

УДК 614/5: 644.36

## RGB-ТАКСИС TRICHOPLAX (PLASOZOA) КАК НОВЫЙ МЕТОД ГИГИЕНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

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

<sup>1</sup>ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт гигиены транспорта»

Роспотребнадзора, Москва, Россия

<sup>2</sup>ГБОУ «Гимназия №8» им. Н.Т. Хрусталева, г. Севастополь, Россия

При проведении гигиенических исследований актуальной задачей является поиск простых многоклеточных животных с социальным поведением для решения фундаментальных вопросов взаимодействия клеток с дестабилизирующими факторами внешней среды. Морское животное *Trichoplax* (*Plasozoa*) имеет простейшую организацию среди всех известных животных всего с шестью различными типами клеток, но с выдающимся социальным поведением.

Проведен теоретический анализ спектрального состава света и степени его поляризации в морской среде простейшего многоклеточного животного *Trichoplax* (*Plasozoa*), 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 – отраженный горизонтальный свет от пищи (зеленый – 532 нм) и исходящий от арагонитового панциря хищника моллюска флуоресцентный свет (красный – 630 нм). На основании этого высказана гипотеза о наличии RGB-таксиса у *Trichoplax*. Для управления *Trichoplax* выбраны монохромные световые сигналы красный - 630 нм, зеленый - 532 нм и синий - 395 нм. Экспериментально в рамках работы «*Trichoplax* для бионики» подтверждено открытие RGB-таксиса у *Trichoplax*. *Trichoplax Movement control RGB - taxis* - YouTube

**Ключевые слова:** Трихоплакс, кристаллические клетки, арагонит, шишковидная железа, кристалл, фототаксис, триптофан, серотонин, нейропептидная сеть, циркадные ритмы.

**Для цитирования:** Капцов В.А., Дейнего В.Н., Козырицкий Д.В. Rgb-таксис trichoplax (*plasozoa*), как новый метод гигиенических исследований. Медицина труда и экология человека. 2021;1:6-22

**Для корреспонденции:** Капцов Валерий Александрович., член-корреспондент РАН, доктор медицинских наук, профессор, заведующий отделом гигиены труда, e-mail: [kapcovva39@mail.ru](mailto:kapcovva39@mail.ru).

**Финансирование:** исследование не имело спонсорской поддержки

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.24411/2411-3794-2021-10101>

**RGB-TAXIS TRICHOPLAX (PLACOZOA) AS A NEW METHOD OF HYGIENIC STUDIES**

Kaptsov V.A.<sup>1</sup>, V.N. Deinogo V.N.<sup>1</sup>, Kozyritskiy D.V.<sup>2</sup>

1. Federal State Unitary Enterprise "All-Russian Research Institute of Transport Hygiene"  
Rospotrebnadzor, Russia, 125438, Moscow, Pakgauznoe shosse, 1, bldg. one

2. GBOU "Gymnasium №8" named after N.T. Khrustaleva Sevastopol 299029, City of Sevastopol,  
Leninsky, Khrustalev street, house 45

*When conducting hygienic research, it is an urgent task to search for simple multicellular animals with social behavior to solve fundamental issues of the interaction of cells with destabilizing factors of the external environment. The marine animal Trichoplax (Placozoa), having the simplest organization of any animal known, with only six distinguishable cell types, but with outstanding social behavior. The marine animal Trichoplax (Placozoa), having the simplest organization of any animal known, with only six distinguishable cell types, but with outstanding social behavior. A theoretical analysis of the spectral composition of light and the degree of its polarization in the marine environment of the simplest multicellular animal Trichoplax (Placozoa), as well as the features of its gene-cellular structure, has been carried out. Based on the laws of hydro-optics and the strategy of survival ("food-prey"), the coordinate axes of the light medium for Trichoplax were determined (light vertical (395nm) and two horizontal light axes - reflected horizontal light from food (green-532nm) and emanating from the aragonite shell of a mollusk predator fluorescent light (red-630nm).*

*Based on this, a hypothesis was put forward about the presence of RGB taxis in Trichoplax. Monochromatic light signals red - 630 nm, green - 532 nm and blue - 395 nm were selected to control Trichoplax. The discovery of RGB taxis at Trichoplax has been experimentally confirmed within the framework of the work "Trichoplax for Bionics". Trichoplax Movement control RGB - taxis - YouTube*

**Key words:** *Trichoplax, crystalline cells, aragonite, pineal gland, crystal, phototaxis, tryptophan, serotonin, neuropeptide network, circadian rhythms.*

**Citation:** *Kaptsov V.A., Deinogo V.N., Kozyritskiy D.V. Rgb-taxis trichoplax (placozoa) as a new method of hygienic research. Occupational health and human ecology. 2021: 1:6-22*

