

**Московская гимназия на Юго-Западе №1543 имени народного
учителя Российской Федерации Ю.В. Завельского**

**Наличие фототаксиса у взрослых колоний мшанок вида
Cristatella mucedo Cuvier, 1798 реки Шумаровки
Ярославской области**

Выполнили работу ученики 9-го «Б»:

Дарья Самсонова

Иван Ардатов

Максим Кузнецов

Тимофей Кузнецов

Научные руководители:

Ольга Вадимовна Иванова

к.б.н. Полина Андреевна Волкова

Введение

Мшанки, или Bryozoa, — колониальные, преимущественно морские прикрепленные организмы, составляющие самостоятельный тип первичноротых беспозвоночных животных, представленный около 6000 видов. В водах России преобладают представители классов Покрыторотых (*Phylactolaemata*) и Голоротых (*Gymnolaemata*) (Чесунов, 2013).

Колония мшанок — зоарий, состоит из большого числа маленьких особей, зооидов. Они несут лофофоры — венчик из большого количества реснитчатых щупалец, окружающих ротовое отверстие. С помощью них мшанка ловит различных микроорганизмов и органическую взвесь (детрит), являясь типичным представителем фильтраторов (Гонтарь, 2016).

У мшанок движение играет ключевую роль на ранних стадиях жизненного цикла, когда личинка должна найти подходящий субстрат для оседания. Способность к движению во взрослом состоянии наблюдается редко, например, в литературе описан механизм движения колонии *Lophopodella carteri* — попеременное сокращение кольцевых и продольных мышц стенки тела, которые воздействуют на общий целом, и периодическое прикрепление клейких желез к субстрату (Grabowski, 2000).

Личинки мшанок класса *Phylactolaemata* — свободно плавающая анцеструла (первый зооид колонии). Она позднее прикрепляется к субстрату и впоследствии не способна менять своё место (Гонтарь, 2016). В ходе эксперимента показано, что именно личинки демонстрируют выраженный положительный фототаксис, активно поднимаясь к свету сразу после выхода из колонии (Ryland, 1960; Pires, Woollacott, 1997). Источник света можно использовать для «приманивания» и последующего сбора пипеткой личинок в ходе экспериментов (Smith, 2022). По мере развития личинок поведение особей меняется на противоположное — появляется отрицательный фототаксис и личинки уходят в более тёмные зоны, где происходит оседание и метаморфоз (Wendt, Woollacott, 1999).

Пресноводная гребенчатая мшанка *Cristatella mucedo*, относящаяся к *Phylactolaemata*, имеет свободнодвижущуюся колонию из взрослых особей с широкой мускулистой подошвой, при помощи которой они медленно ползают по подводным предметам, например по стеблям водных растений. При этом скорость передвижения мшанки — около 1–15 мм в день (Боголюбов, 2018).

Литературные данные о поведении взрослых колоний противоречивы. Работа Шунькиной (2014) показала, что в естественных условиях колонии *Cristatella mucedo* предпочитают находиться с нижней стороны субстрата. Эти данные позволяют сделать предположение о том, что данный вид обладает отрицательным фототаксисом (Шунькина, 2014). Согласно наблюдениям Маркуса (Marcus, 1924), молодые колонии пресноводных мшанок *Cristatella*

mucedo также избегают прямого освещения и перемещаются в затенённые участки субстрата.

Наши предшественники в 2023 и 2024 годах проводили эксперименты с колонией мшанок, которую освободили от субстрата, поместили в чашки Петри, разделенные на светлую и темную половины. В 2024 году выраженного фототаксиса во всех шести экспериментах не было. Средняя температура воздуха была 29 °С, что на 6 градусов выше, чем в 2023 году. В 2023 году во всех экспериментах, где колонии были собраны из реки, наблюдали положительный фототаксис, но в единственном эксперименте, где колонии были взяты из пруда, направленного движения по отношению к свету выявлено не было. Гладун и Семутников (2023) сделали предположение, что наличие фототаксиса может зависеть от места сбора колоний, но в экспериментах 2024 года колонии, взятые из пруда, отсутствовали, поэтому данное предположение следует проверить в дальнейшем (Федоров и др., 2024).

