

Капцов В.А.<sup>1</sup>, Дейнего В.Н.<sup>1</sup>, Козырицкий Д.В.<sup>2</sup>

## RGB-фототаксис *Trichoplax* (Placozoa) и кинезис его клеток

<sup>1</sup>ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт гигиены транспорта» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 125438, Москва, Россия;

<sup>2</sup>ГБОУ «Центр дополнительного образования "Малая академия наук"», 299055, Севастополь, Россия

**Введение.** Морское животное *Trichoplax* (Placozoa), имеющее простейшую организацию среди беспозвоночных, но со специфичным движением тела и его клеток, является модельным животным для изучения различных биофизических и химических процессов, реакций на внешние стимулы. В статьях специалистов ряда университетов в гипотетической и декларативной форме освещена проблема фототаксиса *Trichoplax* (Placozoa), но нет конкретных исследований по поведенческой реакции этого простейшего животного и его клеток на монохромные световые сигналы с разными длинами волн, которые характерны для его световой среды обитания на глубине от 5 до 20 м.

**Материалы и методы.** Исследования проводили на лабораторных животных *Trichoplax* spp. H2. Исследования поведенческой реакции *Trichoplax* выполняли с использованием современных методов оптической микроскопии: оптического микроскопа Nikon Eclipse Ts2R-FI; оптических микроскопов Nikon SMZ-1270, Stemi 305; оптического микроскопа «Леонардо 3.0», специально разработанного под проект и позволяющего одновременно наблюдать поведение группы *Trichoplax* и каждого *Trichoplax* этой группы при низком уровне освещённости и стабильной температуре водной среды его обитания. В микроскопе были применены две веб-камеры — верхняя с матрицей 1,9 Мп и нижняя — 5 Мп.

**Результаты.** Проведён теоретический анализ спектрального состава света и степени его поляризации в морской среде обитания простейшего многоклеточного животного *Trichoplax* (Placozoa), а также особенностей его генно-клеточного строения. Исходя из законов гидрооптики и стратегии выживания «пища — жертва» определены координатные оси световой среды для *Trichoplax* (световая вертикаль (395 нм) и две горизонтальные световые оси — отражённый горизонтальный свет от пищи (зелёный — 532 нм) и исходящий от арагонитового панциря хищника моллюска флуоресцентный свет (красный — 630 нм). На основании реакций животного на эти RGB-световые стимулы высказана и подтверждена гипотеза о наличии RGB-фототаксиса у *Trichoplax* и кинезиса его клеток. Для управления *Trichoplax* выбраны монохромные световые сигналы: красный (630 нм), зелёный (532 нм) и синий (395 нм).

**Ограничения исследования.** При изучении *Trichoplax* (Placozoa) была исследована поведенческая реакция этого животного и его клеток на монохромные световые сигналы с разными длинами волн с использованием современных методов оптической микроскопии, позволяющими одновременно наблюдать поведение как группы *Trichoplax*, так и каждого животного этой группы при низком уровне освещённости и стабильной температуре водной среды его обитания.

**Заключение.** Впервые с помощью световых сигналов проведено управление поведением *Trichoplax* и его клетками, а также доказано наличие у *Trichoplax* RGB-фототаксиса и кинезиса у его клеток. Открытие RGB-таксиса *Trichoplax* (Placozoa) изменяет сложившиеся научные представления в области эволюции цветного зрения у животных *Trichoplax* (Placozoa) и зрительного анализатора человека и функционирования его шишковидной железы. Представленный метод может использоваться в гигиенических исследованиях влияния внешних загрязнителей на окружающую среду, а также воздействия света на шишковидную железу человека.

**Ключевые слова:** световые стимулы; *Trichoplax*; кристаллические клетки; арагонит; шишковидная железа; кристаллы кальцита; фототаксис; триптофан; серотонин; нейропептидная сеть; циркадные ритмы

**Соблюдение этических стандартов.** Все исследования одобрены Комитетом по биомедицинской этике ФГУП ВНИИЖГ (Протокол № 3 от 09.09.2021 г.) в соответствии с принципами Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» (с поправками 2008 г.), «Правилами клинической практики в Российской Федерации» (утв. Приказом Минздрава России от 19.06.2003 г. № 266).

**Для цитирования:** Капцов В.А., Дейнего В.Н., Козырицкий Д.В. RGB-фототаксис *Trichoplax* (Placozoa) и кинезис его клеток. *Гигиена и санитария*. 2022; 101(1): 6-13. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-1-6-13>

**Для корреспонденции:** Капцов Валерий Александрович, доктор мед. наук, профессор, член-корреспондент РАН, руководитель отдела гигиены труда ФГУП «Всероссийский НИИ гигиены транспорта» Роспотребнадзора, 125438, Москва. E-mail: karpovva39@mail.ru

**Участие авторов:** Капцов В.А. — оценка корректности гипотезы, методики проведения эксперимента и обсуждение результатов; Дейнего В.Н. — обсуждение гипотезы на этапе её формирования, техническая помощь в подготовке оборудования, участие в эксперименте; Козырицкий Д.В. — выдвижение гипотезы и разработка оборудования, проведение эксперимента, формирование фильма по результатам эксперимента. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила: 11.03.2021 / Принята к печати: 25.11.2021 / Опубликовано: 09.02.2022

Valery A. Kaptsov<sup>1</sup>, Vitaly N. Deynego<sup>1</sup>, Daniil V. Kozyrtsky<sup>2</sup>

## Selective behavioral response of *Trichoplax* (Placozoa) to RGB-light stimuli

<sup>1</sup>All-Russian Research Institute of Transport Hygiene of the Federal Service for Supervision in Protection of the Rights of Consumer and Man Wellbeing, Moscow, 125438, Russian Federation;

<sup>2</sup>Sevastopol Junior Academy of Sciences, Sevastopol, 299055, Russian Federation

**Introduction.** The marine animal *Trichoplax* (Placozoa), which has the animalcular organization among invertebrates, but with outstanding social behaviour and specific movement of the body and its cells, is a model animal for studying various biophysical and chemical processes, including responses to external stimuli. In the articles of specialists from many universities, the problem of *Trichoplax* phototaxis (Placozoa) is covered in a hypothetical and declarative form. However, there are no specific studies on the behavioural response of these protozoa and their cells to monochrome light signals with different wavelengths that are characteristic of its light habitat at a depth of 5 to 20 meters.