**Correspondence:** *Valery A. Kaptsov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, DSc. (Medicine), Professor, Head of the Department of Occupational Hygiene, e-mail: [kaptcovva39@mail.ru](mailto:kaptcovva39@mail.ru).*

**Financing:** *The study had no financial support.*

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

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.24411/2411-3794-2021-10101>

Одним из ключевых факторов, влияющих на здоровье человека, является свет, который действует на шишковидную железу, ответственную за циркадные ритмы и синтез из триптофана, серотонина и мелатонина. 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 труда, коммунальной, 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 миллионов лет назад и дожившее до наших дней. Это животное – «блинчик» размером менее 2 мм, толщиной 25 мкм, состоит из трех слоев клеток и обитает в теплых 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.

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-зеленой 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 50000 штук);
- симбиотов (бактерии *Grellia incantans* G. и Рутманния);
- генов (геном *Trichoplax* включает 11,5 тысяч 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];
- биомеханику движения тела животного и его клеток [9, 10];
- систему кристаллических клеток с кристаллами арагонита – как гравитационные сенсоры [11, 12].

В то же время мы не нашли работы, 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. Ломоносова), а также сотрудники Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии Д. Романова и И. Смирнов [13, 14, 15]. Ранние исследования о *Trichoplax* изложены в книге Серавина Л.Н. и Гудкова А.В. [16].

Каролин Смит, нейробиолог из Национального института здоровья в Бетесде (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 он ровно, под наклоном или перевернут. 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 очень 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* откроет 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» выступит специалист по кристаллическим клеткам (как гравитационным датчикам) Татьяна Майорова (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 животных *Trichoplax* под воздействием яркого искусственного светодиодного света (от подсветки предметного столика оптических микроскопов) наблюдали многие исследователи, но при этом каждый давал свою трактовку этому эффекту [19, 20].

В природе жизнь животного *Trichoplax* тесно связана с солнечным светом, который меняет интенсивность и состав спектра, поярусно наполняя морские глубины красками цветов. Водный мир в сине-зеленом свете на глубине обитания *Trichoplax* от 5 до 20 м наполнен многообразием цветов, которое увеличивается за счет *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 миллионов лет и успело накопить большой список генов опсинов (RDD38879.1, RDD36429.1). В морской воде эти многоклеточные по свету от флуоресценции и отраженному свету распознают врагов и источники пищи. При этом происходит межвидовая коммуникация [21] 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 освещенности, 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 их 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 хищников [20], а флуоресценция этих кристаллов обеспечивает межвидовую коммуникацию [21, 23].

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° 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 идет сверху вниз*, поэтому поляризация минимальна, если смотреть прямо вверх и прямо вниз, и максимальна, если смотреть горизонтально [24]. Если смотреть снизу вверх (от дна на поверхность моря), то в соответствии с законом полного отражения будет виден светлый круг, из которого проистекает свет [25]. Этот свет является световой вертикалью и несет информацию для многоклеточного, где находится верх. Зелено-фиолетовый свет освещает зеленые водоросли (пища для *Trichoplax*), которые в отраженном (поляризованном) свете имеют свою ярко-зеленую окраску. Горизонтальный поляризованный зеленый свет – это пища и можно остановиться. У маленького *Trichoplax*

есть враги, например, брюхоногие моллюски или стрекающие [26]. Панцирь всех моллюсков содержит карбонат кальция ( $\text{CaCO}_3$ ), который может находиться в виде двух модификаций:

- арагонита — характерен для более древних моллюсков; перламутровый слой всегда состоит только из арагонита;
- кальцита — по-видимому, эта модификация более позднее приобретение моллюсков.

Кристаллы кальцита (арагонита) 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 горизонтальных координаты - направления на зеленый 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, наличие 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 световых координат (фиолетового, зеленого и красного света).

Фиолетово-зеленый 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. У животного *Trichoplax* H4 под слоем верхних дорсальных клеток расположены ряды кристаллических клеток [8]. Кристаллические клетки содержат 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 формирование кристаллов арагонита в кристаллических клетках отвечает процесс биоминерализации [27].

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 [28] или кванта электроэнергии [29], если она (митохондрия) находится в протонервной системе [17] и в клетке есть окись азота, которая подавляет выработку АТФ [31]. Этот факт очень интересен в свете открытия в кристаллических клетках *Trichoplax* потенциал-зависимых каналов действия [30].

О функционировании и строении кристаллических клеток в настоящее время известно мало, но исследования их строения продолжают [11, 30].

