

УДК 614/5: 644.36

ОПСИНЫ *Trichoplax sp. H2* (PLACOZOA) – ДЛЯ ТРАНСПОРТНОЙ ГИГИЕНЫ

Капцов В.А.¹, Дейнего В.Н.¹, Козырицкий Д.В.²

¹ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт гигиены транспорта» Роспотребнадзора, Москва, Россия

²ГБОУ «Гимназия №8» им. Н.Т. Хрусталева, Севастополь, Россия

*Появление светодиодных и лазерных источников света на транспорте обостряют проблему безопасности движения и окружающей световой среды человека. Разработка гигиенических мер по обеспечению защиты глаз от фотохимического повреждения является актуальной задачей гигиены освещения. Ее решение возможно после проведения дорогостоящих экспериментов, с привлечением дорогого офтальмологического оборудования и волонтеров. К сожалению, проведение подобных исследований связано с экономическими трудностями. Поэтому поиск адекватной альтернативы является важной задачей для гигиенистов. В качестве модельного животного выбран *Trichoplax sp. H2* (Placozoa), который быстро размножается в неволе; экономичен в содержании; прост по структурному строению; имеет большое многообразие геномов опсинов и меланопсинов. К настоящему моменту времени секвенированы 14 геномов опсинов, в том числе ген родопсина *Rh69* (длиноволновый), и 13 геномов меланопсина, а также обнаружены лизин, триптофан, серотонин. Для всех опсинов определены длины волн максимального поглощения, а также указаны области, которым они принадлежат на диаграмме цветности CIE, которая лежит в основе ГОСТов, определяющих цвета сигналов на железнодорожном и автомобильном транспорте. Основными цветами являются синий, зеленый и красный. При красном свете 630-650 нм сразу определяется свет и его цвет. Учитывая, что родопсин *Rh6* относится к длинноволновым, была проведена экспериментальная оценка реакции *Trichoplax sp. H2*, которая показала, что он отрицательно реагирует на красный свет 630-650 нм. Этот опыт может стать хорошим фундаментом для экспериментальных работ по гигиене света с целью понимания, как монохромный свет взаимодействует со светочувствительной структурой модельного животного, а также расширяет возможности по определению критической дозы фотонов, необходимой для фотохимического поражения*

структур клеток при прямом воздействии на них монохромного света, исключая эксперименты на волонтерах.

Ключевые слова: фотохимическое поражение, спектральный цвет, сетчатка глаза, трихоплакс, гигиена света, опсины, меланопсин, беспозвоночные животные, фототаксис, RGB-таксис.

Для цитирования: Капцов В.А., Дейнего В.Н, Козырицкий Д.В. Опсины *Trichoplax sp. H2 (Placozoa)* – для транспортной гигиены. Медицина труда и экология человека. 2021;4:68-91

Для корреспонденции: Капцов Валерий Александрович, член-корреспондент РАН, доктор медицинских наук, профессор, заведующий отделом гигиены труда, e-mail: kapsovva39@mail.ru.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

DOI: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2021-10405>

OPSINS

Trichoplax sp.H2 (PLACOZOA) - FOR TRANSPORT HYGIENE

Kapsov V.A.¹, Deinogo V.N.¹, Kozyritskiy D.V.²

1. Federal State Unitary Enterprise "All-Russian Research Institute of Transport Hygiene" Rospotrebnadzor, Moscow, Russia,
2. The Khustalev "Gymnasium № 8" Sevastopol, Russia.

The advent of LED and laser light sources in transport exacerbate the problem of traffic safety and the human light environment. The development of hygienic measures to ensure the protection of the eyes from photochemical damage is an urgent task of lighting hygiene. Its solution is possible after costly experiments, with the involvement of expensive ophthalmic equipment and volunteers. Unfortunately, conducting such research is associated with economic difficulties. Therefore, finding an adequate alternative is an important task for hygienists. Trichoplax sp.H2 (Placozoa) was chosen as a model animal, which: reproduces rapidly in captivity; economical in content; simple in structure; has a wide variety of genomes of opsins and melanopsins. At the time of 2008, only two opsmna genes were discovered in the genome of Trichoplax sp.H2 and no lysine was found. To date, 14 opsin genomes have been sequenced, including the rhodopsin gene Rh69 (long-wavelength) and 13 melanopsin genomes, as well as lysine, tryptophan, and serotonin. For all its opsins,

the wavelengths of maximum absorption are determined, and the regions to which they belong on the CIE chromaticity diagrams are indicated. The spectral chromaticity of light is determined by the chromaticity diagram, which is the basis of GOST standards, which determine the colors of signals on railway and road transport. The main colors are blue, green and red. 630-650nm red light, the light and its color are immediately detected. Considering that rhodopsin Rh6 belongs to long-wavelengths, an experimental evaluation of the reaction Trichoplax sp.H2 was carried out and it has been shown that it reacts negatively to red light 630-650nm. This experience can become a good foundation for experimental work on the hygiene of light in order to understand how monochrome light interacts with the photosensitive structure of a model animal, and also expands the possibilities for determining the critical dose of photons required for photochemical damage to cell structures when directly exposed to monochrome light, excluding experiments on volunteers.

Keywords: *photochemical damage, spectral color, retina, trichoplax, light hygiene, opsins, melanopsin, invertebratesphototaxis, RGB taxis.*

Citation: *Kaptsov V.A ,Deinogo V.N., Kozyritskiy D.V.Opsinstrichoplax sp.h2 (placozoa) - for transport hygiene. Occupational health and human ecology. 2021;4: 68-91*

Correspondence: *Valery A. Kaptsov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, DSc. (Medicine), Professor, Head of the Department of Occupational Hygiene, e-mail: kapcovva39@mail.ru.*

Financing: *The study had no financial support.*

Conflict of interest: *The authors declare no conflict of interest.*

DOI: *<http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2021-10405>*

Гигиена света занимается проблемой формирования безопасной световой среды обитания человека [1]. Для формирования требований к спектру света окружающей среды человека очень важно знать, что происходит, когда фоторецепторы получают разные уровни световых сигналов (в виде потока фотонов), и как лучше всего применять свет, чтобы помочь контролировать циркадное и нейрофизиологическое регулирование, а также уменьшить риски, связанные со световыми суточными расстройствами, депрессией, ожирением, раком и фотооптическим повреждением глаз [2].

Во всем мире было предпринято много усилий, чтобы попытаться понять фундаментальные биологические принципы, которые регулируют развитие и гомеостаз многоклеточных организмов. Однако эти исследовательские усилия были затруднены генетической избыточностью и физиологическими сложностями, связанными с 650 миллионами лет эволюции многоклеточных организмов. Поэтому было очень важно найти модельное животное с генетическим набором светочувствительных опсинов, которое помогло бы понять, как формировалась цветовая сенсорная система у беспозвоночных и позвоночных животных. Было найдено морское животное *Trichoplax* (Placozoa), представляющее простейшую многоклеточную модель, которая позволяет идентифицировать оригинальные правила и механизмы, лежащие в основе создания и ремонта многоклеточной ткани, и дающее возможность использовать его для понимания заболеваний человека [3,4], в частности его зрительного анализатора.

Неуклонно растет интерес к плацецоанам (многообразию типов *Trichoplax* (Placozoa)), поскольку они являются простейшим типом из всех метазоанских животных, обладают наименьшим геномом, входят в число носителей крупнейших митохондриальных геномов, в которых содержатся представители всех основных семейств регуляторных генов людей, и хорошо поддаются экспериментальным манипуляциям. В работе [5] показано, что наилучшим модельным животным из многообразия типов этого животного является *Trichoplax* sp. H2. В то время как *Trichoplax adhaerens* редко встречается в полевых условиях, близкородственный *Trichoplax* sp. H2 (16S гаплотип H2) является наиболее широко распространенной линией. Кроме того, *Trichoplax* sp. H2 демонстрирует высокие показатели размножения даже в условиях неоптимальной среды. Следовательно, *Trichoplax* sp. H2 является наиболее подходящей плацецоанской модельной системой [5].