**Materials and methods.** The studies were conducted on laboratory animals *Trichoplax* sp. H2. Studies of the behavioural response of *Trichoplax* were performed using modern methods of optical microscopy: Nikon Eclipse Ts2R-FI Optical Microscope; optical microscopes: Nikon SMZ-1270, Stemi 305; An optical microscope

## Original article

“Leonardo 3.0” (specially designed for the project) allows simultaneously observing the behaviour of a group of *Trichoplax* and each *Trichoplax* of this group at a low level of illumination and a stable temperature of its aquatic habitat. Two web cameras were used in the microscope—the upper one with a 1.9 Mp matrix and the lower one — 5 Mp).

**Results.** The theoretical analysis of the spectral composition of light and the degree of its polarization in the marine habitat of the protozoan multicellular animal *Trichoplax* (Placozoa) and the features of its gene-cell structure is carried out. Based on the laws of hydrooptics and the survival strategy (“food-prey”), the coordinate axes of the light-medium for *Trichoplax* are determined (the light vertical (395 nm) and two horizontal light axes — the reflected horizontal light from the food (green — 532 nm) and the fluorescent light coming from the aragonite shell of the predator mollusc (red — 630 nm). Based on the animal’s responses to these RGB light stimuli, the hypothesis of RGB phototaxis in *Trichoplax* and the kinesis of its cells was expressed and confirmed. The monochrome light signals red — 630 nm, green — 532 nm and blue — 395 nm are selected for *Trichoplax* control.

**Limitations of the study.** In the study of *Trichoplax* (Placozoa), the behavioural response of this animal and its cells to monochrome light signals with different wavelengths was studied using modern optical microscopy methods, which make it possible to simultaneously observe the behaviour of both the *Trichoplax* group and each animal of this group at a low level of illumination and stable temperature of its aquatic environment.

**Conclusion.** For the first time, the behaviour of *Trichoplax* and its cells was controlled using light signals, and the presence of RGB phototaxis and kinesis in its cells was also proved in *Trichoplax*. The discovery of the RGB-taxis *Trichoplax* (Placozoa) changed the established scientific ideas in the evolution of colour vision in animals *Trichoplax* (Placozoa) and the human visual analyzer functioning of its pineal gland. The presented method can be used in hygienic studies of the influence of external pollutants on the environment and the effect of light on the human pineal gland.

**Keywords:** light stimuli; *Trichoplax*; crystal cells; aragonite; pineal gland; calcite crystals; phototaxis; tryptophan; serotonin; neuropeptide network; circadian rhythms

**Compliance with ethical standards.** All studies were carried out after approval in the prescribed manner by the Biomedical Ethics Committee of the All-Russian Research Institute of Transport Hygiene of the Federal Service for Supervision in Protection of the Rights of Consumer and Man Wellbeing (Protocol No. 3 of 09.09.2021) under the principles of the Declaration of Helsinki of the World Medical Association “Ethical principles for conducting scientific medical research involving humans” (as amended in 2008), “Rules of Clinical Practice in the Russian Federation” (approved by Order of the Ministry of Health of Russia dated June 19, 2003; No. 266).

**For citation:** Kaptsov V.A., Deynego V. N., Kozyritsky D.V. Selective behavioural response to *Trichoplax* (Placozoa) on RGB-light stimuli. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2022; 101(1): 6-13. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-1-6-13> (In Russian)

**For correspondence:** Valery A. Kaptsov, MD, PhD, DSci., Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Occupational Hygiene of the All-Russian Research Institute of Transport Hygiene All-Russian Research Institute of Transport Hygiene of Federal Service for Supervision in Protection of the Rights of Consumer and Man Wellbeing, Moscow, 125438, Russian Federation. E-mail: kapcovva39@mail.ru

**Information about authors:** Kaptsov V.A., <https://orcid.org/0000-0002-3130-2592>

**Contributions:** Kaptsov V.A. — Assessment of the correctness of the hypothesis and the methodology of the experiment and discussion of the results. Deynego V.N. — Discussion of the hypothesis at the stage of its formation. Technical assistance in the preparation of equipment, participation in experiments; Kozyritsky D.V. — Hypothesizing and developing equipment, experimenting, forming a film based on the experiment results. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

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

**Acknowledgement.** The study had no sponsorship.

Received: March 11, 2021 / Accepted: November 25, 2021 / Published: February 09, 2022

## Введение

Световая среда обитания животных (как позвоночных, так и беспозвоночных) в значительной степени влияет на их поведенческие реакции в пространстве и социуме, а также на их циркадные ритмы. Одним из ключевых факторов, влияющих на здоровье человека, является свет, который действует на шишковидную железу, ответственную за циркадные ритмы и синтез серотонина и мелатонина из триптофана. Шишковидная железа состоит из клеток с кристаллами кальцита и нейропептидной сети, которая связана с нейронами мозга человека. Одной из актуальных проблем гигиены является поиск простых и недорогих в содержании биологических объектов для проведения исследований по влиянию света на биохимические процессы, протекающие в системе «кристаллы кальцита и нейропептидная сеть». Такие животные найдены — это *Trichoplax*, которые представляют собой новые модельные организмы с огромным потенциалом для многих областей биологических, биомедицинских и гигиенических исследований [1]. Многоклеточные животные *Trichoplax* в своей структуре содержат кристаллические клетки кальцита, нейропептидную сеть, нейромедиатор серотонин, в них обнаружен триптофан и каналы для мелатонина. Изучение данного животного представляет интерес не только для специалистов по гигиене света, но и по гигиене труда, коммунальной гигиене, гигиене детей и подростков, гигиене питания как простая биологическая модель для проведения экспериментов по изучению неблагоприятных влияний на живые клетки. Специалисты считают, что этот вид может стать научной суперзвездой, несущей ключи к истокам развития многоклеточных животных, мозга и рака.

*Trichoplax* (Placozoa) — это простейшее многоклеточное животное, появившееся 780 млн лет назад и дожившее до наших дней. Представляет собой «блинчик» размером менее 2 мм, толщиной 25 мкм, состоящий из трёх слоёв клеток и обитающий в тёплых морях на глубине от 5 до 20 м [1].

