

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Боян Цао

**Влияние биогенных аминов на ростовые и биохимические характеристики
микроводорослей**

Специальность 1.5.15. Экология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени кандидата биологических наук

Москва – 2026

Диссертация подготовлена на кафедре общей экологии и гидробиологии биологического факультета федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Научный руководитель *Олескин Александр Владимирович, доктор биологических наук, профессор*

Официальные оппоненты *Рощина Виктория Владимировна, доктор биологических наук, Институт биофизики клетки РАН, вед. н. сотр.*
Остроумов Сергей Андреевич, доктор биологических наук, , Московский Государственный университет имени М.В.Ломоносова, биологический ф-т, вед. н. сотр
Николаев Юрий Александрович, доктор Биологических наук, Институт микробиологии ФИЦ Биотехнология РАН, заведующий лабораторией

Защита диссертации состоится « » 2026 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.015.3 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, ауд. М-1.

E-mail: *paramonovata@my.msu.ru*

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3362>

Автореферат разослан « » 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат биологических наук

Т.А. Парамонова

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. Настоящая диссертационная работа связана с одной из самых бурно развивающихся областей современной экологии – экологической токсикологией (environmental toxicology) как изучением вредоносного воздействия химических, физических и биологических факторов на живые организмы и их популяции и экосистемы (Матвиенко, 2006). Наряду с другими токсическими факторами, в последние годы в окружающую среду в возрастающем количестве поступают активные фармацевтические ингредиенты (АФИ). Эти вещества поступают в окружающую среду со стоками учреждений здравоохранения, фармацевтической, косметической и пищевой индустрии, с муниципальными отходами. Некоторые подгруппы АФИ явно превышают по концентрациям в окружающей среде безопасный уровень, среди них нейроактивные вещества, такие как антидепрессанты, антигистаминные препараты, β -адреноблокаторы, анестетики, блокаторы кальциевых каналов и др. (Bouzas-Monroy et al., 2022). Воздействие некоторых из АФИ особенно сильно именно в водных экосистемах уже в низких концентрациях, постольку поскольку они идентичны или гомологичны сигнальным веществам различных гидробионтов.

К эволюционно-консервативным соединениям, выполняющим сигнальные и регуляторные функции у различных компонентов водных экосистем (обзор: Олескин, 2024), относятся вещества, тестированные на предмет токсического эффекта на модельных объектах (микроводорослях) в настоящей работе – такие нейротрансмиттеры как ацетилхолин (АХ) и биогенные амины серотонин (5-НТ), гистамин, норадреналин (НА) и дофамин (ДА). Хотя данные соединения не фигурируют в официальных международных списках опасных экотоксинов из числа АФИ и сравнительно быстро расщепляются в водной среде, они могут постоянно «поставляться» в окружающую среду со сточными водами фармацевтических предприятий,

учреждений здравоохранения, а также пищевой промышленности. Дофамин, норадреналин и серотонин производятся фармацевтическими компаниями в России и за рубежом. Стоки пищевой промышленности также содержат нейротрансмиттеры; так, они содержатся в крови и других биологических жидкостях животных. Гистамин накапливается при хранении пищевых продуктов вследствие бактериального метаболизма аминокислоты гистидина. Имеются также механизмы вторичного накопления нейротрансмиттеров в природных экосистемах под воздействием других антропогенных экотоксикантов, в том числе и АФИ.

В диссертационной работе антропогенные нейротрансмиттеры в среде рассматриваются в контексте их эндогенного синтеза в качестве коммуникативных сигналов, когда они вырабатываются компонентами природных экосистем, в частности, одноклеточными существами. Именно «молекулярная мимикрия» антропогенных нейроактивных поллютантов под эндогенные регуляторы и сигналы обуславливает предпосылки к их достаточно эффективному воздействию как экотоксикантов в низких концентрациях; такое воздействие и было продемонстрировано в экспериментальной части настоящей работы на примерах зеленых микроводорослей и цианобактерий.

Исследования эффектов биогенных аминов (БА) у микроводорослей, помимо значения с точки зрения экотоксикологии, представляет интерес с точки зрения изучения коммуникации между ними и другими организмами в составе водных или почвенных экосистем. Ведь вопрос о влиянии БА как специфических регуляторов роста и биохимических процессов изучался в литературе в отношении бактерий, практически не затрагивая микроорганизмов-эукариот, таких как микроводоросли, а также такую подгруппу прокариот как цианобактерии. Имеются лишь отдельные работы по эффектам, например, ацетилхолина на микроводоросли р. *Chlorella* (Czerpak et al., 2003; Parsaiemehr et al., 2015) и дофамина на *Haematococcus lacustris* (Zhao et al., 2025).

Взятые для тестирования модельные объекты из числа микроводорослей имеют существенное биотехнологическое значение как продуценты ценных веществ, в том числе и в режиме аквакультуры, при неизбежном контакте со сточными водами, включая стоки фармацевтической, косметической и пищевой индустрии.

Цель работы: Детально исследовать воздействие биогенных аминов как потенциально значимых экотоксикантов на ростовые и биохимические характеристики модельных объектов –компонентов фитопланктона – зеленых микроводорослей и цианобактерий.

Задачи работы:

1. Оценить эффекты нейротрансмиттеров (серотонина, гистамина, дофамина, норадреналина, ацетилхолина) на ростовые характеристики тестируемых объектов – зеленых микроводорослей *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus quadricauda*, *Haematococcus lacustris*, цианобактерии *Limnospira platensis*.
2. Провести исследования воздействия указанных нейротрансмиттеров на жирнокислотный состав липидов в динамике развития культур перечисленных зеленых водорослей и цианобактерий.
3. Оценить влияние избранных нейротрансмиттеров на содержание фотосинтетических пигментов, в том числе биотехнологически важных продуктов (астаксантин и другие каротиноиды), в ходе развития данных культур.
4. Сопоставить собственные результаты с данными литературы для оценки роли нейротрансмиттеров как экотоксикантов, специфические эффекты которых обусловлены тем, что они вырабатываются также и самими компонентами природных экосистем как сигнальные и регуляторные агенты.

Научная новизна работы. В работе была впервые продемонстрированы стимулирующие эффекты биогенных аминов (дофамина, норадреналина, серотонина, гистамина, ацетилхолина) в низких (микромольных) концентрациях на рост и накопление жирных кислот и фотосинтетических

пигментов зелеными микроводорослями *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus quadricauda*, *Haematococcus lacustris* и цианобактериями *Limnospira platensis*, что говорит о возможности бесконтрольного роста данных компонентов фитопланктона в присутствии нейротрансмиттеров как экотоксикантов . Впервые выяснено влияние нейротрансмиттеров на содержание различных жирных кислот в составе липидов указанных объектов, а также на содержание фотосинтетических пигментов в их клетках.