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, 30] приведены результаты комбинированного анализа геномных, молекулярных и микрохимических исследований, демонстрирующие присутствие в кристаллических клетках *Trichoplax* функциональных ферментов синтеза монооксида азота (NOS) [13, 30]. Субстратом для NO-синтаз в синтезе оксида азота NO является 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 [31], которые фланкируют кристалл арагонита. L-аргинин с металлоорганическими соединениями может организовывать светочувствительные комплексы, такие как рутений-полипиридин [32] и другие металлы [33]. Рутений и другие металлы могут поглощаться из морской воды или из сине-зеленых водорослей и взаимодействовать с азотистыми соединениями цитоплазмы.

В цитоплазме кристаллических клеток имеются дополнительные включения - светлые и темные пузырьки и аппарат Golgi [11, 30]. 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 [34], а наличие белков, гуанина и цитоплазмы создает 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 слоев 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 [35, 36, 37].

Наличие в кристаллических клетках иридоцитов позволит расширить функциональную роль кристаллических клеток *Trichoplax*.

На настоящий момент точные функции кристаллических клеток не классифицированы и рассматриваются разные гипотезы их функционального назначения.

В работах [11] экспериментально доказывается гипотеза, что кристаллические клетки являются статоцитами. Автор работы [11] считает:

- поскольку кристаллы кажутся достаточно тяжелыми, чтобы менять положение внутри кристаллической ячейки в ответ на гравитацию и разрушаются во время секционирования, мы предположили, что на самом деле это маленькие камни;
- кристаллы  $\text{CaCO}_3$  толщиной от 30 до 150 мкм встречаются в некоторых хитонах [38,39], хрупких морских звездах [40] и вымерших трилобитах [41], где они, как полагают, фокусируют свет, но кристаллы в *Trichoplax*, по-видимому, слишком малы, чтобы функционировать таким образом [11].

По данным работы [11], эксперименты проводились в затемненном 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 освещенности поверхности от светильника (светового короба) (освещенность 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 УФ в спектре светильника.

В спектре данного источника света преобладают красные и зеленые составляющие. Энергетически преобладает зеленый свет, у которого фотоны имеют большую энергию, чем фотоны красного света [42]. По данным работы [11], при зелено-красном спектре света светильника Northern Light Technologies животные *Trichoplax* с разным содержанием кристаллических клеток вели себя по-разному на вертикальной стенке стеклнного 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.б.н. Кузнецова А.В. были проведены экспериментальные исследования на базе лаборатории биоразнообразия и функциональной геномики Мирового океана ФИЦ «ИнБЮМ им. А. О. Ковалевского РАН».

**Материалы и методы.** 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 [43].

Исследования поведенческой реакции *Trichoplax* выполняли с использованием современных методов оптической микроскопии:

- оптический микроскоп Nikon Eclipse Ts2R-FI;
- оптические микроскопы: Nikon SMZ-1270, Stemi 305;

- оптический микроскоп «Леонардо 3.0» (специально разработанный под проект), позволяющий одновременно наблюдать поведение группы *Trichoplax* и каждого *Trichoplax* этой группы при низком уровне освещенности 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.

Фиксация поведенческой реакции животных осуществлялась с помощью цифровой камеры INFINITY 3.

**Результаты и обсуждение.** На первом этапе исследований была применена технология черного ящика, которая заключалась в следующем: стандартных животных по стандартной методике помещали в чашку Петри, фиксировали их положения на видеокамеру, после чего с помощью оптоволокну подавались световые сигналы (532 нм, 630 нм, 395 нм и другие) к местам нахождения животных и осуществлялась видеофиксация их поведения. Исходя из спектра солнечного света, достигающего глубин обитания *Trichoplax*, поляризованных источников света в среде его обитания, клеточного строения кристаллических клеток и перечня генов опсинов были выбраны источники световых стимулов. Обобщенные данные выбора приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Обобщенные результаты выбора световых стимулов

Характеристика светового стимула	Уровень, глубина, на которой поглощается 99% света, метр (м)	Наличие гена опсина, соответствующего определенной длине волны света	Источники света в среде обитания	Источники света для моделирования
УФ 395 нм	107	RDD38879.1 Violet-sensitive opsin [Trichoplax sp. H2]	Солнечная гелиовертикаль	Профессиональный фонарь геолога
Зеленый	113	RDD36429.1 Green-sensitive opsin [Trichoplax sp. H2]	Свет, отраженный от водорослей	Лазер 532 нм с оптоволоком
Красный	4	Вопрос открыт	Свет от арагонитового панциря моллюска	Лазер 630 - 650 нм
Синий	254	RDD38730.1 Blue-sensitive opsin [Trichoplax sp. H2] RDD42761.1 Blue-sensitive opsin [Trichoplax sp. H2] RDD39212.1 Blue-sensitive opsin [Trichoplax sp. H2]		Светодиодные источники света при 6500 К
Оранжевый и желтый	25 и 51	нет		Лампа накаливания