С биологической точки зрения знания о его жизнестойкости, клеточном строении и межклеточном взаимодействии, а также о коллективном поведении имеют большую ценность для познания эволюционных процессов развития животных и человека. Поиск светочувствительной системы у *Trichoplax* и открытие у него RGB-таксиса приоткрывает тайны выживания и эволюции цветного зрения у многоклеточных организмов. Основное условие эволюции — выживание в среде обитания, которая характеризуется спектром света, пищевыми ресурсами, множеством хищников, концентрацией веществ и газов (Ca, Na, Mg, Ru) в воде, уровнем кислотности pH, температурой. Эволюционный закон выживания определяет клеточное строение животного, функциональное взаимодействие между клетками и симбионтами, а также поведенческую реакцию животного на воздействия (изменения концентрации веществ, химические, световые) окружающей среды. Изменение концентрации Ca и Mg в воде влияет на животное *Trichoplax*: оно распадается на клетки при уменьшении концентрации этих ионов или собирается из клеток вновь при возвращении концентрации веществ в норму. Выделяемые пищей вещества останавливают *Trichoplax* над ней с большой точностью. Животное *Trichoplax* выживает сотни миллионов лет в морской сине-зелёной световой среде. Это говорит о том, что сенсорная система *Trichoplax* и его строение отвечают закону необходимого разнообразия — для устойчивого существования биологической (в том числе кибернетической) системы необходимо, чтобы она обладала внутренним разнообразием, требуемым для блокирования любых внешних и внутренних возмущений [2]. Высокая жизнеспособность простейшего многоклеточного животного *Trichoplax* H2 при минимально необходимом внутреннем разнообразии определяется наличием:

- клеток (шесть типов клеток при их общем количестве около 50 000 штук);
- симбиотов (бактерии *Grellia incantans* G. и Рутмания);

- генов (геном *Trichoplax* включает 11,5 тыс. генов [3]);
- сенсоров — кристаллических клеток (0,2% от общего количества клеток).

Это минимальное разнообразие и привлекло внимание к простейшему животному *Trichoplax* исследователей из университетов многих стран, которые в основном изучают:

- генно-клеточное строение *Trichoplax*, типы клеток: вентральные эпителиальные; липофильные; железистые; волокнистые; дорсальные эпителиальные. Кристаллические клетки, содержащие кристалл арагонит, были открыты только в 2014 г. [4];
- процессы пищеварения, хемотаксиса и размножения *Trichoplax* [5];
- функционирование нейропептидной [6] системы и нейромедиаторов. Активно исследуется роль триптофана и серотонина в жизни *Trichoplax* [7];
- различные каналы (ионов кальция, натрия и сигнальных молекул NO). В кристаллических клетках обнаружены натриевые потенциалы действия [8], определяющие биомеханику движения тела животного и его клеток [9, 10]; система кристаллических клеток с кристаллами арагонита как гравитационные сенсоры [11, 12].

В то же время мы не нашли работ, в которых бы рассматривались вопросы фототаксиса и тем более RGB-таксиса. Проблема состоит в том, что сегодня отсутствует классификация сенсорных систем *Trichoplax*, а механизмы их действия малоизучены и полны противоречий.

Авторами проанализированы работы международного коллектива исследователей *Trichoplax* различных континентов. Инициаторами работ по изучению биологии *Trichoplax* (в частности, электрической активности его кристаллических клеток, нейропептидной системы и сигнальных молекул NO) являются Л. Мороз (Флоридский университет) с соавторами, российский специалист по пластинчатым М. Никитин (МГУ им. М.В. Ломоносова), а также сотрудники Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН Д. Романова и И. Смирнов [13–15]. Результаты ранних исследований *Trichoplax* изложены в книге Серавина Л.Н. и Гудкова А.В. [16]. Каролин Смит, нейробиолог из Национального института здоровья в Бетеседе (США, штат Мэриленд), и Томас Риз обнаружили в протонервной системе *Trichoplax* клетки, которые содержат разновидность минерального кристалла. Этот кристалл всегда опускается на «дно» клетки, независимо от того, в каком положении находится животное: стоит оно ровно, под наклоном или перевернуто. Таким образом, *Trichoplax* использует эти клетки, чтобы «почувствовать», где находится верх, а где низ [17]. Каролин Смит указывает, что кристаллические клетки являются частью протонервной системы *Trichoplax*. Это важное положение для понимания роли митохондрий в кристаллической клетке и влияния системы этих клеток на поведенческие реакции *Trichoplax*. Новые знания о строении и поведении *Trichoplax* открыла Конференция RESUMES INSCRIPTION AND SUBMISSION (12–16 апреля 2021 г., Роскофф, Франция). На ней с докладом «Клеточные типы *Placozoa* и их соответствие у других животных» выступила Татьяна Майорова — специалист по кристаллическим клеткам как гравитационным датчикам (NIH, Bethesda, США). Также считается, что *Trichoplax* движется по псевдослучайной траектории к пище и является необучаемым и неуправляемым животным [11]. Вопросам динамики движения клеток в теле *Trichoplax* уделяет большое внимание группа исследователей под руководством профессора Ману Пракаш (университет Стэнфорд, США) [9, 10]. В этих исследовательских центрах специалистами не рассматривались вопросы влияния водной световой среды на генно-клеточное формирование *Trichoplax* и его поведенческие реакции. Только в одной статье говорилось о том, что ночью в чашке Петри активность *Trichoplax* ограничена (они собираются в группу), а при свете они разбегаются [18]. Эффект «разбегания» группы *Trichoplax* под воздействием яркого искусственного светодиадного света (от подсветки предметного столика оптических

микроскопов) наблюдали многие исследователи, но при этом каждый давал свою трактовку этому эффекту [7, 19].

Эти исследователи в своих работах [19] отмечают наличие положительного и отрицательного фототаксиса у *Trichoplax* (*Placozoa*). При этом они ссылаются на неопубликованную работу (2007) исследователей Karolin von der Chevallerie, T. Bergmann and B. Schierwater из Ганноверского университета ветеринарной медицины ФРГ.

О фототаксисе говорится в тезисах доклада на конференции «Молекулярная биология клетки. США, 2018» специалистов С. Chai, L. Kroo, C. Aiello, M. Prakas из центра Биоинженерия (Стэнфордский университет США). В этих тезисах, исходя из общей информационной концепции об окружающей среде, кратко говорится о фототаксисе у *Trichoplax*, но не раскрывается суть результатов исследований (при каком свете наблюдается положительный или отрицательный фототаксис).

При этом все наблюдения и исследования проводились при высоком уровне освещённости чашки Петри с *Trichoplax* лампами накаливания или светодиодными лампами. Такой уровень освещённости необходим для работы оптического микроскопа, но он не соответствует спектральному составу естественного света и освещённости среды обитания *Trichoplax*.

Отечественный исследователь *Trichoplax* Михаил Никитин (Научно-исследовательский институт физико-химической биологии им. А.Н. Белозерского МГУ им. М.В. Ломоносова) сообщает, что штатные источники ближнего ультрафиолетового излучения (сине-фиолетового света) микроскопов могут вызывать фотохимические повреждения клеток животного. Он также отмечает, что при умеренном освещении *Trichoplax* монохроматическим светом с разной длиной волны поведенческих эффектов не было обнаружено [19]. Изучение *Trichoplax* (*Placozoa*) проводится при повышенном уровне освещённости от светодиодных ламп или лампы накаливания, которое необходимо для работы оптических микроскопов. Многие исследователи отмечают, что при таком освещении *Trichoplax* старается переместиться на края чашки Петри, а ближнее ультрафиолетовое излучение негативно влияет на состояние его клеток. В этом случае как спектр света, так и уровень освещённости не соответствуют световой среде обитания *Trichoplax* (*Placozoa*).