Теоретическое и практическое значение работы. С точки зрения экологической токсикологии показанные в настоящей работе эффекты низких концентраций нейроактивных соединений на ростовые характеристики, жирнокислотный состав липидов и содержание фотосинтетических пигментов в клетках зеленых микроводорослей и цианобактерий указывают на потенциальную возможность бесконтрольного размножения этих компонентов фитопланктона даже в присутствии «следовых» количеств нейротрансмиттеров в составе стоков фармацевтической, косметической и пищевой индустрии с угрозой эвтрофикации соответствующих водоемов. С точки зрения водной экологии и гидробиологии, полученные данные говорят о вероятном вкладе тестированных нейротрансмиттеров в химический «диалог» между данными представителями фитопланктона и различными компонентами водных экосистем, способными к генерации и выделению в среду нейротрансмиттеров, в том числе представителями зоопланктона (*Daphnia magna*) и береговых высших растений, у которых в данной работе были детектированы эндогенные нейротрансмиттеры. Результаты настоящей работы могут быть также использованы в педагогическом процессе в рамках курсов по токсикологии, альгологии, экологии или гидробиологии.

Методология и методы исследования: в работе использован комплекс культивационных, спектрофотометрических, хроматографических методов, а также методы статистической обработки результатов (см. подробнее раздел «Объекты и методы» ниже).

Положения, выносимые на защиту:

1. Нейроактивные биогенные амины дофамин, норадреналин, серотонин, гистамин и ацетилхолин в микромолярных концентрациях стимулируют накопление биомассы зеленых микроводорослей *Chlorella vulgaris* Beijer, *Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Breb. K-1149 и *Haematococcus lacustris* IPPAS H-239 и VM-1 (только серотонин и ацетилхолин). Серотонин, ацетилхолин и гистамин также стимулируют накопление биомассы цианобактерии *Limnospira platensis* IPPAS B-256. Эти результаты указывают на возможную роль биогенных аминов как угрожающих «цветением» водоемов и эвтрофикацией экотоксинов.
2. Некоторые из тестированных нейротрансмиттеров повышают содержание в клетках микроводорослей (цианобактерий) фотосинтетических пигментов (хлорофиллов и/или каротиноидов). У *H. lacustris* нейротрансмиттеры повышают процентное содержание комбинирующих хлорофилл и каротиноиды пальмеллоидных и/или накапливающих только каротиноиды покоящихся клеток.
3. Ацетилхолин и некоторые из остальных испытанных нейротрансмиттеров (их «набор» видоспецифичен) увеличивали содержание жирных кислот в липидах тестированных микроводорослей/цианобактерий.
4. Нейротрансмиттеры сдвигали баланс между насыщенными и ненасыщенными жирными кислотами у изученных микроводорослей. Например, норадреналин у *H. lacustris* и *L. platensis* повышал долю ненасыщенных кислот; напротив, тот же норадреналин у *S. quadricauda* повышал процентное содержание насыщенных жирных кислот.
5. Полученные данные подкрепляют представление о нейроактивных биогенных аминах как потенциально важной составной части пула антропогенных экотоксинов, которые действуют в низких концентрациях и, вероятно, воспринимаются фитопланктоном как если бы это были коммуникативные сигналы и регуляторные вещества, выделяемые другими

компонентами водных экосистем, например дафнии *Daphnia magna* и растения, обрастающие водоемы, у которых в настоящей работе обнаружены нейротрансмиттеры.

Степень достоверности и апробация результатов. Все описанные в работе эксперименты проведены по крайней мере в 3-4 независимых повторностях, вычислены средние значения и стандартные отклонения, применены статистические процедуры (*t*-критерий Стьюдента, непараметрический Н-тест Крускала-Уоллиса).

Основные положения и результаты научно-квалификационной работы были доложены на следующих всероссийских и международных конференциях: Ломоносовские чтения 2021, МГУ им.М.В. Ломоносова, 21 апреля 2021; 3-й Российский микробиологический конгресс, Псков, 26 сентября - 1 октября 2021; VII Пушинская конференция «Биохимия, физиология и биосферная роль микроорганизмов», Школа-конференция для молодых ученых, аспирантов и студентов "Генетические технологии в микробиологии и микробное разнообразие", Пушкино, 6-9 декабря 2021; Международный Круглый Стол «Развитие человека и человекоцентричной охраны здоровья: возможности, вызовы и глобальные риски», Москва, Институт философии РАН, 10 ноября 2022; «Экологическая физиология водных фототрофов». X Сабининские чтения с 20 апреля по 10 мая 2023г., Москва, 15 марта - 10 мая 2023; 5th Edition of International Nutrition Research Conference, Валенсия, Испания, 11-13 сентября 2023; Ломоносовские чтения - 2024. Секция «Биология», Москва, МГУ имени М.В. Ломоносова, 26 марта - 4 апреля 2024.

Личный вклад автора. Автором лично проведены все эксперименты по влиянию нейротрансмиттеров на ростовые характеристики микроводорослей и цианобактерий, спектрофотометрические измерения, статистические процедуры, пробоподготовка для измерения концентраций жирных кислот и пигментов, а также нейротрансмиттеров. Автор лично собирал, обрабатывал, определял видовую принадлежность образцов листьев растений, растущих по

берегам прудов парка Даюн в г. Шэньчжэнь. Автор полностью создал английскую версию диссертационной работы (за редактирование русской версии выражаю глубокую благодарность научному руководителю проф. А.В. Олескину). В списке работ в конце автореферата отражен вклад диссертанта в каждую работу.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликованы 12 статей, из них 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ.015.3.

Структура и объем диссертационной работы. Настоящая работа состоит из введения, обзора литературы, методического раздела, раздела «Результаты» (4 подраздела), раздела «Обсуждение результатов», заключения, выводов, списка литературы. Общий объем диссертационной работы, выполненной на английском языке, составляет 209 страниц. Список литературы насчитывает 178 работ. Диссертация включает 37 рисунков (в том числе графики) и 55 таблиц.

Благодарности: Автор желает выразить глубокую благодарность своему руководителю проф. Олескину А.В. за постоянную поддержку на протяжении всего периода диссертационной работы и проф. Юзбекову А.К. Остроумову С.А., Рощиной В.В., за рецензирование настоящей диссертационной работы. Автор очень признателен проф. Е.С. Лобаковой, проф. А.Е. Соловченко, О.Б. Чивкуновой, Т.А. Федоренко за помощь и сотрудничество в ходе выполнения экспериментов в их лаборатории.

II. СОДЕРЖАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обзор литературы

Глобальную угрозу экосистемам Земли ныне несут не только пестициды и промышленные отходы. Все более заметную роль играют лекарственные препараты и средства личного ухода и гигиены (pharmaceuticals and personal care products, PPCP). Не фигурирующие в официальных списках опасных экотоксикантов и неустойчивые в окружающей среде нейротрансмиттеры –

ацетилхолин, серотонин, дофамин и другие биогенные амины – тем не менее постоянно поступают в природные экосистемы вместе со сточными водами и, более того, вторично производятся компонентами природных экосистем под воздействием других АФИ.

В литературном обзоре дается детальная характеристика таких нейротрансмиттеров как ацетилхолин, серотонин, дофамин и другие биогенные амины как широко распространенных в мире живого химических регуляторов и сигналов у различных компонентов природных экосистем, включая микроорганизмы, представители фито- и зоопланктона, водные и береговые высшие растения, морские позвоночные (на примере рыб). Также излагаются сведения о биотехнологических применениях данных нейротрансмиттеров, поскольку, кроме роли экотоксикантов, нейротрансмиттеры рассматриваются в свете данных диссертации как потенциальные стимуляторы синтеза микроводорослями практически ценных продуктов.