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

Таблица 2

**Обобщенные результаты испытаний на оптическом микроскопе Леонардо 3.0**

Источник света	Экспертная оценка поведенческой реакции <i>Trichoplax</i>	Результаты наблюдения
Лампа накаливания	Форма тела интенсивно изменяется. Интенсивно уходит от источника света	Отрицательный фототаксис
Белый светодиод 6500 К, подсветка столика микроскопа лаб.	Интенсивно убегает на края чашки Петри	Отрицательный фототаксис
Лазерная указка, зеленый лазер 532 нм	Останавливается. На краях пластины наблюдается эффект кленового листа. Заострения линии края.	Фототаксис на остановку движения
Светодиодный фонарь 395 нм	После остановки форма пластинки округлая (круглая), изменяется с малой интенсивностью. Плавно двигается в сторону источника света	Положительный фототаксис
Лазерная указка, красный лазер 630–650 нм	Останавливается, не меняя форму и после непродолжительной остановки медленно уходит от источника света	Отрицательный фототаксис

На основе отработанной методики на оптическом микроскопе «Леонардо 3.0» и для подтверждения повторяемости выявленного RGB-таксиса были проведены работы на оптическом микроскопе в условиях лаборатории при выключенном освещении и затемненных окнах, а поведенческая реакция *Trichoplax* на световые стимулы (зеленый 532 нм и фиолетовый 395 нм) фиксировалась на камеру оптического микроскопа Nikon SMZ-1270, который полностью представлен в фильме *Trichoplax Movement control RGB-taxis* на YouTube.

Обобщенные результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

<b>Обобщенные результаты циклических испытаний</b>			
<b>Испытуемый Trichoplax хранился в стандартных условиях лаборатории, при пересадке в чашку Петри перекрутил тело по типу «восьмерки»</b>			
<b>№ цикла</b>	<b>Длина волны светового стимула</b>	<b>Реакция испытуемого Trichoplax</b>	<b>Время воздействия, секунды</b>
<b>1 цикл</b>	532 нм	Замер и сохранял перекрученную форму	58
	Led 6500 К	Форма восьмерки сохранилась	12
	395 нм	Начал интенсивно двигаться, раскручивая «восьмерку»	60
<b>2 цикл</b>	532 нм	Процесс раскручивания остановлен, Trichoplax замер и на краях пластинки появились зубцы – эффект «кленового листа»	37
	395 нм	Начался активный процесс раскручивания «восьмерки» до полного восстановления формы тела до стандартной. Это произошло на 50-й секунде	50
		Начал активно двигаться в сторону источника света	15
<b>3 цикл</b>	532 нм	Остановил активное движение, на краях пластинки появились зубцы	34
	395 нм	Восстановилась активность движения, края пластинки округлились	82
<b>4 цикл</b>	532 нм	Активность снизилась до остановки, края пластинки заострились	60
	395 нм	Края округлились, активность движения возросла	55
<b>5 цикл</b>	532 нм	Остановился, края пластинки заострились	33
	395 нм	Началось активное движение, края пластинки округлились	100

По результатам серии опытов, проведенных при участии руководителя проекта «Trichoplax бионики» д.б.н. Кузнецова А.В., можно сделать следующие выводы:

1. При воздействии зеленого 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. Впервые с помощью световых сигналов проведено управление поведением *Trichoplax* и его клетками, а также доказано наличие у *Trichoplax* RGB-таксиса.
5. Представленный метод может использоваться в гигиенических исследованиях влияния внешних загрязнителей на окружающую среду.

