросу об экологическом правосознании. // Ученые записки РГГМУ, 2013, № 32, с. 193–196.
8. Иоффе К.И. Биологическое влияние видимого света на организм человека. // Светотехника и электроэнергетика, 2008, № 3, с. 21–29.
9. Исаков А.А. Астроклиматический аспект свечения ночного неба. / В кн.: Астроклимат и эффективность телескопов. — Л.: Наука, 1984.
10. Климентьева И.Г. Динамика хромофора в активированном состоянии родопсина по данным ЯМР-релаксации. Выпускная квалификационная работа / Руководители А.В. Струц и А.В. Бармасов. — СПб.: РГГМУ, 2010. — 50 с.
11. Матвеев Л.Т., Вершель Е.А., Матвеев Ю.Л. Влияние антропогенных факторов на климат городов. // Ученые записки РГГМУ, 2011, № 17, с. 41–50.
12. Островский М.А. Молекулярные механизмы предупреждающего действия света на структуры глаза и системы защиты от такого повреждения. // Успехи современной химии, 2005, т. 45, с. 175–177.
13. Падченко С.И. Информационные механизмы регуляции функционального состояния человека. // Информацийна та негентропійна терапія, 2003, № 1, с. 825.
14. Потапенко А.Я. Действие света на человека и животных. // Соровский образовательный журнал, 1996, № 10.
15. Прутков К. Сочинения Козьмы Пруткова. [Вступ. ст. В. Сквозникова, прим. А.К. Бабореко]. — М., 1965.
16. Пухова Н.А. Изучение строения ретиналя в метародопсине I методами ЯМР и оптической спектроскопии. Выпускная квалификационная работа / Руководители А.В. Струц и А.В. Бармасов. — СПб.: РГГМУ, 2010. — 45 с.
17. Струц А.В., Бармасов А.В. Перспективы применения методов ядерного магнитного резонанса для изучения рецепторов, сопряженных с G-белком. / В кн.: «Перспективы развития науки и образования: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 29 ноября 2013 г. В 7 частях. Часть I. Мин-во обр. и науки. — М.: АР-Консалт, 2013. — 172 с.», с. 13–15.
18. Холмогоров В.Е., Бармасов А.В. Биосфера и физические факторы. Электромагнитные поля и жизнь. / В кн.: Проблемы теоретической и прикладной экологии. — СПб.: РГГМУ, 2005, с. 27–47.
19. Цховребов Э.С., Баршневский Е.В., Яйли Е.О., Церенова М.П. Роль муниципальных образований в обеспечении системы экологической безопасности. // Ученые записки РГГМУ, 2013, № 30, с. 148–154.

20. Яковлева Т.Ю., Бармасов А.В., Холмогоров В.Е. Голубой белок – свет – жизнь. // Научное приборостроение, 1998, т. 7, № 1–2, пр. 1, с. 84–85.
21. Яковлева Т.Ю., Бармасов А.В., Холмогоров В.Е. Церулоплазмин: внутримолекулярная цепь переноса электрона, состоящая из трех типов медьсодержащих центров. / В сб.: Материалы Итоговой сессии Ученого совета 27–28 января 2003 г. Информационные материалы. Часть II. Секции океанологии, экологии и физики природной среды. – СПб.: РГГМУ, 2003, с. 129–130.
22. Aukhadeev A.M., Barmasov A.V., Kholmogorov V.E. On the Optical Investigations of Some Components of Photochemical Model System of Human Plasma. / XVI<sup>th</sup> IUPAC Symposium on Photochemistry (Helsinki, Finland, July 21–26, 1996), Book of Abstracts, p. 305–306.
23. Berson D.M., Dunn F.A., Motoharu T. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. // Science. – February 8, 2002.
24. Brainard G.C., Kaver R., Kheifets L.T. The relationship between electromagnetic field and light exposure to melatonin and breast cancer risk: a review of the relevant literature. // Hi. Pineal Res., 1999, vol. 26, p. 65–100.
25. Brainard G.C. Photoreception for regulation of melatonin and the circadian systems in humans. // Fifth International LRO lighting research symposium. – Orlando, 2002.