Таким образом, на сегодняшний день наличие фототаксиса — достоверная и биологически значимая характеристика личинок мшанок, а для взрослых форм сведения противоречивы. Поэтому изучение направленного движения, в том числе фототаксиса, у мшанок остаётся актуальным.

Цель работы: изучить наличие фототаксиса у взрослых колоний мшанок *Cristatella mucedo*

Задачи:

1. Проверить, обладают ли колонии *C. mucedo* фототаксисом.
2. Изучить зависимость движения от времени помещения в экспериментальные условия.
3. Сравнить получившиеся результаты с прошлогодними.

Материалы и методы

Колонии мшанки вида *Cristatella mucedo* собирали Платон Фёдоров и Эльмир Рахманов в реке Шумаровка близ поселка Борок в Некоузском районе Ярославской области (58.040478° с.ш., 38.243500° в.д.) изымая их вместе с субстратом и избегая осушения, на глубине до 20 сантиметров в период с 29 июня по 2 июля 2025 года. Сразу после сбора или спустя сутки после сбора (Табл. 1) колонии по одной размещали в чашках Петри с линейкой, прикрепленной ко дну. Экспериментальные чашки были наполовину затенены с помощью козырьков таким образом, что половина дна была освещена лампами с яркостью 330 люксов, а половина — нет (Рис. 1), контрольные чашки были освещены полностью. Через час, после прикрепления колоний, начинали ежечасное фотографирование. Оно велось с 9:20 по 22:20, с ночным перерывом. Температура воздуха в экспериментальном помещении составляла 18°C.

Было проведено 5 экспериментов, в первых двух были использованы 32 чашки Петри: 16 полностью освещенных (контрольных) и 16 освещенных наполовину (экспериментальных), а в оставшихся трех — 44 чашки: 22 контрольных и столько же экспериментальных, но при этом в 11 контрольных и в 11 экспериментальных мшанки были помещены сразу же после вылова, а в оставшиеся — выловленные днем ранее, то есть прошедшие сутки в лаборатории (Табл. 1).

Рисунок 1. Схема чашки Петри, использованной в экспериментах.



Мы выровняли все фотографии относительно друг друга, с помощью программы ImageJ (Schindelin, 2012) по методике, разработанной в 2023 году (Семутников, Гладун, 2023). В итоге П. Фёдоров и Э. Рахманов получали таймлапсы для каждой чашки, по которым возможно измерение перемещений колоний. Далее мы, используя программу Fiji (Schindelin et al., 2012), измеряли координаты каждого из концов каждой колонии на всех фотографиях из таймлапсов. Два человека независимо проводили измерения для каждой емкости, после чего мы усреднили данные. Далее мы выбрали два эксперимента с наименьшим количеством случаев разделения колоний — первый и третий (Табл. 1). Из координат мшанок этих двух экспериментов были сформированы таблицы, где были подсчитаны путь и перемещение каждой колонии по перпендикулярным осям, из которых ось Y — ось направления «к свету» в экспериментальных установках, и аналогичного направления в контрольных чашках, ось X — перпендикулярная ей линия раздела света и тени, обе оси были размечены на дне чашки Петри перед экспериментом.

Мы считали отдельно движение к свету и в тень, то есть на соответствующую половину дна чашки Петри, а также отсутствие движения. В полностью освещенных контрольных чашках мы называли движением «к свету» или «от света» перемещение по оси Y, соответствующее аналогичному направлению движения в экспериментальных чашках.

Далее в программе R (R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria) были сформированы графики, на которых отображались координаты обоих концов мшанки по вертикали и время по горизонтали.

Для проверки статистической значимости различий между группами мы использовали тест хи-квадрат.

Влияние на фототаксис таких параметров как размер, форма рассмотрены не были ввиду крайней изменчивости этих факторов.

Таблица 1. Параметры проанализированных экспериментов.