### Список литературы:

1. Bernd Schierwater, Rob DeSalle. Placozoa. *Current Biology*. 2018;28(3): 97-98.
2. Брылев В.А., Крючков В.Н., Залепухин В.В. Теоретические аспекты биоразнообразия: Учебное пособие. Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2003.
3. Srivastava M. et al. The *Trichoplax* genome and the nature of placozoans. *Nature*. 21 August 2008;454: 955–960.
4. C. Smith et al., Novel Cell Types, Neurosecretory Cells and Body Plan of the Early-Diverging Metazoan, *Trichoplax adhaerens* 2014. *Curr Biol*. 2014;24(14):1565-1572. DOI: 10.1016/j.cub.2014.05.046.
5. Carolyn L. Smith, Natalia Pivovarova, Thomas S. Reese. Coordinated Feeding Behavior in *Trichoplax*, an Animal without Synapses. *PLoS ONE*. 2015;10(9): e0136098. Doi:10.1371/journal.pone.0136098.
6. Moroz L. L. NeuroSystematics and Periodic System of Neurons: Model vs Reference Species at Single-Cell Resolution. *ACS Chemical Neuroscience*. 2018;9:1884–1903. <https://doi.org/10.1021/acchemneuro.8b00100>.
7. Никитин М. Нейротрансмиттеры и их функции у трихоплакса - животного без нервной системы <https://www.youtube.com/watch?v=OwnA4oFro0w>.
8. Romanova Daria Y., Ivan V. Smirnov Ivan V., et al. Sodium action potentials in placozoa: Insights into behavioral integration and evolution of nerveless animals. *Biochemical and Biophysical Research Communications*. 2020. DOI: 10.1016/j.bbrc.2020.08.020.
9. Shahaf Armona, Matthew Storm Bullb, Andres Aranda-Diaza, and Manu Prakasha,c Ultrafast epithelial contractions provide insights into contraction speed limits and tissue integrity *PNAS*. 2018;115(44). Edited by Andrea J. Liu, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA, and approved September 11, 2018 (received for review February 19, 2018).
10. Mark Ilton, et al. The principles of cascading power limits in small, fast biological and engineered systems Ilton et al., *Science* 360, eaao1082 (2018) 27 April 2018.
11. Mayorova T.D., et al. Cells containing aragonite crystals mediate responses to gravity in *Trichoplax adhaerens* (Placozoa), an animal lacking neurons and synapses, *PLoS One* 13. 2018. e0190905. 10.1371/journal.pone.0190905 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190905>.
12. Mayorova T. D. et al. A Gravity-Sensing Cell in *Trichoplax adhaerens*, an Early Branching Metazoan.337.04. Conference: Society for Neuroscience 2016, in San Diego.

13. Moroz L.L., Romanova D.Y., Nikitin M.A., Dosung Sohn, Kohn Andrea B. The diversification and lineage-specific expansion of nitric oxide signaling in Placozoa: insights in the evolution of gaseous transmission Emilie Neveu, and Dirk Fasshauer Frederique Varoqueaux в журнале Scientific reports, издательство Nature Publishing Group (United Kingdom). 2020;10:13020-10 DOI.
14. Nikitin M Bioinformatic prediction of Trichoplax adhaerens regulatory peptides General and Comparative Endocrinology, издательство Academic Press (United States). 2014 DOI: 10.1016/j.ygcen.2014.03.049 <https://istina.msu.ru/profile/HellMaus/>.
15. Романова Д.Ю. Разнообразие клеточных типов у гаплотипа H4 PLACOZOA SP. Морской биологический журнал. 2019; 4 (1): 81–90.
16. Серавин Л. Н., Гудков А. В. Trichoplax adhaerens (тип Placozoa) – одно из самых примитивных многоклеточных животных. Санкт-Петербург: ТЕССА. 2005:69.
17. Знакомьтесь: Трихоплакс, простейшее животное на Земле <https://scientificrussia.ru/articles/znakomtes-trihoplaks-prostejshee-zhivotnoe-na-zemle>.
18. Andreas Heyland, Roger Croll, Sophie Goodall, Jeff Kranyak, and Russell Wyeth Trichoplax adhaerens, an Enigmatic Basal Metazoan with Potential Trichoplax adhaerens, February. Methods in molecular biology (Clifton, N.J.). 2014;1128:45-61.
19. Никитин М. Нейротрансммиттеры и их функции у трихоплакса - животного без нервной системы <https://www.youtube.com/watch?v=OwnA4oFro0w>.
20. Mansi Srivastava. The Trichoplax genome and the nature of placozoans. Nature. 2008;454:955–960.
21. «Невидимая» рыба может осветить путь к лучшим оптическим устройствам <https://ru.livingorganicnews.com/invisible-fish-could-light-way-better-optical-devices-775007>.
22. Characterization of Light Reflection of Fish Guanine Crystals by Diamagnetic Micromanipulation.
23. Nico K Michiels, Nils Anthes, Nathan S Hart, Jürgen Herler, Alfred J Meixner, Frank Schleifenbaum, Gregor Schulte1, Ulrike E Siebeck, Dennis Sprenger and Matthias F Wucherer. Red fluorescence in reef fish: A novel signalling mechanism? BMC Ecology. 2008;8:16 doi:10.1186/1472-6785-8-16.
24. Sönke Johnsen. The Optics Of Life: A Biologist's Guide to Light in Nature "Оптика жизни: руководство биолога по свету в природе" <https://babylonzoology.com/optics/index.html>
25. Очаковский Ю. Е., Копелевич О.В., Войтов В.И. Свет в море <https://coollib.com/b/279274/read>.
26. Eitel M., Osigus H. J., DeSalle R., Schierwater B. Global diversity of the Placozoa. PLoS One. 2013;8(4): e57131. — doi:10.1371/journal.pone.0057131. — PMID 23565136.
27. Wenjie Zhu, a Jiaping Lin,\*a Chunhua Caia and Yingqing Lua Biomimetic mineralization of calcium carbonate mediated by a polypeptide-based copolymer.
28. Nicolette Nadene Houeild Shedding Light on a New Treatment for Diabetic Wound Healing: A Review on Phototherapy ScientificWorldJournal. 2014 doi: 10.1155/2014/398412.
29. Чачина Н.А., Кирток А.Н., Фролова М.С., Векшин Н.Л. Митохондрии - силовые электростанции нейронных сетей. Нейроинформатика Сборник статей. Ч.1. М., 2013:219-229.

