

## **МЕХАНИЗМЫ ВОСПРИЯТИЯ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЕЙ ОСВЕЩЕННОСТИ СЕТЧАТКОЙ ГЛАЗА В УСЛОВИЯХ СУМЕРЕЧНОГО ЗРЕНИЯ**

***Юшкевич Е.В., Юшкевич М.В., Мащенко И.В.***

*Белорусский государственный медицинский университет  
Беларусь, Минск*

*В настоящей работе рассмотрены вопросы воздействия на глаз человека освещенности от различных источников света. Изучена зависимость угла разрешения глаза человека от освещенности, рассмотрено взаимодействие кванта света от освещенной поверхности с элементами глаза, прослежены биохимические реакции превращения оптического излучения в потенциал действия. Показана зависимость скорости регенерации родопсина и йодопсина от энергии поступающего в глаз излучения. Рассмотрен механизм сумеречного зрения человека. Дано объяснение сумеречного зрения человека на основании накопительного свойства молекулами 11-цис ретиналь импульса силы квантов инфракрасного излучения. Дано объяснение различия времени экспозиции сумеречного зрения для темных и светлых объектов.*

***Ключевые слова:*** сумеречное зрение; уровни освещенности; родопсин; йодопсин.

## **RERCEPTION OF DIFFERENT LEVELS OF ILLUMINATION BY THE RETINA OF THE EYE IN CONDITIONS OF TWILIGHT VISION**

***Yushkevich Y., Yushkevich M., Mashcanka I.***

*Belarusian State Medical University,  
Belarus, Minsk*

*In the article the issues of the effect on the human eye of illumination from various light sources are considered. The dependence of the resolution angle of the human eye on illumination has been studied, the interaction of a light quantum from an illuminated surface with the elements of the eye has been considered, biochemical reactions have been traced during the transformation of optical radiation into an action potential. The dependence of the rate of regeneration of rhodopsin and iodopsin on the energy of the radiation entering the eye is shown. The mechanism of human dark vision is considered. An explanation of the dark vision of a person is given on the basis of the cumulative property of the 11-cis retinal molecules of the impulse of the strength of infrared radiation quanta. An explanation is given for the difference in dark vision exposure time for dark and light objects.*

***Key words:*** twilight vision; light levels; rhodopsin; iodopsin.

Отображение реальной действительности с помощью глаза человека – это одна из главных форм взаимодействия человека и среды его жизнедеятельности. Поэтому представляет значительный интерес провести анализ этого взаимодействия, рассмотреть некоторые наиболее важные его стороны. К таким следует отнести качество электромагнитного излучения – как носителя информации, освещенность, создаваемую этим излучением, а также восприятия действия света глазом человека, которое зависит от длины волны и мощности излучения.

**Цель исследования:** изучение влияния уровней освещенности от различных источников на глаз человека, механизмы сумеречного зрения человека.

**Методы:** работа выполнена с использованием различных источников электромагнитного излучения естественного и искусственного происхождения. Измерение уровня освещенности проводилось с помощью стандартного прибора - люксметра Ю-116. Технические характеристики прибора изложены в инструкции по эксплуатации люксметра Ю-116.

**Результаты.** Известно, что относительная чувствительность глаза человека  $V_\lambda$  зависит от длины волны электромагнитного излучения  $\lambda$ . График этой зависимости (кривая видности) представлен на рис.1.

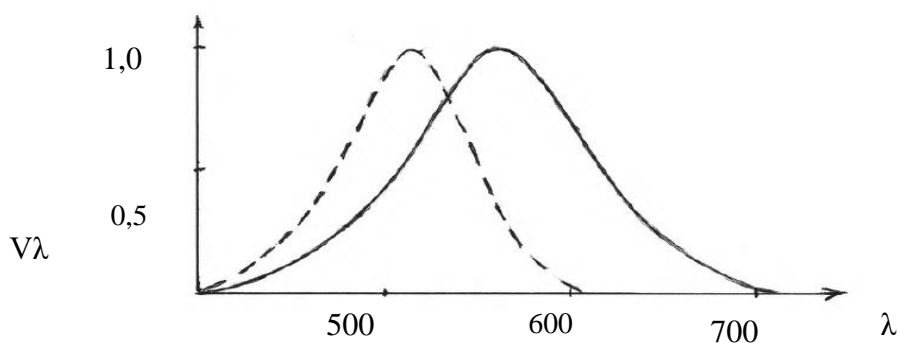


Рис.1. Зависимость относительной чувствительности глаза человека от длины волны света. Сплошная линия - дневной свет, штриховая – сумерки