Номер эксперимента (дата сбора колоний)	Дата (время) первого фотографирования	Дата (время) последнего фотографирования	Число чашек Петри	Число фотографий в одном таймлапсе
1 (1.07)	1.07 (20:20)	2.07 (18:20)	32	11
3 (29.06)	29.06 (15:20)	30.06 (12:20)	22	12
3 (28.06)			22	

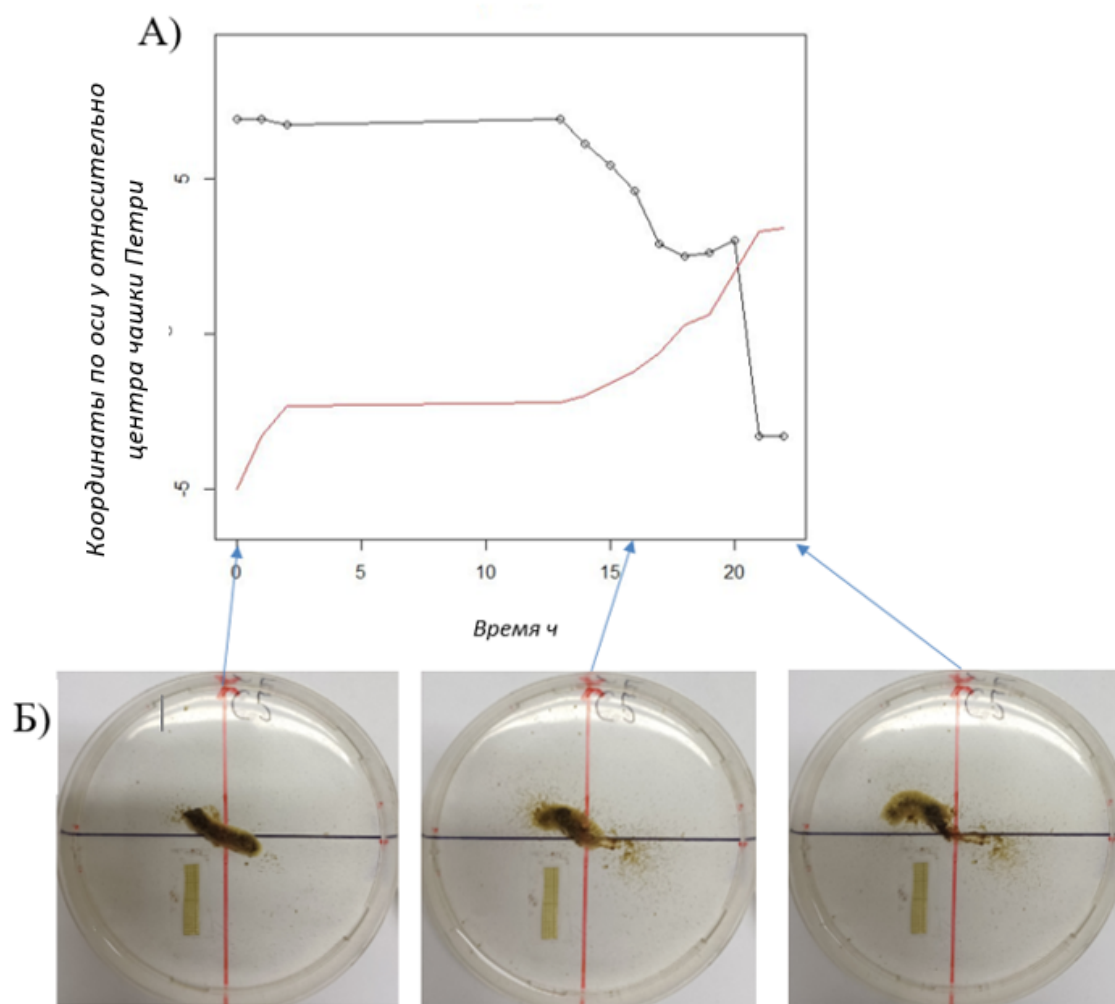
Результаты

Соответствие изменения координат концов колонии мшанки направлению ее движения.