30. Романова Д. Ю. Сравнительный анализ организации типов клеток и поведения у PLACOZOA. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук. 2020:26.
31. Novikov V.E., Levchenkova O.S., Pozhilova E.V. Reviews on Clinical Pharmacology and Drug Therapy Smolensk State Medical University, Smolensk, Russia. 2016;14(2):38-46.
32. Yeraldith Rojas Pérez and Roberto Etchenique Optical manipulation of animal behavior using a ruthenium-based phototrigger† Photochemical & Photobiological Sciences Issue. 2019;1.
33. Юрре Т.А., Рудая Л.И., Климова Н.В., Шаманин В.В. Органические материалы для фотовольтаических и светоизлучающих устройств. Физика и техника полупроводников. 2003;37(7).
34. Crystallization Pathways in Biomineralization Annual Review of Materials Research. 2011;41:21-40 (Volume publication date August 2011) <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-062910-095803>.
35. Mizukawa, Yuri Characterization of Light Reflection of Fish Guanine Crystals by Diamagnetic Micromanipulation Doctoral Theses. 2016:111.  
[https://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/en/list/doctoral\\_thesis/%E5%8D%9A%E5%A3%AB\(%E5%B7%A5%E5%AD%A6\)/p/2/item/40308](https://ir.lib.hiroshima-u.ac.jp/en/list/doctoral_thesis/%E5%8D%9A%E5%A3%AB(%E5%B7%A5%E5%AD%A6)/p/2/item/40308).
36. Chikashige T. and Iwasaka M. Magnetically-assembled micro/mesopixels exhibiting light intensity enhancement in the (012) planes of fish guanine crystals AIP Advances 8. 2018. 056704 <https://doi.org/10.1063/1.5006135>.
37. Dvir Gur, Benjamin A. Palmer, Steve Weiner, Lia Addadi Light Manipulation by Guanine Crystals in Organisms: Biogenic Scatterers, Mirrors, Multilayer Reflectors and Photonic Crystals Advanced functional materials. 2017;27 Issue6 February 10, 20171603514.
38. Speiser DI, Eernisse DJ, Johnsen S. A chiton uses aragonite lenses to form images. Curr Biol. 2011; 21: 665–670. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.03.033> PMID: 21497091.
39. Speiser DI, DeMartini DG, Oakley TH. The shell-eyes of the chiton *Acanthopleura granulata* (Mollusca, Polyplacophora) use pheomelanin as a screening pigment. J Nat Hist. 2014;48:2899–2911. <https://doi.org/10.1080/00222933.2014.959572>.
40. Aizenberg J, Tkachenko A, Weiner S, Addadi L, Hendler G. Calcitic microlenses as part of the photoreceptor system in brittlestars. Nature. 2001;412:819–822. <https://doi.org/10.1038/35090573> PMID: 11518966.
41. Ga'Il J, Horva'th G, Clarkson ENK, Haiman O. Image formation by bifocal lenses in a trilobite eye? Vision Res. 2000;40:843–853. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(99\)00216-3](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(99)00216-3) PMID: 10683460.
42. Козлов Д.В. Физическая химия, лекции <https://studfile.net/preview/4482440/>.
43. Разгадать тайны Черного моря: какие работы ведутся в лабораториях ИНБЮМа [https://www.youtube.com/watch?v=MEbz9t4eVVA&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?v=MEbz9t4eVVA&feature=emb_logo).