Исходя из световой среды обитания *Trichoplax* sp. H2 важно понимать, как соотносится множество генов светочувствительных опсинов с множеством спектральных цветов света, который проникает на глубину его обитания. Это позволит избежать методических ошибок в ходе проводимых исследований. Итак, при проведении гигиенических исследований следует учитывать:

- соотношение спектрального цвета с длинами волн монохромного света и особенности его энергетического воздействия на клеточную структуру модельного животного и его поведенческую реакцию в целом; соотношение

названия генов опсинов с множеством спектральных цветов, а также длин волн, на которых идет максимальное поглощение фотонов светочувствительными опсинами;

- каким набором генов светочувствительных опсинов обладает модельное животное *Trichoplax* sp. H2, а также их биологическое предназначение в сложных процессах;

- влияние определенной длины волны монохромного света на поведение животного *Trichoplax* sp. H2.

Сложный состав солнечного света был, как известно, установлен при разложении луча белого цвета в призме И. Ньютоном в 1672 г. При этом образуется спектр, в котором излучения разных длин волн преломляются под разными углами. Цвета, входящие в спектр, которые могут быть получены с помощью света одной длины волны (точнее с очень узким диапазоном длин волн), называются *спектральными цветами* [6,7].

В теории цвета приняты основные цвета красный (red) зеленый (green) и синий (blue), с помощью которых можно получить все цвета света. На рис. 1 приведена диаграмма смешивания основных цветов RGB.

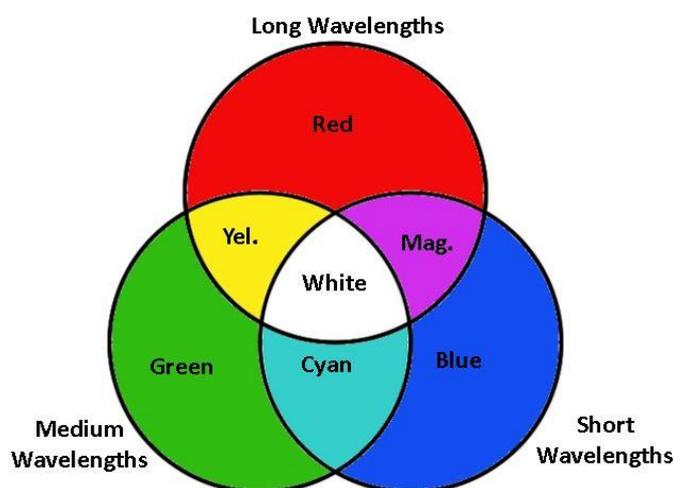


Рис. 1. Диаграмма оптического смешения цветов [8,9]

Общепринятый уровень интеграции спектральных цветов обозначается терминами длинноволновый (long wavelengths), средневолновый (medium wavelengths) и коротковолновый (short wavelengths) [8,9].

Таким образом, спектральные цвета – это реальные цвета, а не спектральные, воображаемые, цвета, которые находятся за пределами данной кривой и образуются посредством произвольного смешения спектральных и

ахроматических цветов. Голубой (сиан) цвет света получается смешением синего и зеленого.

В теории и практике изучения спектрального цвета широко применяется диаграмма цветности CIE [10], на которой можно определить координаты цветности (y , x) и диапазон длин волн [11]. CIE - Commission internationale de l'eclairage или Международная комиссия по освещению (МКО) - разрабатывает и публикует стандарты по всем вопросам, связанным с фотометрией, включая освещение, зрение и колориметрию.

В книге «Оптика океана» [12] на диаграмме цветности CIE уточнены координаты, область голубого – это сине-зеленая область (сиан = blue green), приведена на рис. 2.

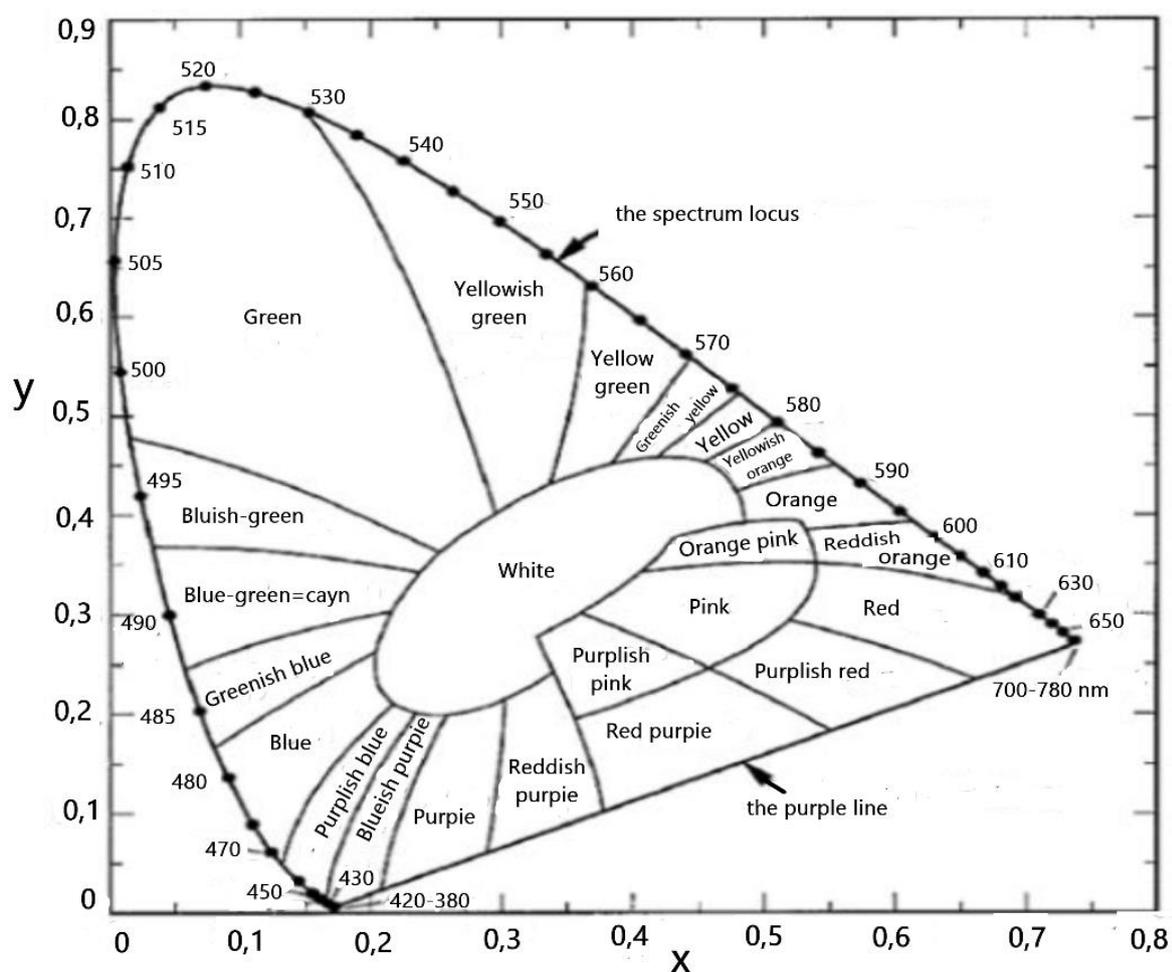


Рис. 2. Диаграмма цветности CIE [12]

Из диаграммы цветности CIE видно, что имеется множество поддиапазонов синего света и один узкий диапазон голубого (cyan) спектрального цвета.