В природе жизнь животного *Trichoplax* тесно связана с солнечным светом, который меняет интенсивность и спектр, поперечно наполняя морские глубины красками цветов. Водный мир в сине-зелёном свете на глубине обитания *Trichoplax* от 5 до 20 м наполнен многообразием цветов, которое увеличивается за счёт флуоресцентного света от кристаллов арагонита, гуанина и других органических соединений флоры и фауны.

В этом многообразии цветов световых стимулов простейшее многоклеточное животное *Trichoplax* ориентируется уже 780 млн лет и успешно накопило большой список генов описанных (RDD38879.1, RDD36429.1). В морской воде эти многоклеточные по свету от флуоресценции и отражённому свету распознают врагов и источники пищи. При этом происходит межвидовая коммуникация [20] и ориентация животного в координатах «свет — цвет пищи — цвет врага». Для ориентации в этом хаосе цветов необходимо выбрать систему световых координат и команд для соответствующей поведенческой реакции (пища — стоп и можно есть, продолжить движение, опасность — изменить направление движения). Световая среда обитания характеризуется уровнем освещённости, спектром света, степенью его поляризации. Для морских обитателей ключевой характеристикой света является поляризация, так как многие обитатели морской стихии имеют в светочувствительной системе линзы из кристаллов кальцита (арагонита), который обладает двулучепреломлением. Это основа поляризационного зрения, эффективность которого усиливается при наличии в глазах отражателей из кристалла гуанина. Также эти кристаллы на чешуе рыб обеспечивают их обладателям невидимость на углах атаки хищ-

ников [20], а флуоресценция этих кристаллов обеспечивает межвидовую коммуникацию [21, 22]. Поляризованный свет сужает сектор обзора животного, но обеспечивает ему «квазипрямолинейное» движение к цели (источнику пищи). Для расширения сектора обзора необходимо иметь множество разнонаправленных фоточувствительных датчиков с арагонитом, как у хитона, или постоянно крутить телом, на котором находятся эти световые датчики. В поляризованном свете в мутной воде видно дальше и контрастней. Подводная поляризация света является максимальной, когда вы смотрите под углом  $90^\circ$  в сторону от основного направления распространения света, и минимальной при направлении взгляда как по направлению распространения света, так и от него. Опускаясь глубже, независимо от положения солнца, самый яркий свет идёт сверху вниз, поэтому поляризация минимальна, если смотреть прямо вверх и прямо вниз, и максимальна, если смотреть горизонтально [23]. Если смотреть снизу вверх (от дна на поверхность моря), то в соответствии с законом полного отражения будет виден светлый круг, из которого простекает свет [24]. Этот свет является световой вертикалью и несёт информацию для многоклеточного, где находится верх. Зелёно-фиолетовый свет освещает зелёные водоросли (пища для *Trichoplax*), которые в отражённом (поляризованном) свете имеют ярко-зелёную окраску.

У маленького *Trichoplax* есть враги, например, брюхоногие моллюски или стрекающие [25]. Панцирь всех моллюсков содержит карбонат кальция ( $\text{CaCO}_3$ ), который может находиться в виде двух модификаций: арагонита, характерного для более древних моллюсков (перламутровый слой всегда состоит только из арагонита), и кальцита – повидимому, эта модификация – более позднее приобретение моллюсков. Кристаллы кальцита (арAGONита) при облучении светом 395 нм светятся красным светом 630–650 нм. Этот горизонтально распространяющийся свет демаскирует хищника, и многоклеточные *Trichoplax* покидают его территорию.

Итак, для пространственной ориентации у многоклеточного *Trichoplax* есть три световые координаты. Это две горизонтальные координаты – направления на зелёный и красный свет и одно вертикальное направление – фиолетовый свет, идущий сверху вниз (гелиовертикаль). В лучах фиолетового света животное *Trichoplax* узнает, где находится пища или враг. Исходя из особенностей клеточного строения (в частности, наличия кристаллических клеток с кристаллами арагонита) и перечня генов опсинов, была высказана гипотеза о наличии RGB-таксиса у животного *Trichoplax*.

Рассмотрим, насколько генно-клеточное строение *Trichoplax* способствует стратегии выживания и ориентации по световым координатам (фиолетового, зелёного и красного света). Фиолетово-зелёный свет интегрально воздействует на все клетки *Trichoplax*, при этом кристаллические клетки по своему строению выполняют роль светового сенсора по следующим характеристикам: большое количество этих клеток в теле одного животного (75 шт.) подобно тому, как у моллюска хитона имеется множество арагонитовых глаз; размещение их в зоне края пластинки тела (10–20 мкм от края); наличие в них кристалла арагонита (как основы поляризационного зрения); тесная связь с другими клетками (с волокнистыми и липофильными) актиновыми нитями [11]. Систему кристаллических клеток хорошо видно в поляризованном свете на краях пластинчатого тела *Trichoplax* H2, где под слоем верхних дорсальных клеток расположены ряды кристаллических клеток [8] содержащих линзовидные, ромбовидные кристаллы арагонита ~2 мкм в диаметре, чашевидное ядро, прилегающее к одной стороне клетки, и две центрально расположенные митохондрии, фланкирующие кристалл арагонита. Эти кристаллы арагонита обновляются, как у хитона. За их формирование в кристаллических клетках отвечает процесс биоминерализации [26]. Множество двулучепреломляющих кристаллов арагонита оказывает влияние на характер движения *Trichoplax*. Перед началом движения *Trichoplax* вращается и после нескольких оборотов движется в выбранном направлении. Такое сканирующее движение

системой кристаллических клеток характерно для животного, у которого имеется поляризационное зрение, а также для систем, проводящих стохастическую оценку величины и направления светового сигнала. При этом необходимо отметить, что кристалл арагонита при облучении светом 395 нм светится красным светом 630 нм, который благотворно влияет на фланкирующие его митохондрии. Красный свет стимулирует выработку митохондриями дополнительной порции АТФ [27] или кванта энергии [28], если она (митохондрия) находится в протонервной системе [17] и в клетке есть окись азота, которая подавляет выработку АТФ [30]. Этот факт очень интересен в свете открытия в кристаллических клетках *Trichoplax* потенциалзависимых каналов действия [29]. О функционировании и строении кристаллических клеток в настоящее время известно мало, но исследования их строения продолжаются [11, 29].