Объекты и методы исследования

Основными объектами исследования в работе служили цианобактерия *Limnospira platensis* IPPAS B-256, эукариотические зеленые микроводоросли *Chlorella vulgaris* Beijer, *Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Breb. K-1149, *Haematococcus lacustris* (= *pluvialis*) штаммы IPPAS H-239 и BM-1. В опытах по измерению эндогенных нейротрансмиттеров объектами были также водяная блоха *Daphnia magna* и растения *Plumeria rubra* L. cv. *acutifolia*, *Syzygium jambos* (L.) Alston, *Buxus megistophylla* (*Euonymus japonicus* cv. *aureoma*), *Cinnamomum bodinieri* Levl. Микроводоросли асептически культивировали в 250 мл колбах при интенсивности освещения 65 мкмоль фотонов ФАР м⁻² с⁻¹ с постоянной аэрацией атмосферным воздухом посредством барботера при 24°C на среде Зарукка (*L. platensis*), на модифицированной среде Тамия (*C. vulgaris*, *S. quadricauda*), на среде BG-11 (штаммы *H. lacustris*).

Оценка ростовых параметров. Рост культур оценивали подсчетом клеток

или цепочек клеток (трихомов, в случае цианобактерии *L. platensis*) микроскопически в камере Горяева (с пересчетом на 1 мл объема культуры). В случае *L. platensis* также измеряли массу сухих клеток культуры, пересчитывая его на 1 мл объема культуры. В культуре *H. lacustris* также отдельно подсчитывали число вегетативных, пальмеллоидных и покоящихся клеток. Активно растущие культуры служили инокулятом. Выбранные точки для оценки роста (1, 2, 3, 4 сут. для *C. vulgaris*; 1, 2, 4, 7 сут. для *S. quadricauda*; 7 и 14 сут. для *H. lacustris* и *L. platensis*) соответствовали лаг-фазе, ранней экспоненциальной фазе, поздней экспоненциальной фазе и стационарной фазе¹.

Вносили 0.1, 1, 10 или 100 мкМ гидрохлоридов ацетилхолина, дофамина, гистамина, норадреналина и серотонина при инокуляции в виде свежеприготовленных водных растворов (по данным литературы, дополнительное добавление нейротрансмиттеров в процессе роста культуры не вызывает дополнительных эффектов (Олескин и др., 1998); в контроле при инокуляции добавляли равный объем воды. Все нейротрансмиттеры были аналитического качества (“Sigma”, США).

Определение жирнокислотного состава липидов и содержания фотосинтетических пигментов в клетках микроводорослей (цианобактерий) проводили по методу, описанному в работе (Solovchenko et al., 2015). Культуры в стационарной фазе роста центрифугировали, осадок гомогенизировали в смеси хлороформ–метанол 2:1 об./об. (10 мл) и экстрагировали липидную фракцию, содержащую также пигменты. Хлорофиллы *a* и *b*, а также суммарные каротиноиды определяли с помощью спектрофотометра «Cary 300 Bio» (США) с использованием коэффициентов поглощения в хлороформе (Well, 1994). Анализ липидов и определение жирных кислот проводили методом газовой хроматографии (Kates, 1986). Метилловые эфиры жирных кислот были разделены по временам удерживания стандартных

¹ В случае культур *H. lacustris* и *L. platensis*, две избранные точки соответствовали поздней экспоненциальной и стационарной фазе роста

соединений («Supelco», США) и по масс-спектрам, полученным с помощью газового хроматографа «Agilent 7890», оснащенного 30-метровой капиллярной колонкой «HP5MS UI» с масс-селективным детектором («Agilent», США).

В случае *L. platensis* и *H. lacustris* (оба штамма) для определения пигментов суммарную фракцию хлорофиллов и каротиноидов экстрагировали диметилсульфоксидом (DMSO) в течение 5 мин при 70 °С. Концентрации пигментов определяли в экстрактах DMSO спектрофотометрически по коэффициентам из работы (Solovchenko et al., 2010).

Определение эндогенных нейротрансмиттеров в тканях прибрежных растений, микроводорослях и дафниях. Использованные для измерения концентрации биогенных аминов образцы *листьев растений* были отобраны вдоль кромки воды парковых прудов г. Шэньчжэнь (парк Даюнь) в начале июня между 18 и 19 ч по местному времени. Замороженные образцы листьев измельчали с помощью ступки с кварцевым песком при температуре 0° С в 0,1 н. HCl; остатки удаляли центрифугированием (20 000 g, 20 мин).

Клетки *микроводорослей* отделяли от среды в стационарной стадии роста (7 день культивирования у *S. quadricauda*, 4 день у *C. vulgaris*) центрифугированием в течение 10 мин при 8000 g в характеристических точках динамики роста культуры, указанных выше. Культуральную жидкость (КЖ) собирали, чтобы определить содержание БА также и в ней. Биомассу разрушали ультразвуковой обработкой (22 кГц) в течение 7-8 мин.

Для исследования содержания БА в образцах *дафний (Daphnia magna)* 30-35 взрослых особей отделяли от прудовой воды (озеро Глубокое, Московская обл.) с помощью бумажного фильтра, отмывали дистиллированной водой. Дафний измельчали с помощью ступки с кварцевым песком при температуре 0° С в 0,1 н. HCl; остатки удаляли центрифугированием (20 000 g, 20 мин).

БА были разделены с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с амперометрической системой детектирования на хроматографе LC-304Т («BAS», США) с инжектором Rheodyne 7125. БА были

разделены на колонке ReproSil-Pur с обратной фазой. Измерения проводились с использованием электрохимического детектора LC-4B (BAS, США) со стеклоуглеродным электродом (+0,85 В) и электродом сравнения Ag/AgCl.

Статистические процедуры. Данные, представленные в диссертации, представляют собой средние арифметические значения. Независимые опыты проводили 4-5 раз, независимые измерения в каждом опыте – не менее 3 раз. Проверяли гипотезу о нормальном распределении данных каждого варианта с помощью программы IBM SPSS Statistics версии R27 0.1.0., подсчитывали коэффициенты асимметрии и эксцесса. При их близости к нулю распределение рассматривалось как нормальное и применяли *t*-критерий Стьюдента при *p* 0.05. Некоторые группы данных не соответствовали нормальному распределению и были анализированы в соответствии с *H*-тестом Крускала-Уоллиса программой Statistics.

Результаты

Эффекты биогенных аминов на ростовые характеристики микроводорослей.

Действие БА на рост C. vulgaris. Динамика роста *C. vulgaris* в присутствии серотонина (5НТ), гистамина, дофамина (ДА), норадреналина (НА), ацетилхолина (АХ) или без них (контроль) представлена на рисунках 1-3, данные отражены также в таблице 1 (ниже).

ДА и НА увеличивали число клеток на 1-2, но не на 4 день роста, т.е. вызывали ростускоряющий эффект без значимого повышения уровня плато на кривой роста, а 5НТ, АХ и гистамин – стимулирующий эффект с увеличением числа клеток, достигаемого при росте культуры *C. vulgaris*. Эти эффекты имели место при 1 и/или 10 мкМ и не наблюдались при максимальной концентрации (100 мкМ) БА.