## References:

1. Bernd Schierwater, Rob DeSalle. Placozoa Current Biology Vol. 28, ISSUE 3, PR97-R98, February 05, 2018

2. Brylev V.A., Kryuchkov V. N., Zalepukhin V.V. Theoretical aspects of biodiversity: textbook. - Volgograd: Vol.SU Publishing House, 2003. - 192.
3. Srivastava M. et al. The Trichoplax genome and the nature of placozoans // Nature. 21 August 2008; 454:955–960.
4. C. Smith, et al. Novel Cell Types, Neurosecretory Cells and Body Plan of the Early-Diverging Metazoan, *Trichoplaxadhaerens* CurrBiol. 2014;24(14):1565-1572.DOI: 10.1016/j.cub.2014.05.046
5. Carolyn L. Smith, Natalia Pivovarova, Thomas S. Reese. Coordinated Feeding Behavior in *Trichoplax*, an Animal without Synapses. PLoS ONE. 2015;10(9). e0136098. Doi:10.1371/journal.pone.0136098.
6. Moroz L. L. Neuro Systematics and Periodic System of Neurons: Model vs Reference Species at Single-Cell Resolution. ACS Chemical Neuroscience. 2018;9:1884–1903. <https://doi.org/10.1021/acscemneuro.8b00100>
7. Nikitin M. Neurotransmitters and their functions in *Trichoplax* - an animal without a nervous system. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=OwnA4oFro0w>
8. Romanova Daria Y., Ivan V. Smirnov , et al. Sodium action potentials in placozoa: Insights into behavioral integration and evolution of nerveless animals // Biochemical and Biophysical Research Communications. 2020. DOI: 10.1016/j.bbrc.2020.08.020
9. Shahaf Armona, Matthew Storm Bullb, Andres Aranda-Diaza, and Manu Prakasha. Ultrafast epithelial contractions provide insights into contraction speed limits and tissue integrity PNAS. 2018;115:44 | Edited by Andrea J. Liu, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA, and approved September 11, 2018 (received for review February 19, 2018)
10. Mark Ilton, et al. The principles of cascading power limits in small, fast biological and engineered systems Ilton et al. 2018; 27 April. Science 360, eaao1082
11. Mayorova T.D., et al. Cells containing aragonite crystals mediate responses to gravity in *Trichoplaxadhaerens* (Placozoa), an animal lacking neurons and synapses, PLoS One 13. 2018. e0190905. 10.1371/journal.pone.0190905 Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190905>
12. Mayorova T. D. et al. A Gravity-Sensing Cell in *Trichoplaxadhaerens*, an Early Branching Metazoan.337.04. Conference: Society for Neuroscience 2016, in San Diego
13. Moroz L.L., Romanova D.Y., Nikitin M.A., DosungSohn, Kohn Andrea B. The diversification and lineage-specific expansion of nitric oxide signaling in Placozoa: insights in the evolution of gaseous transmission Emilie Neveu, and Dirk Fasshauer Frederique Varoqueaux in the journal Scientific reports, Nature Publishing Group (United Kingdom) Publishing House. 2013;10:13020-10 DOI
14. Nikitin, M. Bioinformatic prediction of *Trichoplaxadhaerens* regulatory peptides General and Comparative Endocrinology, Publ. house Academic Press (United States). 2014 DOI: 10.1016/j.ygcen.2014.03.049. Available at: <https://istina.msu.ru/profile/HellMaus/>
15. Romanova D.Yu. Diversity of cell types in the H4 PLACOZOA SP. Romanova. Marine Biological Journal. 2019; 4(1):81-90.
16. Seravin L. N., Gudkov A. V. *Trichoplaxadhaerens* (type Placozoa) is one of the most primitive multicellular animals. St. Petersburg: TESSA, 2005:69 .
17. Meet *Trichoplax*, the simplest animal on Earth. Available at: <https://scientificrussia.ru/articles/znakomtes-trihoplaks-prostejshee-zhivotnoe-na-zemle>