Графики отображают изменение координат двух концов колоний мшанок. Однако в этом году большинство колоний обладали сложным поведением, то есть всячески разворачивались и изгибались, вследствие чего они не отражают реального перемещения мшанок. В качестве примера приведем график перемещения мшанки из эксперимента 3 (контрольная группа, 5 чашка) (Рис. 2).

Итак, при сложном поведении колоний мшанок, правильнее анализировать их перемещения относительно света по таймлапсам, нежели по координатам концов колонии.

Рисунок 2. Положения концов колонии мшанок пятой контрольной группы третьего эксперимента по оси перпендикулярной линии раздела света и тени (оси Y). Черная линия — изменение координат первого конца колонии. Красная линия — изменение координат второго конца колонии.



Качественный анализ движения мшанок по фотографиям.

Для экспериментов 1 и 3 мы посчитали число колоний, двигавшихся в две противоположные стороны относительно света в эксперименте или в те же две стороны для контроля, несмотря на то, что там направления «к свету» и «от света» не отличались по условиям освещенности, а также выделили группу не двигавшихся колоний. В каждой подгруппе мы посчитали доли колоний с такими направлениями движения (Табл. 2).

Таблица 2. Абсолютное число колоний (процентная доля от всех в данной группе), которые двигаются в разные стороны по отношению к свету. Первое число в сумме — количество мшанок, которые начали движение в начале эксперимента, второе, соответственно, — ближе к концу.

	Контрольная группа			Экспериментальная группа		
Номер эксперимента	«к свету»	«от света»	не ползло	к свету	от света	не ползло
1	1+3 (25%)	0+4 (25%)	0+8 (50%)	0+9 (56%)	2+2 (25%)	0+3 (19%)
3 (сразу после сбора)	2+1 (27%)	1+4 (45%)	3+0 (27%)	2+4 (55%)	2+2 (36%)	1+0 (9%)
3 (спустя сутки)	4+0 (36%)	1+2 (27%)	4+0 (36%)	4+0 (36%)	2+0 (18%)	5+0 (45%)

В контрольной группе первого эксперимента половина колоний мшанок не перемещается по оси Y, четверть колоний движется «к свету», и четверть — «от света». В экспериментальной группе первого эксперимента больше половины (56%) мшанок движется к свету, четверть движется от света и 19% — не ползёт. 18 колоний (около 86%) начинают двигаться ближе к концу эксперимента, 3 — ближе к началу (около 14%).

В третьем эксперименте среди колоний, которые собрали непосредственно перед экспериментом, среди контрольных колоний чуть меньше половины (45%) мшанок движутся «от света», 27% мшанки не ползут, 27% — перемещаются «к свету». В экспериментальной группе больше половины 55% мшанок движутся к свету, 36% — от света, и только одна мшанка (9%) не перемещается. Среди колоний, которые провели сутки в лаборатории, количество мшанок контрольной группы, двигающихся «к свету», «от света» или не перемещающихся примерно

совпадает. В экспериментальной группе около половины колоний (45%) не ползло, 36% — ползло к свету и 18% — от света.

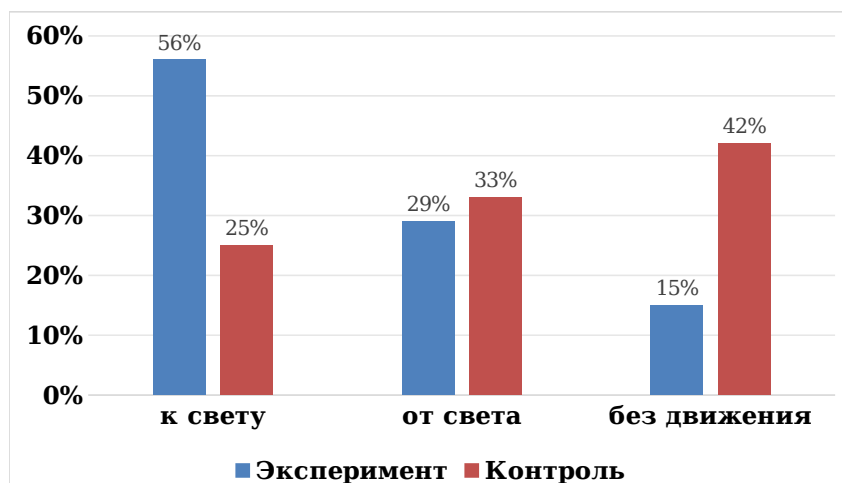
В третьем эксперименте 18 колоний мшанок двигались ближе к началу эксперимента (порядка 58%) и 13 — ближе к концу (около 42%).