Так, в работе [11] показано следующее:

- эпителиальные клетки, контактировавшие с кристаллическими клетками, принадлежали эпителию по окружности животного и имели столбчатую форму с узким концом на поверхности. Более того, они отличались от других эпителиальных клеток тем, что содержали заметные пучки актиновых нитей по всему периметру [11];
- слой актина окружает кристаллические клетки [11]. Возможно, сокращение актиновых нитей вызывает формирование центров сжатия на верхней поверхности дорсальных клеток [9].

В работах [13, 29] приведены результаты комбинированного анализа геномных, молекулярных и микрохимических исследований, демонстрирующие присутствие в кристаллических клетках *Trichoplax* функциональных ферментов синтеза монооксида азота (NOS) [13, 29]. Субстратом для NO-синтазы в синтезе оксида азота NO служит L-аргинин [13], который является оптически активным. В зависимости от его концентрации меняется плоскость поляризации обыкновенного и необыкновенного лучей света, исходящих из кристалла арагонита. Окись азота может влиять на режим функционирования митохондрий [30], которые фланкируют кристалл арагонита. L-аргинин с металлоорганическими соединениями может организовывать светочувствительные комплексы, такие как рутений – полипиридин [31,32] и другие металлы [33]. Они могут поглощаться из морской воды или из синезелёных водорослей и взаимодействовать с азотистыми соединениями цитоплазмы, в которых имеются дополнительные включения – светлые и тёмные пузырьки и аппарат Golgi [11, 29]. Известно, что с помощью везикулярного транспорта прошедшие через аппарат Golgi белки доставляются «по адресу» в зависимости от полученных ими в аппарате Golgi «меток». Везикулярный транспорт способствует формированию в кристаллической клетке кристалла арагонита [33], а наличие белков, гуанина и цитоплазмы создаёт предпосылки для формирования иридоцитов на поверхности чашевидного ядра.

Иридоциты – пигменты, в которых чередуются слои белковых пластин, кристаллов гуанина и цитоплазмы. Из-за разных показателей преломления этих слоёв пигменты интерферируют световые волны и могут отражать свет от ультрафиолетового до дальнего красного. Функции у пигментов иридоцитов самые разные: они могут предотвращать диффузию газов, защищать от перегрева, быть частью зрительной системы, помогать внутривидовой коммуникации или служить маскировкой. Отражающие свойства кристаллов гуанина зависят от их ориентации, которая может определяться параметрами внешнего магнитного поля [34–36]. Наличие в кристаллических клетках иридоцитов позволит расширить их функциональную роль. Сегодня точные функции кристаллических клеток не классифицированы, и учёными рассматриваются разные гипотезы их функционального назначения. В работе [11] экспериментально доказывается гипотеза, что кристаллические клетки являются стаатоцитами.

Авторы работы [11] формулируют следующие выводы. Поскольку кристаллы кажутся достаточно тяжёлыми, чтобы

Таблица 1 / Table 1

Обобщённые результаты выбора световых стимулов  
Generalized results of the choice of light stimuli

Характеристика светового стимула Light stimulus characteristics	Глубина, на которой поглощается 99% света, м Depth of 99% light-absorbing, m	Наличие генома опсина, соответствующего определённой длине волны света Opsin genome presence according to certain light wave depth	Источник света / Light source	
			в среде обитания in habitat	для моделирования for modelling
УФ 395 нм UV 395 nm	107	RDD38879.1 Чувствительный к фиолетовому опсин (Violet-sensitive opsin) [ <i>Trichoplax</i> spp. H2]	Солнечная гелиовертикаль Solar helio-vertical	Профессиональный фонарь геолога Professional geologist lamp
Зелёный Green	113	RDD36429.1 Чувствительный к зелёному опсин (green-sensitive opsin) [ <i>Trichoplax</i> spp. H2]	Отражённый от водорослей свет Light reflected from seaweeds	Лазер 532 нм с оптоволоконном 532 nm laser with optical fibre
Красный Red	4	Вопрос открыт Unknown	Отражённый от арагонитового панциря хищника моллюска свет Light reflected from aragonite predator molluscum shell	Лазер 630–650 нм 630–650 nm laser
Синий Blue	254	RDD38730.1 RDD42761.1 RDD39212.1 Чувствительный к синему опсин (Blue-sensitive opsin) [ <i>Trichoplax</i> spp. H2]	–	Светодиодные источники света при 6500 К 6500 K LED light sources
Оранжевый и жёлтый Orange and yellow	25 и 51 25 and 51	Нет No	–	Лампа накаливания Incandescent lamp

менять положение внутри кристаллической ячейки в ответ на гравитацию и разрушаются во время секционирования, сделано предположение, что на самом деле это маленькие камни. Кристаллы CaCO<sub>3</sub> толщиной от 30 до 150 мкм встречаются в некоторых хитонах [37, 38], хрупких морских звёздах [39] и вымерших трилобитах [40], где они, как полагают, фокусируют свет, но кристаллы в *Trichoplax*, по-видимому, слишком малы, чтобы функционировать таким образом [11].

По данным работы [11], эксперименты проводили в затемнённом помещении при постоянной цветовой температуре света, исходящего из прецизионного светового короба с регулируемой интенсивностью и контролем температуры (Northern Light Technologies, Inc., Канада). Стекланный контейнер с *Trichoplax* помещали на пластиковую чашку Петри, центрированную по уровню освещённости поверхности от светильника (светового короба) (освещённость 276 люкс). Известно, что светильники Northern Light Technologies, Inc., Канада, применяются для светотерапии человека (при управлении циркадными ритмами) и построены на базе энергосберегающей лампы Northern Light Technologies с цветовой температурой 3500 К с подавлением ультрафиолетового излучения в спектре светильника. В спектре данного источника света преобладают красные и зелёные составляющие. Энергетически преобладает зелёный свет, фотоны которого имеют большую энергию, чем фотоны красного света [41]. По данным работы [11], при зелёно-красном спектре света светильника Northern Light Technologies животные *Trichoplax* с разным содержанием кристаллических клеток вели себя по-разному на вертикальной стенке стеклянного контейнера. Возникает вопрос, что определило поведенческую реакцию *Trichoplax* в этом эксперименте – сила тяжести или спектральный состав света?

В рамках этого вопроса приобретает актуальность высказанная гипотеза о том, что у *Trichoplax* присутствует RGB-таксис. Для экспериментальной проверки гипотезы о наличии RGB-таксиса у *Trichoplax* под руководством руководителя проекта «*Trichoplax* для бионики» д-ра биол. наук Кузнецова А.В. проведены экспериментальные исследования на базе лаборатории биоразнообразия и функциональной геномики Мирового океана ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН».