Действие БА на рост S. quadricauda. Из-за недостатка места не воспроизводим содержащиеся в диссертации графики (аналогичные таковым для *C. vulgaris*), но эффекты всех нейротрансмиттеров охарактеризованы в

итоговой таблице 1. Все БА в концентрациях 1 и 10 мкМ обуславливали увеличение числа клеток в культуре *S. quadricauda*, и этот эффект сохранялся до конца периода культивирования – до ростового плато на 7 день. Например, гистамин вызывал 65%-ную прибавку числа клеток у *S. quadricauda*.

Действие БА на рост и соотношение типов клеток H. lacustris, штаммы IPPAS H-239 и BM-1. Микроводоросль *H. lacustris* переходит от вегетативной стадии (зеленой из-за высокого содержания хлорофилла) к стадии покоя (красной, накапливающей каротиноиды) через промежуточную стадию: клетки теряют жгутики, приобретают круглую форму (вегетативная пальмелла) (рис. 4, слева), а затем формируют содержащие вторичные каротиноиды липидные капли в цитоплазме пока почти полностью не заполняются красным пигментом (рис. 4, справа). В следующих экспериментах были оценены эффекты БА на общее число клеток и долю трех стадий развития на 7 и 14 дни роста.

Увеличение числа клеток тестированных штаммов *H. lacustris* наблюдали в присутствии гистамина, АХ, ДА, 5НТ (только у штамма BM 1); НА и 5НТ (в случае штамма IPPAS B-239) не оказывали значимых эффектов. Наконец, АХ (у обоих штаммов) и НА (только у штамма IPPAS B-239) повышали процентное содержание пальмеллоидных клеток и при этом не меняли или даже снижали таковое покоящихся клеток.

Действие БА на рост L. platensis. В контрольной культуре (без добавок нейротрансмиттеров) цианобактерия достигала максимального числа трихомов (нитей из клеток) к 7 дню культивирования. Далее число трихомов в некоторой мере уменьшалось. После 7 дня культивирования сухой вес биомассы в пересчете на 1 см³ культуры продолжал нарастать с замедлением и достигал максимума к 14 дню культивирования; по-видимому, снижение числа трихомов компенсировалось увеличением их размеров, так что содержание биомассы (по весу сухой биомассы) могло далее нарастать. АХ, гистамин и 5-НТ увеличивали, а ДА уменьшали содержание биомассы

культуры *L. platensis* на 7 день культивирования, но эти эффекты нивелировались к 14 дню. Все тестированные БА, кроме НА, снижали число трихомов на 7 день культивирования *L. platensis*; эти вещества, кроме гистамина, предотвращали наблюдаемый в контрольной культуре спад числа трихомов к 14 дню.

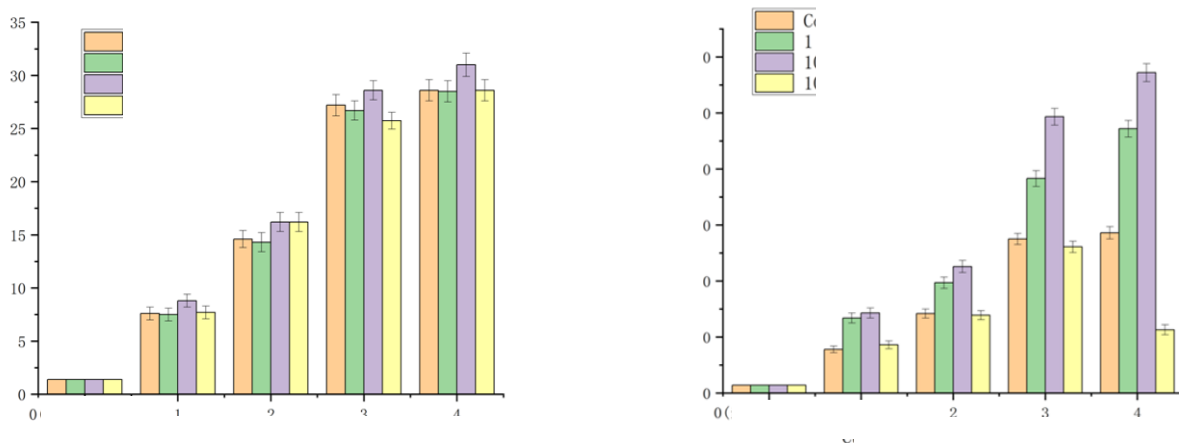


Рис. 1. Действие серотонина (5НТ, слева) и гистамина (Гис, справа) на рост *C. vulgaris*. Данные подвергнуты статистическому анализу при $p = 0.05$ по t -критерию Стьюдента.

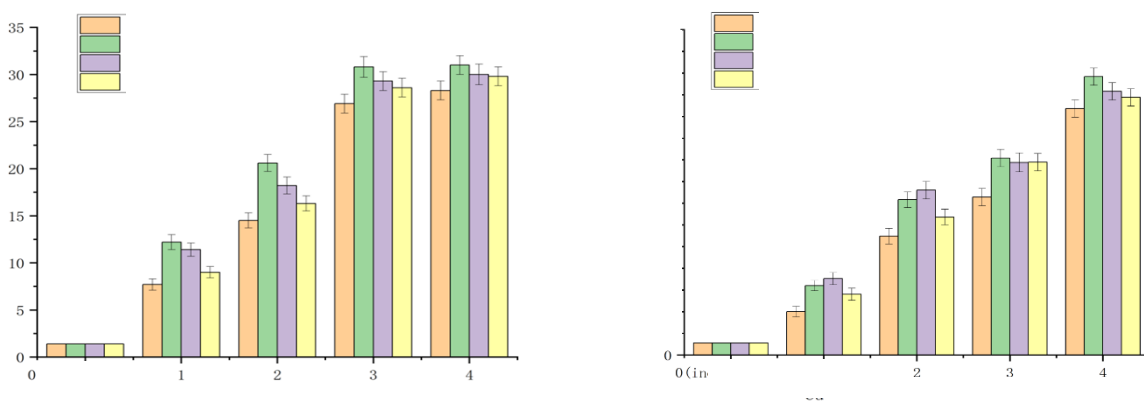
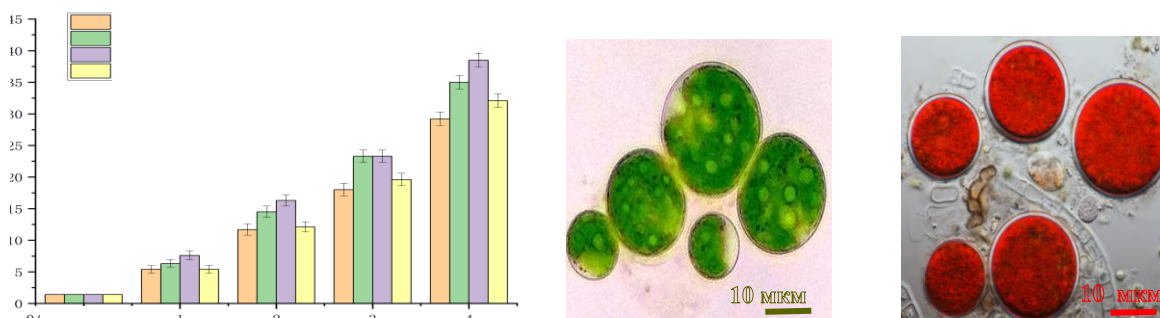


Рис. 2. Действие дофамина (ДА, слева) и норадреналина (НА, справа) на рост *C. vulgaris*. Данные подвергнуты статистическому анализу при $p = 0.05$ по t -критерию



Стьюдента.