График показывает, что глаз человека адаптирован к свету с длиной волны видимого диапазона спектра, который может быть создан не только природным источником, но и искусственным светильником. Проведем сравнение этих источников по основным параметрам, воспринимаемым глазом человека. Во-первых – это яркость излучающей или отражающей поверхности, измеряемая в канделах/м<sup>2</sup> (кд/м<sup>2</sup>). Этот параметр важен для глаза человека, так как на него реагирует зрачок глаза, например, при яркости  $7,5 \times 10^3$  кд/м<sup>2</sup> происходит сужение зрачка глаза. Для сравнения приведем величины яркости некоторых светящихся тел: неоновая лампа –  $1 \times 10^3$  кд/м<sup>2</sup>,

лампа накаливания –  $(1,5-5,0) \times 10^6$  кд/м<sup>2</sup>, солнце –  $1,5 \times 10^9$  кд/м<sup>2</sup>. Эти данные показывают, что газоразрядные лампы излучают неяркий, так называемый «холодный свет» в отличие от лампы накаливания и солнца. Однако яркости источника электромагнитного излучения недостаточно для полной характеристики взаимодействия света и глаза человека. В этом плане необходимо учитывать и такой параметр, как освещенность предмета, измеряемая в люксах (лк) или в кд/м<sup>2</sup>. При разной освещенности глаз человека имеет различный угол разрешения. Более высокая освещенность позволяет различать более мелкие детали объекта, что соответствует меньшему углу разрешения (рис.2).

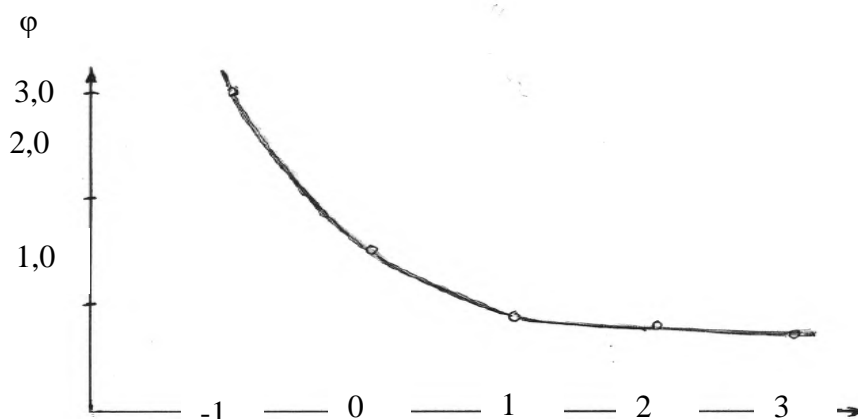


Рис.2. Зависимость угла разрешения φ (в угловых минутах) от освещенности E

Исследования, проведенные с помощью люксметра Ю-116, позволили получить следующие значения освещенности поверхности от различных источников (табл.1). Результаты, представленные в табл.1 показывают, что наибольшую освещенность можно получить от солнца, лампочки накаливания и светодиодной лампы.

Светодиод – это источник монохроматического света. Для получения белого света необходимо смешивание трех цветов различных светодиодов. При этом в таком свете отсутствует высокоэнергетическая фиолетовая составляющая. В итоге светодиодные лампы излучают «холодный свет».

Таблица 1

Значения освещенности от различных источников излучения

| №п/п | Источники освещения                         | Освещенность E, лк |
|------|---|--------------------|
| 1.   | Солнце на открытой местности                | 80000              |
| 2.   | Солнце днем, облачно, на открытой местности | 10000              |
| 3.   | Диффузный солнечный свет в помещении        | 100-200            |

|     |   |        |
|-----|---|--------|
| 4.  | Лампа накаливания (150Вт)                 |        |
| 4.1 | на расстоянии 1м                          | 4000   |
| 4.2 | на расстоянии 2м                          | 1000   |
| 4.3 | на расстоянии 3м                          | 400    |
| 5.  | Лампа накаливания (60Вт), максимальная    | 700    |
| 6.  | Светодиодная лампа направленного действия | 500    |
| 7.  | Люминесцентная лампа                      | 30-150 |
| 8.  | Полная луна                               | 0,3    |