Итак, для определения параметров спектрального цвета существует нормативная база Международной комиссии по освещению (МКО), на базе которых разрабатываются отечественные стандарты [13,14].

Это позволяет светотехникам, биологам и гигиенистам в рамках единого терминологического подхода проводить исследования влияния света на биологические процессы в живой ткани, а также однозначно трактовать их результаты.

Цель исследования – определить перечень генов опсинов оптической сенсорной системы модельного животного *Trichoplax* sp. H2. (Placozoa) и длину волны, на которой происходит максимальное поглощение фотонов; экспериментально установить поведенческую реакцию *Trichoplax* sp. H2. на длинноволновый свет (красный свет) и подтвердить наличие у него циркадных ритмов.

Материалы и методы. Выбор цветов монохромного света обусловлен тем, что цвета синий, зеленый и красный применяются в системе сигнализации на транспорте.

Геномный анализ животного *Trichoplax* sp. H2. проводился путем анализа и поиска генов опсинов в открытой базе данных последовательностей белков UniProt, действующей с 2003 года. Единая база данных UniProt была создана путем объединения нескольких баз и состоит из четырех крупных баз данных (База знаний, Архив, Справочные кластеры и метагеномные данные), которые охватывают различные аспекты анализа белковых последовательностей. Многие из последовательностей стали известны в результате реализации проектов секвенирования геномов последних лет. Кроме того, база данных UniProt содержит большое количество информации о биологических функциях белков, полученной из научной литературы, и регулярно пополняется результатами новых исследований.

Экспериментальные исследования проводились на лабораторных животных *Trichoplax* sp. H2. Культивирование животных в лабораторных условиях осуществлялось в закрытых чашках Петри, заполненных фильтрованной морской водой (соленость 35‰, pH 7,6-8,2) в холодильном шкафу (серийный номер A279251217. Фирма Polair.) В условиях длительного

культивирования у животных отсутствовали значительные морфологические изменения [9].

Двухвебкамерный микроскоп «Леонардо 3.0» (специально разработанный под исследования) позволял одновременно наблюдать поведение группы животных *Trichoplax* и каждого животного *Trichoplax* в этой группе при низком уровне освещенности и стабильной температуре водной среды его обитания. В микроскопе были применены две веб-камеры - верхняя в режиме микроскопа с матрицей 1,9 Мп и нижняя в режиме макросъемки с матрицей – 5 Мп. Микроскоп был оборудован манипулятором для подачи по оптоволокну световых стимулов. С двух камер изображение выводилось на экран ноутбука HP laptop Model14-dk0028ur, на котором записывались и хранились видеофайлы. Воспроизводимость поведенческой реакции *Trichoplax* была подтверждена современными методами оптической микроскопии: оптические микроскопы Nikon Eclipse Ts2R-FI, Nikon SMZ-1270, Stemi 305 [15].

Результаты и обсуждение. Сначала была проанализирована геномная база UniProt и определено на каких длинах (aa) светочувствительные опсины, имеющие разную длину волны и описанные в терминологии «Blue-sensitive opsin», имеют максимальное поглощение ($A_{bs}(max)$).

Известно, что светочувствительные опсины, связанные с G-белками и лизином, выполняют важную роль в процессе формирования сенсорной системы в мембране клеток. В работе [16] отмечалось, что рецепторы с высоким содержанием лейцина, связанные с G-белком у *Placozoa* более разнообразны, чем считалось ранее. Лейцин в организме человека, как и в организмах животных, не синтезируется, а синтезируется растениями и микроорганизмами (симбионтами) из пировиноградной кислоты (пируват) и в живых организмах встречается в виде L-оптического изомера. При этом одна молекула глюкозы превращается в две молекулы пировиноградной кислоты.

У животного *Trichoplax* sp. H2 имеются каналы мелатонина, который образуется из серотонина, который в свою очередь образуется из триптофана, который поставляется симбионтами:

-бактериями *Grellia incantans*, обнаруженными в волокнистых клетках, мирно сосуществующими с *Trichoplax* sp. H2 и паразитирующими в человеке;

-бактериями Рутманния, которая была обнаружена в клетках, которые служат трихоплаксу для переваривания водорослей: бактерия поедает жиры и

прочие водорослевые липиды, а в ответ делится с хозяином витаминами и аминокислотами [17] - лейцином, лизином и триптофаном.

При синтезе аминокислот, присутствующих в эндосимбионте *Trichoplax* sp.H2, самым примечательным является его сохраняющаяся способность к синтезу незаменимых аминокислот лизина и треонина [18].

Обычно серотонин синтезируется через активацию двух разных триптофангидроксилаз – TrH1 и TrH2, которые найдены соответственно в эндокринных клетках и нейронах у человека и других млекопитающих и кодируют разные изоформы триптофангидроксилазы [19].

У животного *Trichoplax* sp. H2 также обнаружен серотонин [20], а механизм его образования изучается с учетом наличия у него phenylalanine hydroxylase (фенилаланин гидроксилаза), а также рассмотрены вопросы поведенческой реакции животного на концентрацию серотонина [20].

Для человека, как и для всех *Metazoa*, фенилаланин является незаменимой аминокислотой и должен поступать в организм в достаточном количестве с белками пищи. Триптофан может служить субстратом (хотя и плохим) для фенилаланингидроксилазы. Продукт этой реакции, 5-окситриптофан, является промежуточным соединением на пути превращения триптофана в серотонин [21]. Пример синтеза серотонина с участием phenylalanine hydroxylase приведен в работе [22]. В этой работе говорится, что гидроксилаза фенилаланина у *S.mediterranea* была идентифицирована путем поиска сходства последовательностей с использованием BLASTp в базе данных PlanMine [22]. Биосинтез серотонина в этих клетках осуществляется неканоническим ферментом - фенилаланиновой гидроксилазой [22].

В работе [23] показана новая роль серотонина, который играет различные физиологические роли, такие как моторика желудочно-кишечного тракта, циркадные ритмы, сексуальное поведение, развитие и эмбриогенез. Таким образом, эти результаты демонстрируют до сих пор не сообщавшуюся роль серотонина в поддержании или дифференцировке стволовых клеток, имеющих решающее значение для регенерации глаза, подчеркивают роль метаболитов в регулировании судьбы клеток и подтверждают замечательное свойство регенерации у *Trichoplax* sp. H2.

Известно, что серотонин участвует в циркадных ритмах животных, которые зависят от уровня освещенности и спектра света. При этом

светочувствительным опсином является меланопсин, гены которого обнаружили у *Trichoplax sp. H2*.