18. Andreas Heyland , Roger Croll, Sophie Goodall, Jeff Kranyak, and Russell Wyeth. *Trichoplaxadhaerens, an Enigmatic Basal Metazoan with Potential Trichoplaxadhaerens. Methods in molecular biology (Clifton, N.J.)*. 2014;1128:45-61
19. Nikitin M. Neurotransmitters and their functions in Trichoplax - an animal without a nervous system. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=OwnA4oFro0w>
20. Mansi Srivastava. The Trichoplax genome and the nature of placozoans. 2008;454:955–960.
21. "Invisible" fish can light the way to better optical devices. Available at: <https://ru.livingorganicnews.com/invisible-fish-could-light-way-better-optical-devices-775007>
22. Characterization of Light Reflection of Fish Guanine Crystals by Diamagnetic Micromanipulation.
23. Nico K Michiels, Nils Anthes, Nathan S Hart, Jürgen Herler, Alfred J Meixner, Frank Schleifenbaum, Gregor Schulte1, Ulrike E Siebeck, Dennis Sprenger and Matthias F Wucherer. Red fluorescence in reef fish: A novel signalling mechanism? *BMC Ecology* 2008;8:16 doi:10.1186/1472-6785-8-16
24. Sönke Johnsen *The Optics of Life: A Biologist's Guide to Light in Nature* "The Optics of Life: A Biologist's Guide to Light in Nature". Available at: <https://babylonzoo.blog/optics/index.html>
25. Ochakovsky Yu. E., Kopelevich O.V., Voitov V.I. Light at sea. Available at: <https://coollib.com/b/279274/read>
26. Eitel M., Osigus H. J., DeSalle R., Schierwater B. Global diversity of the Placozoa // *PLoSOne*. 2013;8(4):57131. — doi:10.1371/journal.pone.0057131. — PMID 23565136.
27. Wenjie Zhu, Jiaping Lin,\*a Chunhua Caia and Yingqing Lua Biomimetic mineralization of calcium carbonate mediated by a polypeptide-based copolymer
28. Nicolette Nadene Houreld. Shedding Light on a New Treatment for Diabetic Wound Healing: A Review on Phototherapy. *Scientific World Journal* . 2014 doi: 10.1155/2014/398412.
29. Chachina N.A., Kirtok A.N., Frolova M.S., Vekshin N.L. Mitochondria - Power Plants of Neural Networks // *Neuroinformatic , Moscow Collection of scientific papers: Part 1*. 2013:219-229
30. Romanova D. Yu. Comparative analysis of the organization of cell types and behavior in PLACOZOA. Abstract of PhD thesis (Biology). 2020:26
31. Novikov V.E., Levchenkova O.S., Pozhilova E.V. Reviews on Clinical Pharmacology and Drug Therapy. Smolensk State Medical University, Smolensk, Russia. 2016;14(2):38-46
32. Yeraldith Rojas Péreza and Roberto Etchenique Optical manipulation of animal behavior using a ruthenium-based phototrigger† *Photochemical & Photobiologica I Sciences* Issue 1. 2019.
33. Yurre T.A., Rudaya L.I., Klimova N.V., Shamanin V.V. Organic materials for photovoltaic and light-emitting devices *Physics and technology of semiconductors*. 2003;37(7).
34. Crystallization Pathways in Biomineralization. *Annual Review of Materials Research*. 2011;41:21-40. Available at: <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-062910-095803>
35. Mizukawa, Yuri. Characterization of Light Reflection of Fish Guanine Crystals by Diamagnetic Micromanipulation Doctoral Theses. 2016:111. Available at: [https://ir.lib.hiroshimau.ac.jp/en/list/doctoral\\_thesis/%E5%8D%9A%E5%A3%AB\(%E5%B7%A5%E5%AD%A6\)/p/2/item/40308](https://ir.lib.hiroshimau.ac.jp/en/list/doctoral_thesis/%E5%8D%9A%E5%A3%AB(%E5%B7%A5%E5%AD%A6)/p/2/item/40308)

36. Chikashige T. and Iwasaka M. Magnetically-assembled micro/mesopixels exhibiting light intensity enhancement in the (012) planes of fish guanine crystals AIP Advances 8. 2018. 056704. Available at: <https://doi.org/10.1063/1.5006135>
37. DvirGur , Benjamin A. Palmer, Steve Weiner , Lia Addadi. Light Manipulation by Guanine Crystals in Organisms: Biogenic Scatterers, Mirrors, Multilayer Reflectors and Photonic Crystals. Advanced functional materials. 2017;27(6). 20171603514
38. Speiser D.I., Eernisse D.J., Johnsen S. A chiton uses aragonite lenses to form images. Curr Biol. 2011; 21: 665–670. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.03.033> PMID: 21497091
39. Speiser DI, DeMartini DG, Oakley TH. The shell-eyes of the chiton *Acanthopleuragranulata* (Mollusca, Polyplacophora) use pheomelanin as a screening pigment. J Nat Hist. 2014;48: 2899–2911. Available at: <https://doi.org/10.1080/00222933.2014.959572>
40. Aizenberg J, Tkachenko A, Weiner S, Addadi L, Hendler G. Calcitic microlenses as part of the photoreceptor system in brittle stars. Nature. 2001;412:819–822. Available at: <https://doi.org/10.1038/35090573> PMID: 11518966
41. Ga'1 J, Horva'th G, Clarkson ENK, Haiman O. Image formation by bifocal lenses in a trilobite eye? Vision Res. 2000;40:843–853. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(99\)00216-3](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(99)00216-3) PMID: 10683460
42. Kozlov D.V. Physical chemistry, lectures. Available at: <https://studfile.net/preview/4482440/>
43. Solve the secrets of the Black Sea. What work is being done in the laboratories of In BYu. Available at: [https://www.youtube.com/watch?v=MEbz9t4eVVA&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?v=MEbz9t4eVVA&feature=emb_logo)

Поступила/Received: 09.03.2021.

Принята в печать/Accepted:10.03.2021.