## Материалы и методы

Исследования проводились на лабораторных животных *Trichoplax* spp. 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 [42]. Исследования поведенческой реакции *Trichoplax* выполняли с использованием современных систем оптической микроскопии:

- оптического микроскопа Nikon Eclipse Ts2R-FI;
- оптических микроскопов Nikon SMZ-1270, Stemi 305;
- оптического микроскопа «Леонардо 3.0», специально разработанного под проект и позволяющего одновременно наблюдать поведение группы *Trichoplax* и каждого *Trichoplax* этой группы при низком уровне освещённости и стабильной температуре водной среды его обитания. В микроскопе были применены две веб-камеры – верхняя с матрицей 1,9 Мп и нижняя – 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. Фиксацию поведенческой реакции животных осуществляли с использованием цифровой камеры Infinity.

Для описания реакции животного на световые стимулы применяли следующую терминологию. Кинезис – это ненаправленное движение организма или клеточки в ответ на стимул, поиск комфортного уровня освещённости. Таксис – это движение или ориентация клеточки, организма или части организма в ответ на внешний стимул и движение к стимулу или от него. Фототаксис – движение на свет или от света без анализа спектра. RGB-таксис – это селективная поведенческая реакция на световой стимул с разной длиной волны (разного цвета). RGB-таксис предполагает, что у животного имеется способность к анализу и принятию решения при регистрации световых стимулов с различной длиной волны.

**Обобщённые результаты испытаний на оптическом микроскопе «Леонардо 3.0»**  
**Summarised results of tests on an optical microscope Leonardo 3.0**

№ цикла Cycle number	Длина волны светового стимула, нм Light stimulus wavelength, nm	Реакция испытуемого* <i>Trichoplax</i> Response of exposed* <i>Trichoplax</i>	Время воздействия, с Time exposure, sec
1-й 1 <sup>st</sup>	532	Замер и сохранял перекрученную форму <i>Trichoplax</i> braced and kept preserved twisted shape	58
	Led6500K	Форма восьмёрки сохранилась <i>Trichoplax</i> preserved "Q and reverse Q" shape	12
	395	Начал интенсивно двигаться, раскручивая восьмёрку <i>Trichoplax</i> started moving intensively, twisting "Q and reverse Q"	60
2-й 2 <sup>nd</sup>	532	Процесс раскручивания остановлен, замер и на краях пластинки появились зубцы — эффект The process of unwinding is stopped, it braced, and teeth appeared on the edges of the plate — the effect	37
	395	Начался активный процесс раскручивания восьмёрки до полного восстановления формы тела до стандартной There was began the process of "Q and reversed Q" twisting for full standard body shape restoration, immediate overturn at the 50 second	50
	395	Начал активно двигаться в сторону источника света <i>Trichoplax</i> began moving actively to light source direction	15
3-й 3 <sup>rd</sup>	532	Остановил активное движение, на краях пластинки появились зубцы It stopped an active movement, the teeth appeared on the edges of the plate scalloped edges appeared	34
	395	Восстановилась активность движения, края пластинки округлились Activity of the movement has restored, the scalloped edges rounded	82
4-й 4 <sup>th</sup>	532	Активность спала до остановки, края пластинки заострились Activities lowed and stopped, the scalloped edges sharpened	60
	395	Края округлились, активность движения возросла Edges rounded, activity of moving increased	55
5-й 5 <sup>th</sup>	532	Остановился, края пластинки заострились <i>Trichoplax</i> stopped, the scalloped edges sharpened	33
	395	Началось активное движение, края пластинки округлились Active movement began, the scalloped edges rounded	100

Примечание. \* Испытуемый *Trichoplax* хранился в стандартных условиях лаборатории, при пересадке в чашку Петри перекрутил тело по типу «восьмёрки».

Note. \* The *Trichoplax* subject was stored in standard laboratory conditions, when transplanted into a Petri dish, he twisted the body similar to the "eight" type.

## Результаты

На первом этапе исследований применена технология чёрного ящика, которая заключалась в следующем: животных по стандартной методике помещали в чашку Петри, фиксировали их положение на видеокамеру, после чего с помощью оптоволоконных волокон подавали световые сигналы (532; 630; 395 нм) к местам нахождения животных и осуществляли видеорегистрацию их поведения. Источники световых стимулов были выбраны исходя из спектра солнечного света, достигающего глубин обитания *Trichoplax*, поляризованных источников света в среде его обитания, строения кристаллических клеток и перечня генов опсинов. Обобщённые данные выбора приведены в табл. 1.

Для исключения влияния постороннего освещения на проводимый эксперимент собран оптический микроскоп «Леонардо 3.0» с двумя веб-камерами, которые могут работать с минимальным уровнем освещённости, намного меньшим, чем указанный в работе [11]. Предметный столик микроскопа был обклеен светопоглощающей чёрной тканью. Данный микроскоп позволил открыть эффект RGB-таксиса у *Trichoplax* и кинезис у его клеток. Обобщённые результаты первого опыта приведены в табл. 2.

## Обсуждение

По результатам серии опытов можно сделать следующие выводы.

1. При воздействии зелёного света (532 нм) останавливается движение *Trichoplax*, замирает движение клеток в его внутренней структуре.

2. Под воздействием ультрафиолетового света (395 нм) возникают вихревые движения внутренних клеток с последующим изменением формы *Trichoplax* и началом его движения в сторону источника ультрафиолетового света, который является преобладающим в световой среде на глубине обитания *Trichoplax*.

3. При воздействии красного света (650 нм) уменьшается скорость движения *Trichoplax*, происходит замирание движения внутренних клеток на время паузы, через некоторое время *Trichoplax* начинает движение от источника красного света. Данные результаты получены при комфортной для *Trichoplax* температуре водной среды.

4. Исследование поведенческой реакции животного и его клеток на монохромные световые сигналы с разными длинами волн, с использованием современных методов оптической микроскопии, при низком уровне освещённости

и стабильной температуре водной среды его обитания подтвердило гипотезу о наличии у него RGB-фототаксиса и кинезиса его клеток.

## Заключение

1. Впервые с помощью световых сигналов проведено управление поведением *Trichoplax* и его клетками, а также доказано наличие RGB-фототаксиса у *Trichoplax* и кинезиса у его клеток.

2. Открытие RGB-таксиса *Trichoplax (Placozoa)* изменяет сложившиеся научные представления в области эволюции цветного зрения у животных *Trichoplax (Placozoa)* и зрительного анализатора человека и функционирования его шишковидной железы.