Таблица 1

**Перечень генов меланопсина, секвенированных
у *Trichoplax sp. H2*, по данным UniProt**

Entry	Entry name	Protein names	Gene names	Organism	Length
A0A369RSC9	A0A369RSC9_9METZ	Melanopsin-B	TrispH2_010244	<i>Trichoplax sp. H2</i>	364
A0A369S3I1	A0A369S3I1_9METZ	Melanopsin	TrispH2_007337	<i>Trichoplax sp. H2</i>	344
A0A369RY53	A0A369RY53_9METZ	Melanopsin	TrispH2_010696	<i>Trichoplax sp. H2</i>	340
A0A369S0R4	A0A369S0R4_9METZ	Melanopsin	TrispH2_007315	<i>Trichoplax sp. H2</i>	376
A0A369S7C5	A0A369S7C5_9METZ	Melanopsin-B	TrispH2_006602	<i>Trichoplax sp. H2</i>	359
A0A369S762	A0A369S762_9METZ	Melanopsin	TrispH2_006583	<i>Trichoplax sp. H2</i>	342
A0A369S7G3	A0A369S7G3_9METZ	Melanopsin-like	TrispH2_005499	<i>Trichoplax sp. H2</i>	367
A0A369S8F5	A0A369S8F5_9METZ	Melanopsin-B	TrispH2_006620	<i>Trichoplax sp. H2</i>	371
A0A369RV42	A0A369RV42_9METZ	Melanopsin-B	TrispH2_008654	<i>Trichoplax sp. H2</i>	266
A0A369SFL1	A0A369SFL1_9METZ	Melanopsin-B	TrispH2_002313	<i>Trichoplax sp. H2</i>	318
A0A369RNS3	A0A369RNS3_9METZ	Melanopsin	TrispH2_011900	<i>Trichoplax sp. H2</i>	225
A0A369RNI9	A0A369RNI9_9METZ	Melanopsin-A	TrispH2_012176	<i>Trichoplax sp. H2</i>	270
A0A369RSL9	A0A369RSL9_9METZ	Melanopsin-B	TrispH2_010203	<i>Trichoplax sp. H2</i>	315

Как видно из таблицы, у *Trichoplax sp. H2* уже найдены 13 видов генов меланопсина, свидетельствующих о существовании у него циркадных ритмов, но роль каждого из них нуждается в дальнейшем исследовании и будет освещена отдельно. Меланопсин - это тип фотопигмента, относящийся к более крупным семействам светочувствительных белков сетчатки, называемых опсинами и кодируемых геном *Opn4*. Роль и значение меланопсина трудно переоценить, так как он участвует в следующих биологических процессах:

- связи белок-хромофор;
- регуляции циркадного ритма ;
- передаче сигнала;
- зрительном восприятии;
- опосредованном родопсином сигнальном пути;
- ритмическом процессе;
- фототрансдукции;
- ответе на стимул;
- пути передачи сигнала рецептора, связанного с G-белком;
- захвате циркадного ритма часа по фотопериоду;
- положительной регуляции циркадного цикла сна / бодрствования,
- обнаружении видимого света;
- клеточном ответе на световой раздражитель.

Роль меланопсина в циркадных ритмах человека и системе управления его зрачком изложена в авторской работе [1].

В таблице 2 приведен перечень генов опсинов, секвенированных у *Trichoplax sp. H2*.

Таблица 2

**Перечень генов опсинов, секвенированных
у *Trichoplax sp. H2*, по данным UniProt**

<input type="checkbox"/>	A0A369RPP5	A0A369RPP5_9METZ		Green-sensitive opsin	TrispH2_011966	Trichoplax sp. H2	287
<input type="checkbox"/>	A0A369RPG6	A0A369RPG6_9METZ		Green-sensitive opsin-2	TrispH2_011967	Trichoplax sp. H2	356
<input type="checkbox"/>	A0A369SIQ1	A0A369SIQ1_9METZ		Blue-sensitive opsin	TrispH2_001219	Trichoplax sp. H2	367
<input type="checkbox"/>	A0A369RVT9	A0A369RVT9_9METZ		Ocellar opsin	TrispH2_010628	Trichoplax sp. H2	329
<input type="checkbox"/>	A0A369RWR5	A0A369RWR5_9METZ		Violet-sensitive opsin	TrispH2_009610	Trichoplax sp. H2	355
<input type="checkbox"/>	A0A369S8X0	A0A369S8X0_9METZ		Opsin-5	TrispH2_005498	Trichoplax sp. H2	362
<input type="checkbox"/>	A0A369RYJ5	A0A369RYJ5_9METZ		Opsin, ultraviolet-sensitive	TrispH2_008976	Trichoplax sp. H2	354
<input type="checkbox"/>	A0A369S878	A0A369S878_9METZ		Blue-sensitive opsin	TrispH2_006618	Trichoplax sp. H2	405
<input type="checkbox"/>	A0A369SDJ4	A0A369SDJ4_9METZ		Vertebrate ancient opsin	TrispH2_003705	Trichoplax sp. H2	352
<input type="checkbox"/>	A0A369RNN1	A0A369RNN1_9METZ		Opsin Rh6	TrispH2_012172	Trichoplax sp. H2	272
<input type="checkbox"/>	A0A369RY68	A0A369RY68_9METZ		Blue-sensitive opsin	TrispH2_008974	Trichoplax sp. H2	265
<input type="checkbox"/>	A0A369S7J9	A0A369S7J9_9METZ		Green-sensitive opsin-2	TrispH2_006603	Trichoplax sp. H2	391
<input type="checkbox"/>	A0A369RW13	A0A369RW13_9METZ		Blue-sensitive opsin	TrispH2_010697	Trichoplax sp. H2	346
<input type="checkbox"/>	A0A369S4I4	A0A369S4I4_9METZ		Opsin-5	TrispH2_007473	Trichoplax sp. H2	336

Многообразие «Blue-sensitive opsin» с разной длиной (aa) хорошо согласуется с многообразием длин волн областей «Blue», которые в значительной степени порождаются разнообразием индуцированных ими биохимических реакций, что хорошо согласуется с принципом «необходимого разнообразия» в биологических системах в условиях воздействия световых стимулов с разным спектральным цветом [1].

При выборе длин волн световых стимулов для *Trichoplax* sp. H2 нормирование спектрального цвета света по диапазонам длин волн имеет принципиальное методическое значение. База данных UniProt предоставляет уникальную возможность определить участие каждого опсина в биологических процессах. Так, по данным UniProt, родопсин Rh6 принимает участие в следующих биологических процессах:

- клеточной реакции на световой раздражитель;
- зависимости циркадных часов от фотопериодов (соотношение между темным и светлым временем суток);
- пути передачи сигналов рецептора, сопряженного с G-белком;
- отрицательной регуляции транскрипции РНК-полимеразой;
- фототрансдукции;
- связи белок-хромофор;
- чувственном восприятии звука;
- термотаксисе;
- зрительном восприятии.

Светочувствительные опсины имеют колоколообразную кривую поглощения с четко выраженным максимальным поглощением на определенной длине волны. Эти значения некоторых опсинов приведены в базе UniProt (табл. 3).

Таблица 3

**Светочувствительные опсины из базы UniProt и
длины волн максимального поглощения света**

Название опсинов	Длина волны, на которой регистрируется максимальное поглощение света $A_{bs}(\max)$	Примечание
Green-sensitive opsin	508 нм	опсин, чувствительный к зеленому
Blue-sensitive opsin (377aa, 361aa, 354aa, 351aa, 348aa)	439 нм, 455 нм, 416 нм, 441 нм, 420 нм	опсин, чувствительный к синему
Violet-sensitive opsin	415 нм	опсин, чувствительный к фиолетовому
Opsin, ultraviolet-sensitive	353 нм	опсин, чувствительный к ультрафиолету

Как видно из таблицы 3, «Blue-sensitive opsin» имеет значения $A_{bs}(\max)$ не соответствующие узкой области голубого света, которая приведена на диаграмме цветности CIE (рис. 2).