Обсуждение

В контрольной группе первого эксперимента половина колоний не ползет. В третьем эксперименте в контрольной группе среди свежесобранных колоний больше половины мшанок движутся «от света», и поровну ползут «к свету» или стоят на месте, а среди собранных за сутки распределение приблизительно равномерное. Закономерности в направлении их движения не выявлено.

Решая задачу изучения зависимости движения от времени помещения колоний в экспериментальные условия, мы проанализировали процентную долю колоний, которые двигались к свету, от света или не двигались. На рисунке 3 видно, что в экспериментальной группе что среди свежесобранных колоний, в 56% случаев мшанки обладали положительным фототаксисом, в контрольной группе таких колоний было всего 25%. Для сравнения частот и уточнения достоверности отличий между экспериментальной и контрольной группами мы использовали тест хи-квадрат. В экспериментальных группах среди свежесобранных колоний достоверно чаще, чем в контроле, наблюдается движение к свету, а не другое поведение ($p=0,035$, $\chi^2 = 4,439$). Кроме того, число колоний без движения в полностью освещенных контрольных чашках было в 3 раза больше. Из колоний, которые были помещены в чашку Петри через сутки, около половины не двигалось.

Рисунок 3. Частота вариантов движения колоний мшанок *Cristatella mucedo*, помещенных в чашки Петри сразу после отбора. Для контроля движения к свету и от света — это движение в стороны, соответствующие таковым в экспериментальных чашках, но не отличающиеся по освещенности.



В то же время распределение колоний по признаку «ползут к свету/от света/не ползут» в эксперименте с отсроченным помещением колоний в чашки Петри было приблизительно равным (Табл. 2).

Между контрольной и экспериментальной группами наблюдалось явно выраженное различие (отсутствие явно выраженного таксиса в контроле и слабо выраженный фототаксис в эксперименте), что свидетельствует об отсутствии других стимулов помимо света. По нашим данным у немногим более чем половины мшанок наблюдался слабо выраженный положительный фототаксис. Эти результаты согласуются с наблюдениями наших предшественников в 2024 году (Федоров и др., 2024). В 2023 году (Семутников, Гладун, 2023) у колоний из реки наблюдался явно выраженный положительный фототаксис, а в колониях из пруда фототаксис отсутствовал вовсе. Однако, в этом году, проверить влияние места сбора на фототаксис не удалось – колонии собирались исключительно из реки.

Температура воды во время проведения экспериментов в этом году была на 4–10 °С меньше, чем в предыдущем году и примерно соответствовала условиям 2023 года, что могло повлиять на движение и фототаксис мшанок, как и аномально теплая погода годом ранее (Федоров и др., 2024). Также важно отметить, что во время эксперимента мшанки были в несколько раз слабее освещены, чем в естественной среде, это могло объяснить различие наших результатов от «классических» данных о движениях мшанок (Ryland, 1960; Pires, Woollacott, 1997), но не от результатов наших экспериментов прошлых лет (Семутников, Гладун, 2023; Федоров и др., 2024), поскольку освещение экспериментальных установок всегда было одинаковым.

Выводы:

1. Среди свежесобранных колоний наблюдается слабовыраженный положительный фототаксис, полностью освещенные колонии же чаще остаются на месте.
2. Движение колоний зависит от времени помещения в экспериментальные условия, после суток в лаборатории колонии не проявляли явного фототаксиса.
3. Наши данные согласуются с результатами работ наших предшественников, но не согласуются с наблюдениями в работах, описанных ранее.