Рис. 3. Действие ацетилхолина (АХ) на рост *C. vulgaris*. Данные подвергнуты статистическому анализу при $p = 0.05$ по t -критерию Стьюдента.

Таблица 1. Обобщенные данные по влиянию БА на ростовые параметры микроводорослей; тенденции: ↗, увеличение параметра; ↘, уменьшение параметра; —, эффект незначительный или неоднозначный. IPPAS H-239 и BM-1, штаммы *H. lacustris*. Данные в основе тенденций значимы при $p = 0.05$ по t -критерию Стьюдента

Вид/штамм водоросли	Параметр	Биогенные амины				
		5НТ	Гис	ДА	НА	АХ
<i>C. vulgaris</i>	Число клеток в 1 см ³	↗	↗	↗*	↗*	↗
<i>S. quadricauda</i>	Число клеток в 1 см ³	↗	↗	↗	↗	↗
IPPAS H-239	Число клеток в 1 см ³	—	↗	↗	—	↗
	Число вегетативных клеток в 1 см ³	↘	↗	↘	↘	↗
	Число пальмелл в 1 см ³	—	↗	↘	↗	↗
	Число покоящихся клеток в 1 см ³	↗†	↗		—	—
BM-1	Число клеток в 1 см ³	↗	↗	↗	—	↗
	Число вегетативных клеток в 1 см ³	↘	↗	↗	↗	↗
	Число пальмелл в 1 см ³	↘	↗	↘	↘	↗
	Число покоящихся клеток в 1 см ³	↗	↗	—	—	↘
<i>L. platensis</i>	Число трихомов в 1 см ³	↘	↘	↘	—	↘
	Масса сухих клеток биомассы, мг/мл	↗*	↗*	↘**	—	↗*

* Ростускоряющее действие без повышения числа клеток к концу культивирования;

** рост-замедляющее действие; † недостоверный эффект

Эффекты биогенных аминов на жирнокислотный состав липидов микроводорослей

Действие БА на жирнокислотный состав липидов *C. vulgaris*. В таблице 2 для примера приведено содержание жирных кислот (ЖК) в пересчете на 1 г веса сухой биомассы и показаны доли (в % от суммарных ЖК) насыщенных (НЖК), мононенасыщенных (МНЖК) и полиненасыщенных (ПНЖК) жирных кислот² в образцах культуры *C. vulgaris*, выращенной с 1, 10 или 100 мкМ 5НТ или без него (контроль). В силу недостатка места, данные по прочим БА представлены в обобщающей таблице 3 ниже в виде тенденций. По нашим данным АХ (только в концентрации 10 мкМ), ДА, НА (только в концентрации 1

² В тексте диссертации в таблицах приведено также процентное содержание индивидуальных ЖК

мкМ) увеличивали содержание ЖК в клетках *C. vulgaris*. 5НТ и гистамин уменьшали это содержание. АХ и гистамин повышали процентное содержание ПНЖК за счет снижения такового НЖК и/или МНЖК. 5НТ снижал долю МНЖК и НЖК, но влияние на ПНЖК не было достоверным. ДА и НА не оказывали статистически достоверного влияния на соотношение типов ЖК.

Таблица 2. Содержание ЖК и их типов в 4-суточных культурах *C. vulgaris*, культивируемых с серотонином (5НТ) или без него. Здесь и в табл.4-7 даны средние данные по 4-5 повторностям. Результаты Н-теста Крускала-Уоллиса с независимыми выборками для экспериментальных и контрольной групп: НЖК: Sig.=0.047 < 0.05. МНЖК: Sig.=0.041 < 0.05. ПНЖК: **Sig.=0.082 > 0.05** Суммарное содержание ЖК: Sig.=0.019 < 0.05. Результаты для всех групп данных, **кроме ПНЖК** не соответствуют нулевой гипотезе, поэтому только различия опытных и контрольной групп данных для ПНЖК **не достоверны**.

Содержание жирных кислот и их типов	Доля в сумме жирных кислот липидов, %			
	Контроль	5НТ, 1 мкМ	5НТ, 10 мкМ	5НТ, 100 мкМ
НЖК	31.02±1.0	27.76±0.9	28.12±0.96	27.12±0.9
МНЖК	9.06±0.5	5.88±0.6	6.19±0.55	6.86±0.65
ПНЖК	59.92±1.4	66.35±1.5	65.69±1.7	66.02±1.4
Содерж. ЖК, мг/г сухой биомассы	84.4±1.0	72.1±0.9	73.2±1.0	68.9±0.9

Действие БА на жирнокислотный состав липидов S. quadricauda. БА можно разделить на две группы по их действию на *S. quadricauda* (табл. 3): 1) АХ, гистамин и НА, которые увеличивали содержание ЖК (НА недостоверно), а также соотношение между ПНЖК и более насыщенными ЖК; 2) 5НТ и ДА, которые, наоборот, уменьшали общее содержание ЖК и увеличивали вклад НЖК (и, в случае ДА, МНЖК).

Действие БА на жирнокислотный состав липидов H. lacustris. АХ значительно увеличивал содержание ЖК у обоих тестируемых штаммах *H. lacustris* на 14 день культивирования (выход культуры на ростовое плато), что согласуется с его эффектами на *C. vulgaris* и *S. quadricauda*, тестируемыми в предыдущих подразделах. *H. lacustris* реагировал на гистамин увеличением суммарного содержания ЖК. ДА и НА, несмотря на химическое сходство, оказывали противоположное воздействие на содержание жирных кислот у *H.*

lacustris; НА повышал, в то время как ДА снижал его. 5НТ несколько снижал содержание ЖК. АХ не оказывал какого-либо верифицируемого влияния на соотношение НЖК:МНЖК:ПНЖК, равно как и 5НТ. НА вызывал небольшое, но значимое увеличение процентного содержания ПНЖК у обоих штаммов, а ДА и гистамин - только у штамма ВМ-1.