Также в базе данных UniProt не обнаружены геномы «Cyan-sensitive opsin [Trichoplax sp. H2]». Каждое английское название светочувствительных опсинов имеет адекватный перевод на русский язык, так как для каждого опсина однозначно определено значение $A_{bs}(\max)$, которое принадлежит только одной области на диаграмме цветности CIE. Это и есть физическое ограничение, не допускающее двойного толкования названия спектрального цвета. Поэтому в научной работе при определении спектрального цвета необходимо руководствоваться рекомендациями МКО по диаграмме цветности CIE, что позволит исключить некорректные трактовки термина «Blue-sensitive opsin» и методические ошибки при проведении исследований. Так, в работе [24] светочувствительные опсины «Blue-sensitive opsin» - RDD39212.1 (длина -

265aa), RDD42761.1 (длина - 405aa), RDD46411.1 (длина - 367aa) и RDD38730.1 (длина - 346aa) аннотированы как опсины, чувствительные к голубому свету, а не к синему. В своих работах многие биофизики стараются указать значения длин волн с высокой точностью, не обозначая (определяя) их спектрального цвета. Например, в работе [25] по исследованию гребневиков *Mnemiopsis* sp. указаны значения биолюминесценции - 495 ± 1 нм, 496 ± 1 нм или 485 нм без привязки к спектральному цвету. В соответствии с диаграммой цветности CIE указанные значения биолюминесценции не находятся в области голубого света, как это указано в работе [24]. Для исключения путаницы в спектральных цветах и методических ошибок существуют нормативные документы, в основе которых лежит диаграмма цветности CIE. Основные спектральные цвета этой диаграммы имеют основополагающее значение для живой природы.

Синий свет является центром пересечения интересов биологов, офтальмологов, светотехников и гигиенистов, так как он индуцирует биохимические процессы в клетках, фотосинтез, управление циркадными ритмами (через меланопсин), фотохимическими процессами в сетчатке глаза. Длина волны синего света 455 ± 5 нм положена в основу производства светодиодов, излучающих белый свет (синий + желтый = белый). На рис. 3 приведен спектр света светодиода, излучающего белый свет по схеме Ньютона.

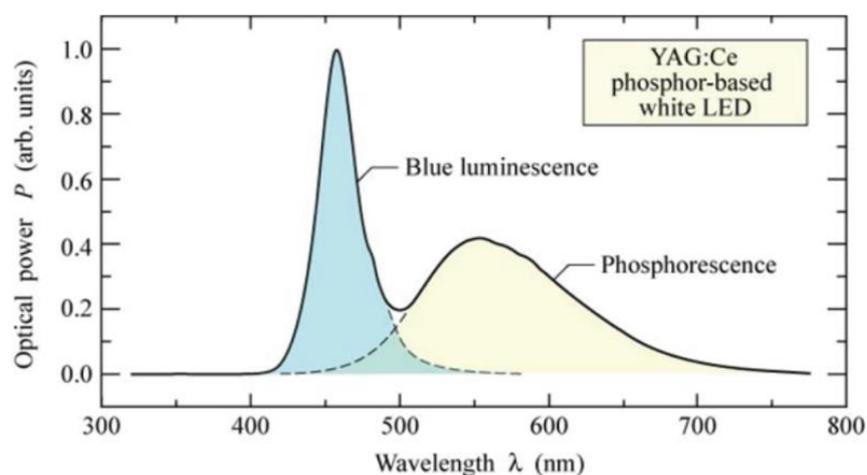


Рис. 3. Паттерн спектра белого светодиода [26]

Гигиенические аспекты негативного влияния выброса синего света в паттерне спектра света от искусственных источников на зрительный анализатор человека рассмотрены в работе [1]. Максимальный выход люминесценции по закону С.И. Вавилову вызывает фотохимическое поражение клеток сетчатки при превышении пороговых значений дозы облучения.

В растениях для поглощения солнечной энергии используется два пигмента: хлорофилл *a* и хлорофилл *b*, каждый из них активен в определенных участках видимого спектра - в синей области (менее 475 нм) и в красной области (более 620 нм) (рис. 4).

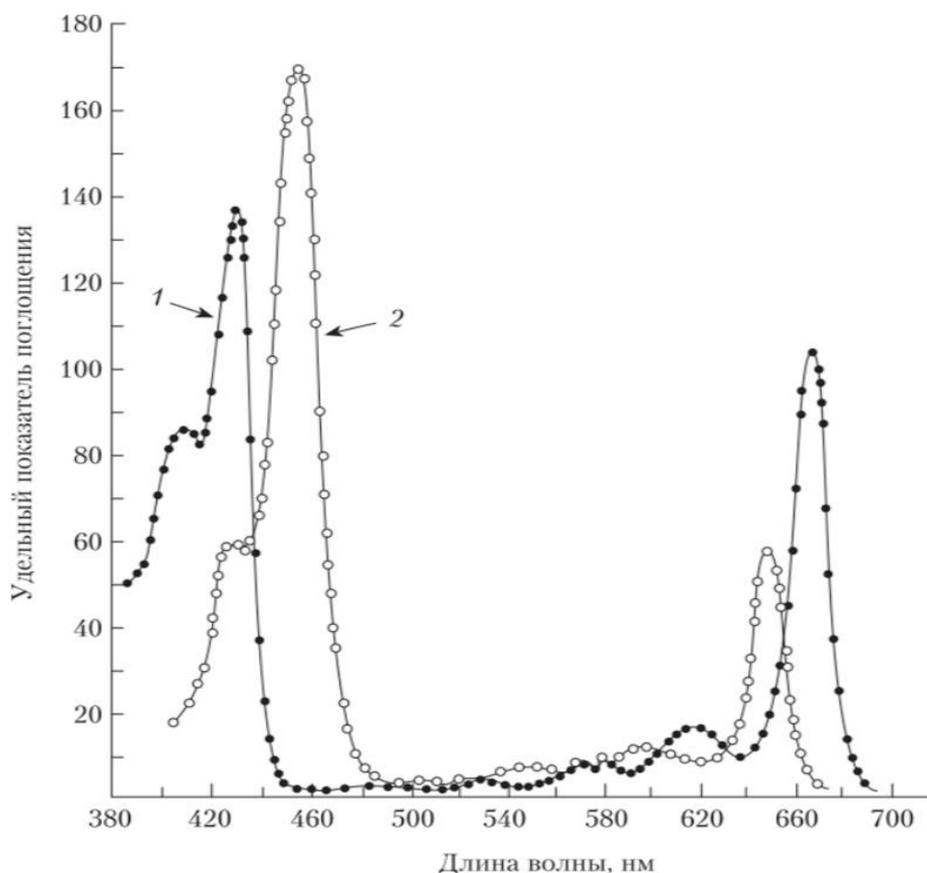


Рис. 4. Спектры поглощения хлорофиллов *a* (1) и *b* (2) [27]

Из биологии известно, что красный свет 670 нм влияет на процессы формообразования и повышает энергию митохондрий [1].

Для гигиены света очень важно знать, как влияет красный свет 630-670 нм на биологические процессы, протекающие в клетке и реакцию животного в целом. Распознавание оттенков красного очень важно для стратегии его выживания. Например, красный свет 630–650 нм прошивает в зрительных структурах как цвет опасности; при этом срабатывает схема: вижу свет и без задержки определяю его цвет [1]. При этом гигиенистам, работающим на транспорте, важно понимать, какие биохимические и биофизические процессы происходят в клетках и в организме в целом. Подходит ли модельное животное

Trichoplax sp. H2 для решения задач в области транспортной гигиены? К таким задачам относятся:

- механизм ослепления при прямом воздействии источника света с последующей поведенческой дезорганизацией и принятие осмысленного решения к действию;

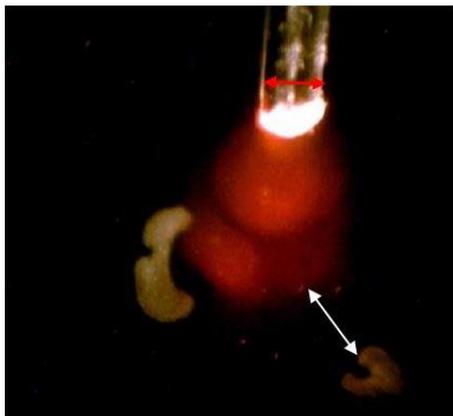
- механизм обнаружения цвета света и поведенческая реакция на него.