3. RGB-таксис *Trichoplax (Placozoa)* и кинезис его клеток является теоретической основой для понимания того, каким образом простые беспозвоночные животные интегри-

руют информацию из сложной световой среды при отсутствии у них традиционной архитектуры обработки информации, такой как нервная система.

4. Открытие управления *Trichoplax (Placozoa)* с помощью RGB-световых стимулов является основой для новых направлений в науке и технике: синтеза биосенсоров для цветного зрения и управления биологическими нанороботами.

5. Проведённые исследования по обнаружению RGB-таксиса *Trichoplax (Placozoa)* способствовали совершенствованию оптических микроскопов для исследования селективной поведенческой реакции беспозвоночных микрживотных. На данную конструкцию микроскопа авторы оформили патент на полезную модель RU 2021123551 от 05.08.2021 г.

6. Представленный метод может использоваться в гигиенических исследованиях влияния внешних загрязнений на окружающую среду, а также воздействия света на шишковидную железу человека.

## Литература

(п.п. 1, 3–6, 8–14, 18, 19, 21–23, 25–27, 31, 33–40 см. References)

- Брылев В.А., Крючков В.Н., Залепухин В.В. *Теоретические аспекты биоразнообразия: Учебное пособие*. Волгоград: Волга; 2003.
- Никитин М. Нейротрансмиттеры и их функции у трихоплакса – животного без нервной системы. Доступно: <https://www.youtube.com/watch?v=OwnA4oFro0w>
- Романова Д.Ю. Разнообразие клеточных типов у гаплотипа H4 *PLACOOZA* SP. *Морской биологический журнал*. 2019; 4(1): 81–90. <https://doi.org/10.21072/MBJ.2019.04.1.07>
- Серавин Л.Н., Гудков А.В. *Trichoplax adhaerens (mun Placozoa) – одно из самых примитивных многоклеточных животных*. СПб.: ТЕССА; 2005.
- Знакомьтесь: Трихоплакс, простейшее животное на Земле. Доступно: <https://scientificrussia.ru/articles/znakomtes-trihoplaks-prostejshee-zhivotnoe-na-zemle>
- «Невидимая» рыба может осветить путь к лучшим оптическим устройствам. Доступно: <https://ru.livingorganicnews.com/invisible-fish-could-light-way-better-optical-devices-775007>
- Очаковский Ю.Е., Копелевич О.В., Войтов В.И. *Свет в море*. Доступно: <https://coollib.com/b/279274/read>
- Чачина Н.А., Кирток А.Н., Фролова М.С., Векшин Н.Л. Митохондрии – силовые электростанции нейронных сетей. В кн.: *Нейроинформатика. Сборник статей. Часть 1*. М.; 2013: 219–29.
- Романова Д.Ю. *Сравнительный анализ организации типов клеток и поведения у PLACOOZA*: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. М.; 2020.
- Пожилова Е.В., Новиков В.Е., Левченкова О.С. Митохондриальный АТФ-зависимый калиевый канал и его фармакологические модуляторы. *Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии*. 2016; 14(1): 29–36. <https://doi.org/10.17816/RCF14129-36>
- Юрре Т.А., Рудая Л.И., Климова Н.В., Шаманин В.В. Органические материалы для фотовольтаических и светонизлучающих устройств. *Физика и техника полупроводников*. 2003; 37(7): 835–43.
- Козлов Д.В. Физическая химия, лекции. Доступно: <https://studfile.net/preview/4482440/>
- Разгадать тайны Чёрного моря: какие работы ведутся в лабораториях ИНБЮМа. Доступно: <https://www.youtube.com/watch?v=MEbz9t4eVVA>
- Schierwater B., DeSalle R. Placozoa. *Curr. Biol.* 2018; 28(3): R97–8. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.11.042>
- Brylev V.A., Kryuchkov B.N., Zalepukhin V.V. *Theoretical Aspects of Biodiversity: A Textbook [Teoreticheskie aspekty bioraznoobraziya: Uchebnoe posobie]*. Volgograd: Volga; 2003. (in Russian)
- Srivastava M., Begovic E., Chapman J., Putnam N.H., Hellsten U., Kawashima T., et al. The Trichoplax genome and the nature of placozoans. *Nature*. 2008; 454(7207): 955–60. <https://doi.org/10.1038/nature07191>
- Smith C.L., Varoqueaux F., Kittelmann M., Azzam R.N., Cooper B., Winters C.A., et al. Novel cell types, neurosecretory cells, and body plan of the early-diverging metazoan *Trichoplax adhaerens*. *Curr. Biol.* 2014; 24(14): 1565–72. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.05.046>
- Smith C.L., Pivovarova N., Reese T.S. Coordinated feeding behavior in trichoplax, an animal without synapses. *PLoS One*. 2015; 10(9): e0136098. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136098>
- Moroz L.L. NeuroSystematics and periodic system of neurons: model vs reference species at single-cell resolution. *ACS Chem. Neurosci.* 2018; 9(8): 1884–903. <https://doi.org/10.1021/acschemneuro.8b00100>
- Nikitin M. Neurotransmitters and their functions in trichoplax – an animal without a nervous system. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=OwnA4oFro0w> (in Russian)
- Romanova D.Y., Smirnov I.V., Nikitin M.A., Kohn A.B., Borman A.I., Malyshov A.Y., et al. Sodium action potentials in placozoa: Insights into behavioral integration and evolution of nerveless animals. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 2020; 532(1): 120–6. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2020.08.020>
- Armon S., Bull M.S., Aranda-Diaz A., Prakash M. Ultrafast epithelial contractions provide insights into contraction speed limits and tissue integrity. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*. 2018; 115(44): E10333–41. <https://doi.org/10.1073/pnas.1802934115>
- Ilton M., Bhamla M.S., Ma X., Cox S.M., Fitchett L.L., Kim Y., et al. The principles of cascading power limits in small, fast biological and engineered systems. *Science*. 2018; 360(6387): eaao1082. <https://doi.org/10.1126/science.aao1082>
- Mayorova T.D., Smith C.L., Hammar K., Winters C.A., Pivovarova N.B., Aronova M.A., et al. Cells containing aragonite crystals mediate responses to gravity in *Trichoplax adhaerens* (Placozoa), an animal lacking neurons and synapses. *PLoS One*. 2018; 13(1): e0190905. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190905>
- Mayorova T.D. A Gravity-Sensing Cell in *Trichoplax adhaerens*, an Early Branching Metazoan. In: *Proceedings of Conference: Society for Neuroscience*. San Diego; 2016.
- Moroz L.L., Romanova D.Y., Nikitin M.A., Sohn D., Kohn A.B., Neveu E., et al. The diversification and lineage-specific expansion of nitric oxide signaling in Placozoa: insights in the evolution of gaseous transmission. *Sci. Rep.* 2020; 10(1): 13020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69851-w>
- Nikitin M. Bioinformatic prediction of *Trichoplax adhaerens* regulatory peptides. *Gen. Comp. Endocrinol.* 2015; 212: 145–55. <https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2014.03.049>
- Romanova D.Yu. Diversity of cell types in haplotype H4 *PLACOOZA* SP. *Morskoy biologicheskiy zhurnal*. 2019; 4(1): 81–90. <https://doi.org/10.21072/MBJ.2019.04.1.07> (in Russian)
- Seravin L.N., Gudkov A.V. *Trichoplax adhaerens (Type Placozoa) is One of the Most Primitive Multicellular Animals [Trichoplax adhaerens (tip Placozoa) – одно из самых примитивных многоклеточных животных]*. St. Petersburg: TESSA; 2005. (in Russian)
- Meet Trichoplax, the simplest animal on Earth. Available at: <https://scientificrussia.ru/articles/znakomtes-trihoplaks-prostejshee-zhivotnoe-na-zemle> (in Russian)
- Heyland A., Croll R., Goodall S., Kranyak J., Wyeth R. *Trichoplax adhaerens*, an enigmatic basal metazoan with potential. *Methods. Mol. Biol.* 2014; 1128: 45–61. [https://doi.org/10.1007/978-1-62703-974-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-62703-974-1_4)
- Srivastava M., Begovic E., Chapman J., Putnam N.H., Hellsten U., Kawashima T., et al. The Trichoplax genome and the nature of placozoans. *Nature*. 2008; 454(7207): 955–60. <https://doi.org/10.1038/nature07191>
- “Invisible” fish can light the way to the best optical devices. Available at: <https://ru.livingorganicnews.com/invisible-fish-could-light-way-better-optical-devices-775007> (in Russian)
- Mizukawa Y. *Characterization of light reflection of fish guanine crystals by diamagnetic micromanipulation*: Diss. Hiroshima; 2016.
- Michiels N.K., Anthes N., Hart N.S., Herler J., Meixner A.J., Schleifenbaum F., et al. Red fluorescence in reef fish: a novel signalling mechanism? *BMC Ecol.* 2008; 8: 16. <https://doi.org/10.1186/1472-6785-8-16>
- Sönke J. *The Optics Of Life: A Biologist's Guide to Light in Nature*. Available at: <https://babylonzoo.blog/optics/index.html>