Таблица 3. Обобщенные данные по влиянию БА на жирнокислотный состав липидов у тестируемых микроводорослей. Тенденции: ↗, увеличение параметра; ↘, уменьшение параметра; —, эффект незначительный или неоднозначный. IPPAS H-239 и ВМ-1, штаммы *H. lacustris*. Данные в основе тенденций значимы по Н-критерию Крускала-Уоллиса

Параметр	Вид/штамм микроводоросли	Биогенные амины				
		5НТ	Гис	ДА	НА	АХ
Общее содержание жирных кислот в клетках, мг/г сухой биомассы	<i>C. vulgaris</i>	↘	↘	↗	↗	↗
	<i>S. quadricauda</i>	↘	↗	↘	—	↗
	IPPAS H-239	—	↗	↘	↗	↗
	ВМ-1	↘	↗	↘	↗	↗
	<i>L. platensis</i>	↗*	—	—	↘	↗
Доля ненасыщенных жирных кислот, %	<i>C. vulgaris</i>	—	↗	—	—	↗
	<i>S. quadricauda</i>	↘	↗	↘	—	↗
	IPPAS H-239	—	—	—	↗	—
	ВМ-1	—	↗	↗	↗	—
	<i>L. platensis</i>	↗**	↘	—	↗**	—
Доля насыщенных жирных кислот, %	<i>C. vulgaris</i>	↘	↘	—	—	↘
	<i>S. quadricauda</i>	↗	↘	↗	—	↘
	IPPAS H-239	—	—	—	↘	—
	ВМ-1	—	↘	↘	↘	—
	<i>L. platensis</i>	—	—	—	—	—

* только в концентрации 0.1 мкМ; ** только фракция ПНЖК при снижении доли МНЖК

Действие БА на жирнокислотный состав липидов L. platensis. Исследуемая цианобактерия отличается особо высоким содержанием ПНЖК, особенно α-линоленовой кислоты, которая находит фармацевтическое применение (Wu et al., 2016; Искусных и др., 2021). Полученные данные по жирнокислотному составу липидов (на 14 сутки культивирования, когда уровень биомассы выходит на плато, см. таблица 3) позволяют различать

нейротрансмиттеры 1) значительно повышающие суммарное содержание ЖК в липидах *L. platensis* (АХ и 5-НТ) и 2) не обладающие статистически верифицируемым действием на него (гистамин и ДА); «особняком» стоит НА, снижающий содержание ЖК. 5-НТ и НА значительно повышали вклад ценных с биомедицинской точки зрения ПНЖК.

Эффекты биогенных аминов на содержание фотосинтетических пигментов микроводорослей.

Оксигенные фототрофы, включая микроводоросли, являются очень эффективными преобразователями солнечной энергии в биомассу (Masojídek et al. 2013; Piotrowska-Niczyporuk, Wajguz, 2014). Это одна из причин, по которой изучение параметров, связанных с эффективностью фотосинтеза, экологически актуально. Ниже приведены результаты по составу и содержанию фотосинтетических пигментов у микроводорослей в присутствии БА и без них.

Действие БА на содержание фотосинтетических пигментов у C. vulgaris. Все испытанные БА повышали концентрации хлорофиллов *a* и *b*; 5НТ, АХ, НА (в небольшой мере) – также содержание каротиноидов в клетках. Эти данные приведены в графиках диссертации и отображены здесь в суммарной таблице 4.

Действие БА на содержание фотосинтетических пигментов у S. quadricauda. Как показано в итоговой таблице 4, АХ и, в меньшей степени, НА увеличивали общее содержание хлорофилла и каротиноидов в клетках *S. quadricauda*, которые были снижены в случае ДА. В отличие от *C. vulgaris*, у *S. quadricauda* 5НТ и гистамин не влияли на общее содержание компонентов фотосистемы. В присутствии гистамина соотношение хлорофиллов *a/b* было смещено в пользу хлорофилла *a*, а соотношение хлорофиллы: каротиноиды - в пользу каротиноидов.

Действие БА на содержание фотосинтетических пигментов у N. lacustris. Нами показано (обобщающая таблица 4), что 5НТ и гистамин снижают, а АХ,

НА, ДА повышают содержание хлорофиллов в клетках *H. lacustris* IPPAS Н-238 (на 7 и 14 сутки культивирования). У штамма ВМ-1 5НТ не влияет на содержание хлорофиллов, остальные БА увеличивают их содержание в клетках. Содержание каротиноидов (включая практически ценный астаксантин) снижается у штамма IPPAS В-239 под влиянием гистамина, ДА, 5НТ и повышается в присутствии НА и АХ. У штамма ВМ-1 5НТ не влияет на содержание каротиноидов, а остальные БА повышают его.

Таблица 4. Обобщенные данные по влиянию БА на содержание фотосинтетических пигментов у тестированных микроводорослей, тенденции: ↗, увеличение параметра; ↘, уменьшение параметра; —, эффект незначительный или неоднозначный. IPPAS Н-239 и ВМ-1, штаммы *H. lacustris*. Данные в основе тенденций значимы по Н-критерию Крускала-Уоллеса.

Параметр	Вид микроводоросли	Биогенные амины				
		5НТ	Гис	ДА	НА	АХ
Содержание хлорофилла <i>a</i>	<i>C. vulgaris</i>	↗	↗	—	↗	↗
	<i>S. quadricauda</i>	—	↗	↘	↗	↗
	IPPAS Н-239	↘	↘	↗	↗	↗
	ВМ-1	—	↗	↗	↗	↗
	<i>L. platensis</i>	↗	↘	↗	—	↘
Содержание хлорофилла <i>b</i>	<i>C. vulgaris</i>	↗	↗	—	↗	—
	<i>S. quadricauda</i>	—	↘	↘	↗	↗
	IPPAS Н-239	↘	↘	↗	↗	↗
	ВМ-1	—	↗	↗	↗	↗
	<i>L. platensis</i>	Не содержит хлорофилл <i>b</i>				
Содержание каротиноидов	<i>C. vulgaris</i>	↗	—	—	↗	↗
	<i>S. quadricauda</i>	—	↗	↘	↗	↗
	IPPAS Н-239	↘	↘	↘	↗	↗
	ВМ-1	—	↗	↗	↗	↗
	<i>L. platensis</i>	↗	↗	↗	—	↗

Действие БА на фотосинтетические пигменты Limnospira platensis. На 7 сутки роста *L. platensis* (когда в культуре максимальные уровни фотосинтетических пигментов) АХ и гистамин уменьшали содержание хлорофилла и увеличивали содержание каротиноидов. 5-НТ и ДА увеличивали

содержание как хлорофилла, так и каротиноидов. НА не оказывал эффекта.

Эндогенные нейротрансмиттеры у фито- и зоопланктона и береговых растений. Если стимуляторные (в целом) эффекты БА отражают результат коэволюции микроводорослей с другими обитателями водоемов, какие компоненты экосистем вырабатывают БА и взаимодействуют посредством них с микроводорослями? Были опробованы три возможных источника БА в водных экосистемах: 1) сами микроводоросли; 2) представители зоопланктона; 3) прибрежные растения, способные выделять БА в водную среду.

*Детекция эндогенных БА в микроводорослях *Chlorella vulgaris* Beijer и *Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Breb. K-1149.* Анализ методом ВЭЖХ не позволил выявить серотонин, дофамин, норадреналин или ДОФА (предшественник дофамина) в образцах культуральной жидкости и измельченной биомассы культур *S. quadricauda* и *C. vulgaris*, взятых во время стационарной фазы роста (7-й и 4-й день культивирования, соответственно).

*Детекция эндогенных БА в тотальном препарате *Daphnia magna*.* Представитель зоопланктона *D. magna* содержал в биомассе ДА в концентрации 0.255 ± 0.05 мкмоль/кг, достаточной для стимуляции роста *C. vulgaris* и *S. quadricauda*. Эти микроводоросли входят «в рацион» дафний.