Для получения необходимой освещенности требуется свет определенной яркости. Ее можно получить кроме природного источника (солнца) и с помощью лампочки накаливания. Освещенность поверхности от низкоэнергетических источников (люминесцентные лампы, светодиодные лампы) позволяет получить от нее отраженный световой поток также низкой энергии в отличие от высокоэнергетического источника света, дающего отраженный от освещенной поверхности более высокоэнергетическое излучение.

В сетчатке глаза человека сумеречное зрение обеспечивают палочковые фоторецепторные нейроны (палочки). В мембранах наружного сегмента палочек содержится зрительный пигмент родопсин - хромопротеин, состоящий из белка опсина и альдегида витамина А – ретиналя. Этот белок является представителем класса трансмембранных белков, так называемых рецепторов, сопряженных с G-белком, отвечающих за передачу сигнала через клеточную мембрану и регулирующих множество физиологических процессов в организме. Палочки, расположенные по окружности на ближайшем расстоянии от периферии центральной ямки, имеют максимальную плотность, и примерно каждые 100 палочек передают свой индивидуальный электрический сигнал возбуждения суммарно только на один аксон. Колбочковые фоторецепторные нейроны (колбочки) передают свой сигнал только на один связанный с ним аксон, что свидетельствует о мощной и высокочувствительной системе обнаружения опасности у человека, приспособленная к работе и при сумеречном освещении.

Отраженный от освещенной поверхности свет поступает в глаз человека и преобразуется в электрический потенциал действия следующим образом: квант света поглощается молекулой 11-цис-ретиналем, которая, распрямляясь превращается в изомер транс-ретиналь с преобразованием в родопсин. Родопсин разрывается на опсин и ретиналь, что приводит к увеличению проницаемости дисковой мембраны для  $Ca^{+2}$  и диффузии  $Ca^{+2}$  к

цитоплазматической мембране палочки. Таким образом происходит блокировка  $\text{Na}^+$  - каналов и образование фоторецепторного потенциала на мембране палочки. Далее происходит возбуждение нейронов сетчатки и проведение нервного импульса в зрительные центры головного мозга. Время протекания фотохимических реакций составляет  $10^{-11}$ - $10^{-12}$  с. Частота следования нервных импульсов возрастает с увеличением интенсивности падающего света по логарифмическому закону, поэтому при некоторой сверхвысокой интенсивности светового потока могут произойти необратимые процессы (например, при рассматривании незащищенным глазом солнечного диска или дуговой сварки).

Химические процессы в колбочках аналогичны процессам в палочках с той лишь разницей, что вместо родопсина в фотохимических реакциях участвует йодопсин, обеспечивающий три вида колбочек, имеющих максимумы поглощения света на длинах волн 440, 540, 590 нм. (синий, зеленый, красный цвет). Протекание фотохимических реакций связано с синтезом в фоторецепторных клетках сетчатки родопсина и йодопсина, поэтому для дальнейшего функционирования глаза необходим обратный процесс – процесс восстановления. Процесс регенерации родопсина и йодопсина ускоряется на свету, так как переход транс-ретинола в 11-цис-ретинол требует определенного количества энергии, поставляемой светом: чем более высокоэнергетическое излучение, тем быстрее протекает процесс регенерации. Таким образом источники света, имеющие более высокую яркость, позволяют получить более высокую степень освещенности объекта. Отраженный от такой поверхности свет имеет и более высокий энергетический потенциал. Полученная таким способом энергия позволяет ускорять процессы восстановления уровня родопсина и йодопсина и предупреждает утомление и перенапряжение фоторецепторных клеток сетчатки глаза.

Представляет значительный интерес изучить механизмы сумеречного зрения человека, когда отсутствуют искусственные и естественные источники светового излучения (например, ночью, когда не видно звезд и луны). Сразу после попадания в такую обстановку человеческий глаз не различает различные объекты. Однако через определенный интервал времени проявляются контуры предметов все более четкие с течением времени. При этом время экспозиции зависит от самого предмета, а именно, светлые проявляются быстрее, а темные – медленнее.