## Original article

24. Ochakovsky Yu.E., Kopelevich O.V., Voitov V.I. *Light in the Sea [Svet v more]*. Moscow: Nauka; 1970. (in Russian)
25. Eitel M., Osigus H.J., DeSalle R., Schierwater B. Global diversity of the Placozoa. *PLoS One*. 2013; 8(4): e57131. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057131>
26. Zhu W., Lin J., Cai C., Lu Y. Biomimetic mineralization of calcium carbonate mediated by a polypeptide-based copolymer. *J. Mater. Chem. B*. 2013; 1(6): 841–9. <https://doi.org/10.1039/c2tb00182a>
27. Hourelid N.N. Shedding light on a new treatment for diabetic wound healing: a review on phototherapy. *Sci. World J*. 2014; 2014: 398412. <https://doi.org/10.1155/2014/398412>
28. Chachina N.A., Kirtok A.N., Frolova M.C., Vekshin N.L. Mitochondria – power plants of neural networks. In: *Neuroinformatics. Collection of articles. Part 1 [Neyroinformatika. Sbornik statey. Chast' 1]*. Moscow; 2013: 219–29. (in Russian)
29. Romanova D.Yu. Comparative analysis of the organization of cell types and behavior in *PLACOZOA*: Diss. Moscow; 2020. (in Russian)
30. Pozhilova E.V., Novikov V.E., Levchenkova O.S. The mitochondrial ATP-dependent potassium channel and its pharmacological modulators. *Obzory po klinicheskoy farmakologii i lekarstvennoy terapii*. 2016; 14(1): 29–36. <https://doi.org/10.17816/RCF14129-36>
31. Rojas Pérez Y., Etchenique R. Optical manipulation of animal behavior using a ruthenium-based phototrigger. *Photochem. Photobiol. Sci*. 2019; 18(1): 208–12. <https://doi.org/10.1039/c8pp00467f>
32. Yurre T.A., Rudaya L.I., Klimova N.V., Shamanin V.V. Organic materials for photovoltaic and light-emitting devices. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 2003; 37(7): 807–15. <https://doi.org/10.1134/1.1592855> (in Russian)
33. Weiner S., Addadi L. Crystallization pathways in biomineralization. *Annu. Rev. Mater. Res*. 2011; 41: 21–40. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-062910-095803>
34. Mizukawa Y. *Characterization of light reflection of fish guanine crystals by diamagnetic micromanipulation doctoral theses*: Diss. Hiroshima; 2016.
35. Chikashige T., Iwasaka M. Magnetically-assembled micro/mesopixels exhibiting light intensity enhancement in the (012) planes of fish guanine crystals. *AIP Advances*. 2018; (8): 056704. <https://doi.org/10.1063/1.5006135>
36. Gur D., Palmer B.A., Weiner S., Addadi L. Light manipulation by guanine crystals in organisms: biogenic scatterers, mirrors, multilayer reflectors and photonic crystals. *Adv. Funct. Mater*. 2017; 27(6): 20171603514.
37. Speiser D.I., Eernisse D.J., Johnsen S. A chiton uses aragonite lenses to form images. *Curr. Biol*. 2011; 21(8): 665–70. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.03.033>
38. Speiser D.I., DeMartini D.G., Oakley T.H. The shell-eyes of the chiton *Acanthopleura granulate* (Mollusca, Polyplacophora) use pheomelanin as a screening pigment. *J. Nat. Hist*. 2014; 48(45–48): 2899–911. <https://doi.org/10.1080/00222933.2014.959572>
39. Aizenberg J., Tkachenko A., Weiner S., Addadi L., Hendler G. Calcitic microlenses as part of the photoreceptor system in brittlestars. *Nature*. 2001; 412(6849): 819–22. <https://doi.org/10.1038/35090573>
40. Gál J., Horváth G., Clarkson E.N.K., Haiman O. Image formation by bifocal lenses in a trilobite eye? *Vision Res*. 2000; 40(7): 843–53. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.03.033>
41. Kozlov D.V. Physical chemistry, lectures. Available at: <https://studfile.net/preview/4482440/> (in Russian)
42. Unravel the secrets of the Black Sea: what kind of work is being carried out in the laboratories of INBYUM. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=MEbz9t4eVVA> (in Russian)