Детекция эндогенных БА в тканях высших растений. Согласно данным ВЭЖХ, измельченные листья береговых деревьев/кустарников прудов парка Даюнь в г. Шэньчжэнь *Plumeria rubra* L. cv. *acutifolia*, *Syzygium jambos* (L.) Alston, *Vixus megistophylla* (*Euonymus japonicas* cv. *aureoma*, самшит) и *Cinnamomum bodinieri* Levl. содержат микромолярные количества 5-НТ и субмикромолярные или микромолярные (у *C. bodinieri*) количества НА и ДА. Таким образом, листья исследуемых видов растений содержат относительно высокие концентрации БА, достаточные для индукции специфических эффектов при выделении в водную среду.

III. Заключение

Итак, настоящая работа посвящена действию нейроактивных биогенных

аминов как потенциально важных антропогенных экотоксикантов на накопление биомассы, жирнокислотный состав липидов и на содержание фотосинтетических пигментов у некоторых эукариотических микроводорослей и цианобактерий. Было выяснено, что испытанные в данной работе дофамин, норадреналин, серотонин, гистамин и ацетилхолин значительно стимулируют рост культур исследованных микроводорослей в достаточно низких (микромольных) концентрациях, соответствующих физиологическим концентрациям этих нейротрансмиттеров в организме растений и животных. Отметим, что, например, норадреналин содержится в крови человека в концентрациях около 0.1 мкМ (Eldrup, 2004). В том же концентрационном диапазоне тестируемые нейротрансмиттеры влияли на (увеличивали или, наоборот, уменьшали) содержание жирных кислот в клетках микроводорослей. Ацетилхолин оказался стимулятором синтеза жирных кислот у всех испытанных в настоящей работе объектов, значимые эффекты остальных нейротрансмиттеров различались у разных представителей микроводорослей.

В свете полученных в настоящей работе результатов реальной представляется перспектива неконтролируемого роста микроводорослей под воздействием даже «следовых» количеств нейротрансмиттеров в участках водоемов, сравнительно удаленных от места их слива в составе стоков пищевых или фармацевтических предприятий и несмотря на механизмы естественной деградации этих соединений в силу абиотических (например, окисление под действием света) или биотических (ферментативное разложение) процессов. Из полученных данных вытекает рекомендация о необходимости более тщательной очистки таких «нейроактивных» сточных вод для предотвращения «цветения» воды и эвтрофикации водоемов.

Нейротрансмиттеры изменяют соотношение насыщенных и ненасыщенных жирных кислот (см. таблица 3 выше), причем по-разному влияют на тестируемые объекты. Например, в клетках *C. vulgaris* АХ и

гистамин повышали процентное содержание ПНЖК за счет снижения такового НЖК и/или МНЖК; 5НТ снижал процентное содержание НЖК и МНЖК без достоверного воздействия на содержание ПНЖК.

Все испытанные вещества также влияли в микромолярных (или субмикромолярных) концентрациях на содержание фотосинтетических пигментов, причем АХ и в данном случае выступал как почти универсальный стимулятор биосинтеза.

Данные настоящей работы можно гипотетически интерпретировать в рамках представления о функционировании у микроводорослей аналогов систем плотностно-зависимой коммуникации (QS-систем), распространенных в мире прокариот. В результате взаимодействия некоторых нейротрансмиттеров и рецепторов может, в частности, стимулироваться активность десатураз жирных кислот, что, соответственно, вызовет продление стадий роста культуры с высокой степенью ненасыщенности жирных кислот. Важную роль может играть антиоксидантная активность, характерная, в частности, для 5НТ, что может предотвращать окисление жирных кислот липидов мембран, по аналогии с стимулирующим действием фитогормонов (в том числе напоминающих 5НТ ауксинов) на ферментативные и неферментативные системы тушения активных форм кислорода у микроводорослей (Qiu et al., 2025).

Данные о стимулирующем воздействии микромолярных концентраций БА на накопление биомассы, содержание ЖК и фотосинтетических пигментов, имеют биотехнологическое значение, поскольку такие количества БА относительно недороги. С экологической точки зрения воздействие БА на *S. vulgaris*, *S. quadricauda*, *H. lacustris*, *L. platensis* как обитателей пресных и солоноватых водоемов представляет интерес в аспекте роли БА во взаимодействиях между компонентами в природных или искусственных водных экосистемах, включая зоопланктон и береговые растения, у которых нами детектированы нейротрансмиттеры, вслед за работами других

исследователей (Рощина, 1991; Roshchina, 2011; Van Alstyne et al., 2018).

Выводы

1. В настоящей работе показано, что биогенные амины (дофамин, норадреналин, серотонин, гистамин, ацетилхолин), тестированные как потенциально важные экотоксиканты, стимулируют рост модельных тест-объектов: зеленых микроводорослей *Chlorella vulgaris* Beijer, *Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Breb. K-1149 и *Haematococcus lacustris* IPPAS H-239 и BM-1 (только серотонин и ацетилхолин), а также цианобактерии *Limnospira platensis* IPPAS B-256 (серотонин, ацетилхолин и гистамин) в микромолярных концентрациях. Наиболее эффективным стимулятором роста *C. vulgaris* и *S. quadricauda* является гистамин, а *L. platensis* – серотонин.
2. Методом газовой хроматографии с масс-спектрометрией продемонстрировано, что ацетилхолин и дофамин увеличивали общее содержание жирных кислот в клетках *C. vulgaris*, тогда как серотонин, гистамин и норадреналин уменьшали их общее содержание. Что касается *S. quadricauda* и *H. lacustris*, то ацетилхолин, гистамин и норадреналин (только у *H. lacustris*) повышали, а дофамин и серотонин (только у *H. lacustris*) снижали общее содержание жирных кислот. У *L. platensis* ацетилхолин и серотонин повышали, а норадреналин снижал содержание жирных кислот.
3. В плане воздействия на процентное содержание насыщенных и ненасыщенных жирных кислот в липидной фракции эукариотических микроводорослей, исследованные биогенные амины можно подразделить на две подгруппы: 1) биогенные амины, увеличивающие долю ненасыщенных жирных кислот – ацетилхолин и гистамин (у *C. vulgaris* и *S. quadricauda*), серотонин (только у *C. vulgaris*), норадреналин (у обоих штаммов *H. lacustris*) и 2) биогенные амины, увеличивающие долю насыщенных жирных кислот – дофамин (не у *H. lacustris*), серотонин и норадреналин (только у *S. quadricauda*). У прокариота *L. platensis* серотонин и норадреналин повышали вклад полиненасыщенных жирных кислот

4. Все тестированные биогенные амины, кроме дофамина, увеличивали общее содержание хлорофиллов и каротиноидов у *C. vulgaris*, в то время как дофамин не оказывал существенного влияния на содержание фотосинтетических пигментов. Ацетилхолин и норадреналин повышали содержание хлорофиллов и каротиноидов у *S. quadricauda*; серотонин не влиял на эти параметры; гистамин повышал содержание хлорофилла *a* и каротиноидов, снижая уровень хлорофилла *b*; дофамин снижал содержание хлорофиллов и каротиноидов у *S. quadricauda*. Норадреналин и ацетилхолин стимулировали синтез как хлорофиллов, так и каротиноидов у *Haematococcus lacustris* штаммы IPPAS Н-239 и ВМ-1; гистамин и дофамин стимулировали эти процессы только у штамма ВМ-1. В то же время, у штамма IPPAS Н-239 гистамин, серотонин и дофамин снижали содержание хлорофиллов и каротиноидов. Ацетилхолин и гистамин повышали содержание каротиноидов и снижали таковое хлорофилла у *L. platensis*; серотонин и дофамин увеличивали содержание как хлорофилла, так и каротиноидов.