С гигиенической точки зрения, важно исключить прямое воздействие источника излучения на сенсорную систему, а с точки зрения фотобезопасности – необходимо понимать поведенческую реакцию животного при прямом световом воздействии. В работе [10] модельные животные *Trichoplax* sp. H2 подвергались дозированному световому воздействию от зеленого лазера (532 нм) и от фонаря фиолетового света (395 нм). Фотоматериалы по воздействию красного света на поведение животного *Trichoplax* sp. H2 ранее не публиковались.

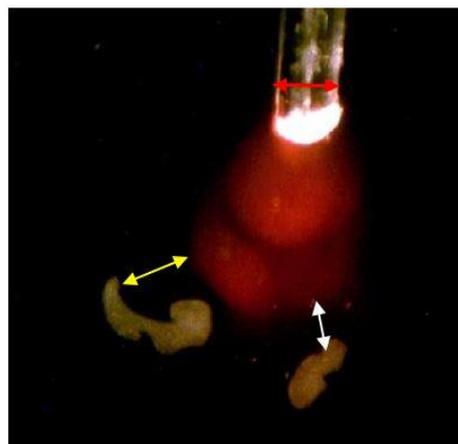
При работе с модельным животным *Trichoplax* sp. H2 [28] исследователи руководствовались принципом не воздействовать на клетки животного прямым световым лучом от лазера.

Поэтому световой стимул красного света подавался через оптоволокно в водную среду. При этом излучение попадало на край тела одного движущегося модельного животного *Trichoplax* sp. H2 (№2) и не попадало на тело животного (№1).

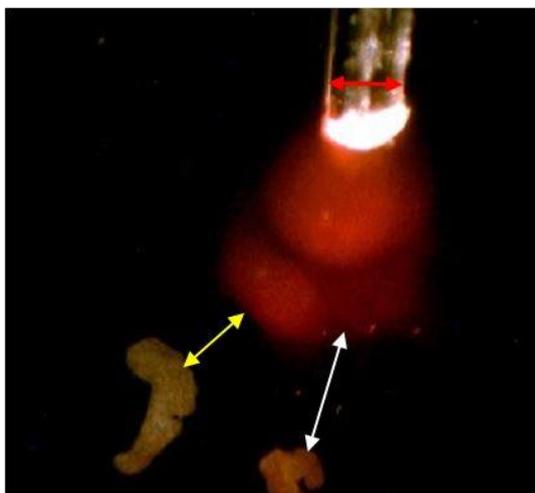
На рис. 5 приведены фрагменты движения *Trichoplax* sp. H2 под воздействием красного света 630-650 нм. Красная стрелка - диаметр оптоволоконна, желтая и белая стрелки показывают, как удалялись животные №1 и №2 от границы красного света 630-650 нм.



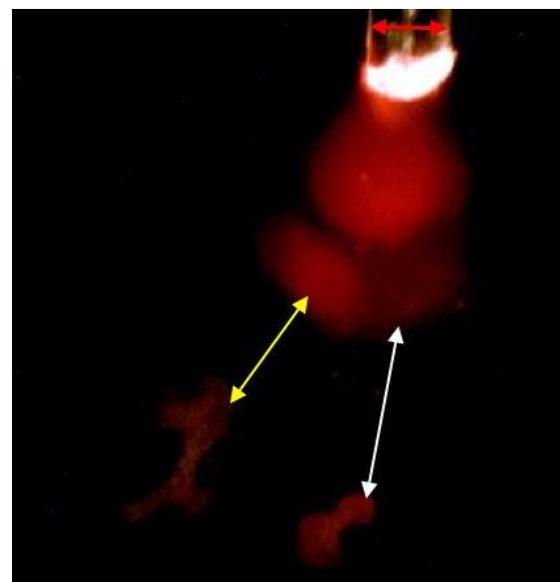
Животные двигались. Подали красный свет. Старт – начальное взаимное расположения границы красного света и тел животных *Trichoplax sp. H2*



Движение животных началось, при этом меняется расстояние от границы до края тела *Trichoplax sp. H2*



Trichoplax sp. H2 уходят от границы красного света



Животные продолжают уходить от границы красного света

Рис. 5. Фрагменты движения *Trichoplax sp. H2* от источника красного света 630-650 нм, который подавался через одиночное оптоволокно, взятое из пучка волокон

Лазер красного света 630-650 нм мощностью 5 мвт светил в торец пучка (Д пучка =10 мм, площадь торца = 78,5мм²). Время воздействия стимула - 20 минут. Ускоренная реакция двух животных *Trichoplax sp. H2* на красный свет зафиксирована в фильме <https://www.youtube.com/watch?v=ADkFtKL0C8U>.

В эксперименте каждый из испытуемых животных *Trichoplax* sp. H2 передвигался по оригинальной траектории движения от красного источника света.

Испытуемый №1 (мелкий) по инерции сначала приблизился, а затем быстро отдалялся от края источника красного света по краю створа его распространения.

Испытуемый №2 (крупный-зрелый) быстро отодвинул часть тела, на которую попал красный свет, а затем выбрал более короткий путь от красного света и ушел в сторону от границы створа распространения красного света.

На рис. 6 приведены обобщенные траектории непрерывного движения двух животных (№1 и 2) *Trichoplax* sp. H2 от красного света 630-650 нм.

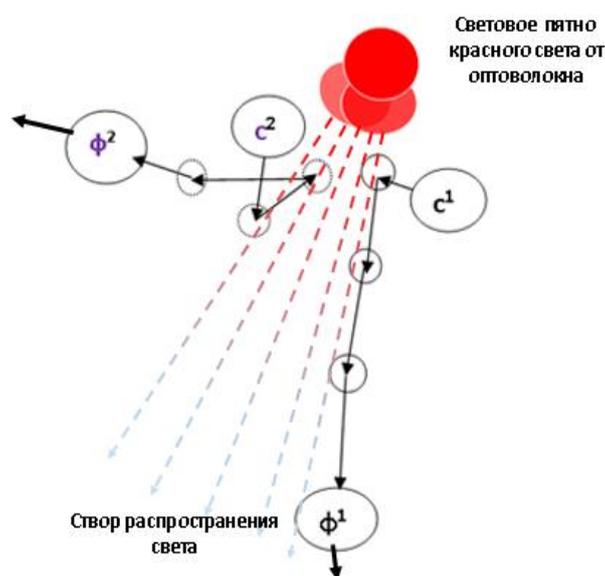


Рис. 6. Траектории движения двух животных (№1 и №2) *Trichoplax* sp. H2 от красного света 630-650 нм

С - начало движения животного *Trichoplax* sp. H2 №1 или №2

Φ - движение продолжается, но уже в области, не освещенной красным светом

Представленные данные показали, что животное *Trichoplax* sp. H2 имеет отрицательный фототаксис к красному свету 630-650 нм.

При наличии генов опсинов Rh6, меланопсина (чувствительного к свету в широком диапазоне длин волн), триптофана, серотонина, каналов мелатонина можно уверенно предположить, что у животного *Trichoplax* sp. H2 есть циркадные ритмы. Исследования RGB-фототаксиса *Trichoplax* (Placozoa) и кинезис его клеток могут явиться теоретической основой для понимания как

простые беспозвоночные животные интегрируют информацию из сложной световой среды, при отсутствии в них традиционной архитектуры обработки информации, такой как нервная система. Результаты исследования об открытии RGB-фототаксиса *Trichoplax* (Placozoa) были представлены на XVI Международной научной конференции «Актуальные вопросы биологической физики и химии», БФФХ-2021, г.Севастополь, 13-17 сентября 2021 г. [29].