Для объяснения эффекта сумеречного зрения воспользуемся положением молекулярно-кинетической теории о непрерывном движении молекул барионной материи при температуре выше температуры абсолютного нуля. При этом атомы и молекулы, представляющие собой фактически электрические диполи, обладают электрическим полем. При колебательном движении электрический диполь неизбежно излучает электромагнитную волну с длиной волны  $\lambda$ . От длины волны зависят энергетические

характеристики излучения. В видимом диапазоне длин волн (760нм – 400нм) процесс превращения видимого света в электрический сигнал описан выше. При уменьшении интенсивности освещения, точнее при уменьшении энергии квантов электромагнитного излучения, когда мы рассматриваем инфракрасное излучение, что характерно для темной ночи (диапазон длин волн от 1мм до 760нм), механизм сумеречного зрения несколько изменяется, особенно в начальной стадии. Любое электромагнитное излучение обладает как волновыми, так и корпускулярными свойствами, то есть обладает свойствами частиц, а именно - имеет импульс. Импульс фотона  $P = h/\lambda$ , где  $h$  – постоянная Планка,  $\lambda$  – длина волны излучения.

При попадании на молекулу 11-цис- ретиналь импульс фотона передается молекуле, превращаясь в импульс тела  $P = mv = h/\lambda$ , где  $m$  – масса молекулы,  $v$  – ее скорость. После соударения кванта электромагнитного излучения молекула 11-цис- ретиналь благодаря силе упругости замедляется после воздействия этого фотона, что вызывает появление разности импульса тела  $m(v_1 - v_2) = \Delta mv$  за время  $\Delta t$ , то есть появляется импульс силы  $F\Delta t$ . Благодаря однонаправленному потоку квантов электромагнитного инфракрасного излучения через определенный интервал времени накапливается достаточный импульс силы  $F\Delta t$ , который распрямляет молекулу 11-цис-ретиналь с дальнейшими, описанными выше преобразованиями, вызывающие появление потенциала действия. Поэтому время накопления импульса силы от квантов инфракрасного излучения для распрямления молекулы 11-цис-ретиналь для светлых предметов значительно меньше, чем для темных.

Различие сумеречного зрения для светлых и темных предметов зависит от их отражательных способностей. Например, снег излучает не только свое инфракрасное излучение, но и отражает практически все более интенсивное инфракрасное излучение атмосферы. Темные предметы данное излучение практически полностью поглощают, а не отражают, то есть излучают только свои более слабые инфракрасные волны. Поэтому время  $\Delta t$  накопления импульса силы при таком излучении для распрямления молекулы 11-цис-ретиналь значительно большее. Тем не менее благодаря энергетической накопительной способности молекулы формирование потенциала действия происходит и человеческий глаз способен видеть практически неосвещенные предметы в темноте.

*Выводы.* 1. Угол разрешения глаза человека понижается с ростом освещенности изучаемой поверхности.

2. Источники света, имеющие более высокую яркость, позволяют получить более высокую степень освещенности объекта. Отраженный от такой поверхности свет является более высокоэнергетическим, что позволяет увеличивать скорость регенерации родопсина и йодопсина и снижает перенапряжение фоторецепторных клеток сетчатки.

3. Изучен процесс образования потенциала действия для сумеречного зрения человека. Показан процесс накопления молекулой 11-цис-ретиналь импульса силы, необходимой молекуле для протекания процесса появления импульса действия при инфракрасном электромагнитном излучении. Дано объяснение различного времени экспозиции сумеречного зрения человека для темных и светлых объектов из-за их отражательной способности.

### **Список литературы**

1. Островский, М.А. Молекулярная физиология зрительного пигмента родопсина: актуальные направления / М.А. Островский // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. – 2020. – Т. 106, № 4. – С. 401-420.
2. Бондарь, В. История зрения / В. Бондарь. – М., 2020. – 252 с.
3. Островский, М.А. Фемтохимия родопсинов / М.А. Островский, В.А. Надточенко // Химическая физика. – 2021. – Т. 40, № 4. – С. 76-84.
4. Проблемы оптической физики и биофотоники SFM-2021 // Материалы 9-го Международного симпозиума и 25-ой Международной молодежной научной школы Saratov Fall Meeting 2021. – Саратов, 2021.