Благодарности

Мы благодарим администрацию Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, особенно его директора Александра Витальевича Крылова за предоставленную возможность работать на территории стационара «Сунога», а

также Сергея Менделевича Глаголева и Екатерину Викторовну Елисееву за организацию практики. Мы благодарны Полине Андреевне Волковой, Ольге Вадимовне Ивановой и Платону Максимовичу Федорову за научное руководство и помощь в анализе полученных результатов. Благодарим рецензента Александру Ивановну Чаву за высокую оценку нашей работы и ценные замечания, позволившие улучшить качество нашей работы. Также выражаем благодарность Эльмиру Эльхановичу Рахманову за выполнение экспериментальной части работы.

Литература

1. Боголюбов А. С., Кравченко М. В. Компьютерный определитель пресноводных беспозвоночных России. — Москва: Экосистема, 2018 [Электронный ресурс]. — 2023. URL: <https://ecosystema.ru/08nature/w-invert/007.htm>
2. Гладун В., Семутников К. Влияние освещённости на скорость и направление движения колоний пресноводной мшанки *Cristatella mucedo* Cuvier, 1798 [Электронный ресурс]. — 2023. URL: https://bioclass.ru/wp-content/uploads/2024/11/Mshanki_2023.pdf
3. Гонтарь В. И. Мшанки // Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 2. Зообентос / под ред. В.Р. Алексеева, С.Я. Цалолихина. — СПб.: Зоологический институт РАН, 2016. С. 153–163.
4. Федоров П. М., Чжао М., Просвирякова М. А. Наличие фототаксиса у взрослых колоний мшанок вида *Cristatella mucedo* Cuvier, 1798 реки Шумаровки Ярославской области. — 2024. URL: <https://www.school.ioffe.ru/readings/2025/thesis2025.pdf>
5. Чесунов А. В. Мшанки // Монголы — Наноматериалы. — М.: Большая российская энциклопедия, 2013. — С. 546–547. — (Большая российская энциклопедия: [в 35 т.] / гл. ред. Ю. С. Осипов; т. 21, 2004–2017).
6. Шунькина К. В. Сравнительная нейроморфология трех видов пресноводных мшанок *Cristatella mucedo*, *Plumatella repens* и *Fredericella sultana* (Bryozoa, Phylactolaemata). — Санкт-Петербург, 2014.
7. Grabowski R., Balser S. Colony Movement in the Freshwater Bryozoan *Lophopodella carteri* // John Wesley Powell Student Research Conference. — 2000. URL: <https://digitalcommons.iwu.edu/jwprc/2000/posters/9>
8. Marcus E. Beobachtungen und Versuche an lebenden Süßwasserbryozoen // Zoologische Jahrbücher. Abteilung für Anatomie und Ontogenie der Tiere. — 1924. — Bd. 47. — S. 179–238.
9. Pires A., Woollacott R. M. Serotonin and dopamine have opposite effects on phototaxis in larvae of the bryozoan *Bugula neritina* // Biol. Bull. — 1997. — Vol. 192, № 3. — P. 399–409.
10. R: A language and environment for statistical computing [Электронный ресурс] / R Core Team. — Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2022.
11. Ryland J. S. Experiments on the influence of light on the behaviour of polyzoan larvae // Journal of Experimental Biology. — 1960. — Vol. 37, № 4. — P. 783–800.

12. Schindelin J., Arganda-Carreras I., Frise E., et al. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis // *Nature Methods*. — 2012. — Vol. 9, № 7. — P. 676–682. doi:10.1038/nmeth.2019
13. Smith A. M., Batson P. B., Achilleos K., Tamberg Y. Collecting and culturing bryozoans for regenerative studies // *Whole-Body Regeneration* / eds. Blanchoud S., Galliot B. (*Methods in Molecular Biology*, vol. 2450). — New York: Humana, 2022. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-0716-2172-1_8
14. Wendt D. E., Woollacott R. M. Ontogenies of phototactic behavior and metamorphic competence in larvae of three species of *Bugula* (Bryozoa) // *Invertebrate Biology*. — 1999. — Vol. 118, № 1. — P. 75–84. URL: <https://doi.org/10.2307/3226915>.