Выводы:

1. Для того чтобы избежать методических ошибок при организации исследований по определению поведенческой реакции животного *Trichoplax* sp. H2, важно правильно определить, к какому спектральному цвету принадлежат обнаруженные гены светочувствительных опсинов, и длину волны, при которой происходит максимальное поглощение ими фотонов.
2. Установлено, что модельное животное *Trichoplax* sp. H2 способно выбирать поведенческие реакции к монохромному свету, которые позволяют использовать их для решения задач транспортной гигиены.
3. Доказано, что *Trichoplax* sp. H2 имеет выраженный отрицательный фототаксис к красному монохромному свету.
4. Необходимо продолжить исследования биохимических механизмов селективного поведения животного *Trichoplax* sp. H2 при воздействии RGB-световых стимулов в интересах транспортной гигиены.

Список литературы:

1. Капцов В.А., Дейнего В.Н. Эволюция искусственного освещения: взгляд гигиениста. В. А. Капцов, В. Н. Дейнего; под ред. М. Ф. Вильк, В. А. Капцова. М.: РАН, 2021.
2. Human Physiological Responses to Light Meeting Report. July 19th, 2016 Washington, D.C. U.S. Department of Energy Solid-State Lighting Program. SSLS, Inc. Navigant. September 2016.
3. Bernd Schierwate. Hans-Jürgen Osigus, Tjard Bergmann, Neil W. Blackstone, Heike Hadrys, Jens Hauslage, Patrick O. Humbert, Kai Kamm, Marc Kvensakul, Kathrin Wysocki, Rob DeSalle The enigmatic Placozoa part 1: Exploring evolutionary controversies and poor ecological knowledge *BioEssays*. 2021;2100080 DOI: 10.1002/bies.20210008

4. Bernd Schierwate, Hans-Jürgen Osigus, Tjard Bergmann, Neil W. Blackstone, Heike Hadrys, Jens Hauslage, Patrick O. Humbert, Kai Kamm, Marc Kvensakul, Kathrin Wysocki, Rob DeSalle The enigmatic Placozoa part 2: Exploring evolutionary controversies and promising questions on earth and in space *BioEssays*. 2021;2100083. DOI: 10.1002/bies.202100083
5. Kai Kamm, Hans-Jürgen Osigus, Peter F. Stadler, Rob DeSalle, and Bernd Schierwate Trichoplax genomes reveal profound admixture and suggest stable wild populations without bisexual reproduction *Scientific REPOrTS*. (2018) 8:11168. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-29400-y>
6. Thomas J. Bruno, Paris D. N. Svoronos. *CRC Handbook of Fundamental Spectroscopic Correlation Charts*. CRC Press, 2005.
7. Hunt R. W. C. *The Reproduction of Colour*. 6th edition. John Wiley & Sons, 2004; 4—5: 724. ISBN 978-0-470-02425-6.
8. AVT Color measurement fundamentals series: Pat1 avt-ine.com
9. Levent Sahin ,Mariana G Figueiro Alerting effects of short-wavelength (blue) and long-wavelength (red) lights in the afternoon *Physiol Behav*. 2013; 27:116-117 doi:10.1016/j.physbeh.2013.03.014.
10. Прытков С. В. Основы светотехники и колориметрии: учеб. пособие [Электронный ресурс]. Саранск.: Издательство Мордовского университета; 2019. ISBN 978-5-7103-3848-3
11. ГОСТ Р 55703—2013. ИСТОЧНИКИ СВЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ. Методы измерений спектральных и цветовых характеристик. Дата введения — 2014—07—01
12. Chromaticity - Ocean Optics Web Book <https://www.oceanopticsbook.info/view/photometry-and-visibility/chromaticity>
13. ГОСТ Р 56057-2014. Системы светооптические светодиодные для железнодорожной светофорной сигнализации. Общие технические требования и методы испытаний
14. ГОСТ 33385-2015. Дороги автомобильные общего пользования. ДОРОЖНЫЕ СВЕТОФОРЫ. Технические требования.
15. Капцов В.А., Дейнего В.Н., Козырицкий Д.В. Rgb-таксис trichoplax (placozoa) как новый метод гигиенических исследований. *Медицина труда и экология человека*. 2021;1:6-22

16. Koch, Thomas Lund. Molecular evolution of peptide signaling in Placozoa and Cnidaria. Department of Biology, Faculty of Science, University of Copenhagen, 2020. 392 s.
17. Harald R. Gruber-Vodicka, Nikolaus Leisch, Manuel Kleiner, Tjorven Hinzke, Manuel Liebeke, Margaret McFall-Ngai, Michael G. Hadfield and Nicole Dubilier Two intracellular and cell type-specific bacterial symbionts in the placozoan *Trichoplax* H2. *Nature Microbiology*. 2019;4:1465–1474 www.nature.com/naturemicrobiolog
18. Genome analyses of a placozoan rickettsial endosymbiont show a combination of mutualistic and parasitic traits Kai Kamm, Hans-Jürgen Osigus¹, Peter F. Stadler, Rob DeSalle & Bernd Schierwater *Scientific Reports*. 2019; 9:17561 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54037-w>
19. Leonid L. Moroz¹, and Andrea B. Kohn Unbiased View of Synaptic and Neuronal Gene Complement in Ctenophores: Are There Pan-neuronal and Pan-synaptic Genes across Metazoa? *Integr. Comp. Biol.* 2015 Dec;55(6):1028-49. doi: 10.1093/icb/icv104. Epub 2015 Oct 9.
20. Никитин М. Нейротрансммиттеры и их функции у трихоплакса - животного без нервной системы. <https://www.youtube.com/watch?v=OwnA4oFro0w>.
21. Справочник химика. Химия и химическая технология. Фенилаланин гидроксилаза <https://www.chem21.info/info/283537/>
22. Rozanski A, Moon H, Brandl H, Martin-Duran JM, Grohme MA, Huttner K, Bartscherer K, Henry I and Rink JC (2019) PlanMine 3.0-improvements to a mineable resource of flatworm biology and biodiversity. *Nucleic Acids Res* 47, D812–D820
23. Arunabha Sarkar, Namita Mukundan, Sai Sowndarya, Vinay Kumar Dubey, Rosana Babu, Vairavan Lakshmanan, Kannan Rangiah, Mitradas M. Panicker, Dasaradhi Palakodeti, Sabarinath Peruvemba Subramanian and Ramaswamy Subramanian. Serotonin is essential for eye regeneration in planaria *Schmidtea mediterranea*. *FEBS Letters*. 2019; 593(22): 3198–3209.
24. Хавронюк И.С., Мамонов А.А., Булков В.А. Воронин Д.П., Кузнецов А.В. Присвоение функций опсинам трихоплаксов *Trichoplax adhaerens* *Trichoplax* sp. H2. *Актуальные вопросы биологической физики и химии*. 2021; 6(4): 686-694.

25. Christine E Schnitzler, Kevin Pang. Genomic organization, evolution, and expression of photoprotein and opsin genes in *Mnemiopsis leidyi*: a new view of ctenophore photocytes Schnitzler et al. *BMC Biology*. 2012;10: 107
26. Jan LÁTAL, Petr KOUDELKA, Vladimír VAŠINEK, František DOSTÁL, Karel SOKANSKÝ Possible use of power LEDs for lighting and communication PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 87 NR 4/2011
27. Фотосинтетические пигменты. Свойства пигментов. https://studme.org/328680/geografiya/fotosinteticheskie_pigmenty
28. Капцов В.А., Дейнего В.Н., Козырицкий Д.В. Селективная поведенческая реакция на RGB-световые стимулы. *Актуальные вопросы биологической физики и химии*. 2021; 6(4): 400-408
29. Козырицкий Д.В. в соавторстве. Селективная поведенческая реакция *Trichoplax* (Placozoa) на RGB-световые стимулы. Материалы XVI Международной научной конференции «Актуальные вопросы биологической физики и химии». Севастополь, 2021.