26. Davis S., Mirick D.K., Stevens R.G. Night shift work, light at night, and risk of breast cancer. // J. Natl. Cancer Inst., 2001, vol. 93, p. 1557–1562.
27. Douglas A.E., Raven J.A. Genomes at the interface between bacteria and organelles. // Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences, 2003, vol. 358, No. 1429, p. 5–17; discussion 517–518.
28. Eiberg H. Human Genetics. – 2014.
29. Hansen J. Light at Night, Shiftwork, and Breast Cancer Risk. // J. Natl. Cancer. Inst., 2001, vol. 93, p. 1513–1515.
30. Harwerth R., Sperling H. Prolonged color blindness induced by intense spectral lights in rhesus monkeys. // Science, 1971, vol. 174, p. 520–523.
31. Hurd M.W., Ralph M.R. The significance of circadian organization for longevity in the golden hamster. // J. Biol. Rhythms., 1998, vol. 13, p. 430–436.
32. Kempenaers B., Borgström P., Loës P., Schlicht E., Valcu M. Artificial Night Lighting Affects Dawn Song, Extra-Pair Siring Success, and Lay Date in Songbirds. // Current Biology, 2010, vol. 20, No. 19, p. 1735–1739.
33. Klomp L.W.J., Gitlin J.D. Expression of the ceruloplasmin gene in the human retina and brain: implications for a pathogenic model in aceruloplasminemia. // Hum. Molec. Genet. 5: 1989–1996, 1996.
34. Kloog I., Haim A., Stevens R.G., Barchana M., Portnov B.A. Light at night co-distributes with incident breast but not lung cancer in the female population of Israel. // Chronobiology International, 2008, vol. 25, No. 1, p. 65–81.
35. Kloog I., Haim A., Stevens R.G., Portnov B.A. Global co-distribution of light at night (LAN) and cancers of prostate, colon, and lung in men. // Chronobiology International, 2009, vol. 26, No. 1, p. 108–125.
36. Longcore T., Rich C. Ecological light pollution. // Front. Ecol. Environ., 2004, vol. 2, p. 191–198.
37. Miller M.W. Apparent effects of light pollution on singing behavior of American robins. // Condor., 2006, vol. 108, p. 130–139.
38. Navara K.J., Nelson R.J. The dark side of light at night: Physiological, epidemiological, and ecological consequences. // J. Pineal Res., 2007, vol. 43, p. 215–224.
39. Newman L.A., Walker M.T., Brown R.L., Cronin T.W., Robinson P.R. Melanopsin forms a functional short-wavelength photopigment. // Biochemistry, 2003, vol. 42, No. 44, p. 12734–12738.
40. Petteri T. Light Pollution: Definition, legislation, measurement, modeling and environmental effects. – Barcelona, Catalunya, September 2007.
41. Rich C., Longcore T., eds. Ecological Consequences of Artificial Night Lighting. – Washington, DC: Island Press, 2006.
42. Smith A.L. Oxford dictionary of biochemistry and molecular biology. – Oxford [Oxfordshire]: Oxford University Press, 1997. – 508 pp.
43. Stevens R.G. Electric power use and breast cancer: a hypothesis. // Am. J. Epidemiol., 1987, vol. 125, p. 556–561.
44. Stevens R.G., Hansen J., Schernhammer E.S., Davis S. Response to Ijaz S, et al. Night-shift work and breast cancer – a systematic review and meta-analysis. // Scand. J. Work Environ. Health., 2013, vol. 39, No. 6, p. 631–632.
45. Stone E.L., Jones G., Harris S. Street lighting disturbs commuting bats. // Current Biology, 2009, vol. 19, p. 1123–1127.
46. Struts A.V., Salgado G.F.J., Martinez-Mayorga K., Brown M.F. Retinal dynamics underlie its switch from inverse agonist to agonist during rhodopsin activation. // Nat. Struct. Mol. Biol., 2011, vol. 18, No. 3, p. 392–394.
47. Verdegem P.J.E., et al. Biochemistry, 1999, vol. 38, p. 11316–11324.