References:

1. Kaptsov V. A, Deinogo V. N. Evolution of artificial lighting: the view of a hygienist. V. A. Kaptsov, V. N. Deinogo; ed. M.F.Vilk, V.A.Kaptsova. M.: RAS, 2021.
2. Human Physiological Responses to Light Meeting Report. July 19th, 2016 Washington, D.C. U.S. Department of Energy Solid-State Lighting Program.SSLs, Inc. Navigant. September 2016.
3. Bernd Schierwate. Hans-Jürgen Osigus, Tjard Bergmann, Neil W. Blackstone, Heike Hadrys, Jens Hauslage, Patrick O. Humbert, Kai Kamm, Marc Kvensakul, Kathrin Wysocki, Rob DeSalle The enigmatic Placozoa part 1: Exploring evolutionary controversies and poor ecological knowledge *BioEssays*. 2021; 2100080 DOI: 10.1002/bies.20210008
4. Bernd Schierwate. Hans-Jürgen Osigus, Tjard Bergmann, Neil W. Blackstone, Heike Hadrys, Jens Hauslage, Patrick O. Humbert, Kai Kamm, Marc Kvensakul, Kathrin Wysocki, Rob DeSalle The enigmatic Placozoa part 2: Exploring evolutionary controversies and promising questions on earth and in space *BioEssays*. 2021;2100083. DOI: 10.1002/bies.202100083
5. Kai Kamm, Hans-Jürgen Osigus, Peter F. Stadler, Rob DeSalle, and Bernd Schierwate *Trichoplax* genomes reveal profound admixture and suggest stable

- wild populations without bisexual reproduction *Scientific REPOrTS*. (2018) 8:11168 | DOI:10.1038/s41598-018-29400-
6. Thomas J. Bruno, Paris D. N. Svoronos. *CRC Handbook of Fundamental Spectroscopic Correlation Charts*. CRC Press, 2005.
 7. Hunt R. W. C. *The Reproduction of Colour*. 6th edition. John Wiley & Sons, 2004; 4—5: 724. ISBN 978-0-470-02425-6.
 8. AVT Color measurement fundamentals series: Pat1 avt-ine.com
 9. Levent Sahin ,Mariana G Figueiro Alerting effects of short-wavelength (blue) and long-wavelength (red) lights in the afternoon *Physiol Behav*. 2013; 27:116-117 doi:10.1016/j.physbeh.2013.03.014.
 11. GOST R 55703—2013 ELECTRIC LIGHT SOURCES Methods for measuring spectral and color characteristics. Date of introduction - 2014—07—01
 12. Chromaticity - Ocean Optics Web Book <https://www.oceanopticsbook.info/view/photometry-and-visibility/chromaticity>
 13. GOST R 56057-2014 Light-optical LED systems for railway traffic signaling. General technical requirements and test methods
 14. GOST 33385-2015 Automobile roads for general use ROAD LIGHTS Technical requirements
 15. Kaptsov V.A., Deinogo V.N., Kozyritsky D.V. Rgb taxis trichoplax (placozoa) as a new method of hygienic research. *Occupational health and human ecology*. 2021; 1: 6-22
 16. Koch, Thomas Lund. / Molecular evolution of peptide signaling in Placozoa and Cnidaria. Department of Biology, Faculty of Science, University of Copenhagen, 2020. 392 p.
 17. Harald R. Gruber-Vodicka, Nikolaus Leisch, Manuel Kleiner, Tjorven Hinzke, Manuel Liebeke, Margaret McFall-Ngai, Michael G. Hadfield and Nicole Dubilier Two intracellular and cell type-specific bacterial symbionts in the placozoan *Trichoplax* H2. *Nature Microbiology*. 2019;4:1465–1474 www.nature.com/naturemicrobiolog
 18. Genome analyses of a placozoan rickettsial endosymbiont show a combination of mutualistic and parasitic traits Kai Kamm, Hans-Jürgen Osigus¹, Peter F. Stadler , Rob DeSalle & Bernd Schierwater *Scientific Reports*. 2019; 9:17561 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54037-w>
 19. Leonid L. Moroz¹, and Andrea B. Kohn Unbiased View of Synaptic and Neuronal Gene Complement in Ctenophores: Are There Pan-neuronal and Pan-synaptic

- Genes across Metazoa? *Integr. Comp. Biol.* 2015 Dec;55(6):1028-49. doi: 10.1093/icb/icv104. Epub 2015 Oct 9.
20. Nikitin M. Neurotransmitters and their functions in *Trichoplax* - an animal without nervous systems. <https://www.youtube.com/watch?v=OwnA4oFro0w>.
21. Chemist's Handbook. Chemistry and chemical technology. Phenylalanine hydroxylase <https://www.youtube.com/watch?v=OwnA4oFro0w>
22. Rozanski A, Moon H, Brand H, Martín-Duran JM, Grohme MA, Huttner K, Bartscherer K, Henry I and Rink JC (2019) Plan Mine 3.0-improvements to a mineable resource of flatworm biology and biodiversity. *Nucleic Acids Res* 47, D812–D820
23. Arunabha Sarkar, Namita Mukundan, Sai Sowndarya, Vinay Kumar Dubey, Rosana Babu, Vairavan Lakshmanan, Kannan Rangiah, Mitradas M. Panicker, Dasaradhi Palakodeti, Sabarinath Peruvemba Subramanian and Ramaswamy Subramanian. Serotonin is essential for eye regeneration in planaria *Schmidtea mediterranea*. *FEBS Letters*. 2019; 593(22): 3198–3209.
24. Khavronyuk I.S., Mamonov A.A., Bulkov V.A. Voronin D.P, Kuznetsov A.V. Prisyoyeniye funktsiyopsinamtrikhoplaksov *Trichoplax adhaerens* *Trichoplax* sp. N2. *Aktual'nyye voprosy biologicheskoy fiziki i khimii*. 2021 6(4):686-694
25. Christine E Schnitzler, Kevin Pang. Genomic organization, evolution, and expression of photoprotein and opsin genes in *Mnemiopsis leidyi*: a new view of ctenophore photocytes Schnitzler et al. *BMC Biology*. 2012;10: 107.
26. Jan LÁTAL, Petr KOUDELKA, Vladimír VAŠINEK, František DOSTÁL, Karel SOKANSKÝ Possible use of power LEDs for lighting and communication PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 87 NR 4/2011
27. Fotosinteticheskiye pigmenty. Svoystva pigmentov. https://studme.org/328680/geografiya/fotosinteticheskie_pigmenty
28. Kaptsov V.A., Deynego V.N., Kozyritskiy D.V. Selektivnaya poveden'cheskaya reaktsiya na RGB-svetovyye stimuly. *Aktual'nyye voprosy biologicheskoy fiziki i khimii*. 2021: 6(4): 400-408.
29. Kozyritskiy D.V. v soavtorstve Doklad «Selektivnaya poveden'cheskaya reaktsiya *Trichoplax* (Placozoa) na RGB-svetovyye stimuly» na XVI Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Aktual'nyye voprosy biologicheskoy fiziki i khimii» BFFKH - 2021g. Sevastopol', 13-17 sentyabrya 2021g.

Поступила/Received: 04.10.2021

Принята в печать/Accepted: 20.10.2021