5. Результаты настоящей работы свидетельствуют о возможном экотоксическом действии антропогенных выбросов нейротрансмиттеров в форме усиления роста фитопланктона вплоть до «цветения» водоемов и их эвтрофикации. Что касается эндогенных нейротрансмиттеров, то данные диссертации указывают на их возможное участие во взаимодействии фитопланктона (на примере зеленых микроводорослей) с другими компонентами водных экосистем, к которым относятся представитель зоопланктона (*Daphnia magna*) и береговые растения, содержащие детектируемые ВЭЖХ количества нейротрансмиттеров.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Основные положения, результаты и выводы диссертации отражены в 12 научных трудах, 3 из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук. **Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по**

специальности и отрасли наук:

1. **Сао В.**, Chivkunova O.B., Fedorenko T.A., Solovchenko A.E., Lobakova E.S., Oleskin A.V. Neurochemical pollutants in aquatic ecosystems: modes of interaction with microalgae // Жизнь Земли. — 2026. — Т. 48, № 1. — С. 46-57. EDN INBPXG. Импакт-фактор 0,386 (РИНЦ). 0,3 из 1,0 п.л.

2. **Сао В.**, Oleskin A.V. Neurochemical pollutants in the aquatic medium: the results of studies with model organisms (microalgae) // Жизнь Земли. — 2025. — Т. 47, № 4. С. 550-562. EDN: PMKRCV. Импакт-фактор 0.386 (РИНЦ). 0,6 из 1,0 п.л.

3. Олескин А.В., **Цао Б.** Взаимодействие нейротрансмиттеров с микроводорослями: концептуальные и практические аспекты // Вестник Мос. ун-та. Сер. 16: Биология. — 2023. — Т. 78, № 3. — С. 146–159. DOI: 10.55959/MSU0137-0952-16-78-3-10. Импакт-фактор 0.615 (РИНЦ). 0,9 из 1,5 п.л.

Прочие публикации:

1. **Цао Б.**, Федоренко Т.А., Чивкунова О.Б., Соловченко А.Е., Лобакова Е.С., Олескин А.В. Влияние биогенных аминов на накопление биомассы, содержание фотосинтетических пигментов и жирных кислот у цианобактерии *Limnospira platensis* IPPAS B-256 // Микробиология. — 2026. — Т. 95, № 1. — С. 68–84. DOI: 0.1134/S0026261724608704. Импакт-фактор 1,034 (РИНЦ). 0,5 из 1,5 п.л. [Сао В., Fedorenko T.A., Chivkunova O.B., Solovchenko A.E., Lobakova E.S., Oleskin A.V. Impact of neurotransmitters on biomass accumulation, photosynthetic pigment content, and fatty acid composition of the cyanobacterium *Limnospira platensis* IPPAS B-256// Microbiology. — 2026. — vol. 95, no. 1. — P. 82–95. DOI: 10.1134/S0026261725602921. Импакт-фактор (SJR): 0,347 0,5 из 1,5 п.л.]

2. **Сао В.**, Chivkunova O.B., Solovchenko A.E., Lobakova E.S., Oleskin A.V. Neurotransmitters as ecopollutants: impact on the fatty-acid composition and photosynthetic pigment content of *Chlorella vulgaris* // Russian J. Ecosystem Ecol. — 2025. — vol. 10, no.4. — P. 10-21. DOI: 10.21685/2500-0578-2025-4-4. Импакт-фактор 0,850 (РИНЦ). 0,4 из 1.2 п.л.

3. **Цао Б.**, Федоренко Т.А., Чивкунова О.Б., Соловченко А.Е., Лобакова Е.С., Олескин А.В. Влияние нейротрансмиттеров на содержание фотосинтетических пигментов у *Haematococcus lacustris* штаммы IPPAS H-239 // Прикл. биохим. микробиол. — 2025. — Т. 61, № 5. — С.865-871. DOI: 10.31857/S0555109925050046. Импакт-фактор 0,992 (РИНЦ). 0,4 из 1,4 п.л.. [Сао В., Fedorenko T.A., Chivkunova O.B., Solovchenko A.E., Lobakova E.S., Oleskin A.V. Impact of neurotransmitters on the photosynthetic pigment content of the green microalga *Haematococcus lacustris* (strains IPPAS H-239 and BM-1) // Appl. Biochem. Microbiol. — 2025. — vol. 61, no. 5. — P.865-871. DOI: 10.1134/S0003683825601155. Импакт-фактор 0,294 (SJR): 0.294. 0,4 из 1,4 п.л.]

4. **Цао Б.**, Федоренко Т.А., Чивкунова О.Б., Соловченко А.Е., Лобакова Е.С., Олескин А.В. Влияние нейротрансмиттеров на состав жирных кислот и фотосинтетических пигментов зеленой микроводоросли *Scenedesmus quadricauda* // Прикл. биохим. микробиол. — 2024. — Т. 60, № 5. С.378-389. DOI: 10.31857/S0555109924050064. Импакт-фактор 0,992 (РИНЦ). 0,4 из 1,4 п.л [Сао В., Chivkunova O.B., Solovchenko A.E., Lobakova E.S., Oleskin A.V. Impact of neurotransmitters on the fatty acid composition and pigments of the green microalga *Scenedesmus quadricauda* // Appl. Biochem. Microbiol. — 2024. — vol. 60, no. 5. — P.833–843. DOI: 10.1134/S0003683824604554 Импакт-фактор 0,294 (SJR). 0,4 из 1,4 п.л.]

5. Олескин А.В., **Цао Б.** Микроводоросли как объекты биомедицинских технологий: пробиотики, пребиотики, метабиотики // Прикл. биохим. микробиол. — 2022. — Т.58, № 6. — С. 635-648. DOI: 10.31857/S0555109922060125. Импакт-фактор 1,374 (РИНЦ). 1,0 из 1,8 п.л. [Oleskin A.V., Сао В. Microalgae in terms of biomedical technology: probiotics, prebiotics, and metabiotics // Appl. Biochem. Microbiol. — 2022. — vol. 58, no. 6. — P. 635–648. DOI: 10.1134/S0003683822060126. Импакт фактор 0,244 (SJR). 1,0 из 1,8 п.л.]

6. Олескин А. В., **Цао Б.** Микроводоросли как биотехнологические объекты // Вопросы

- современной альгологии (Issues of modern algology) - algology.ru. – 2022. – № 3(30). – С. 1–23. DOI: 10.33624/2311-0147-2022-3(30)-1-23. Импакт-фактор 0,165 (РИНЦ). 1,0 из 1,9 п.л.
7. Oleskin A. V., Postnov A. L., **Сao В.** Impact of biogenic amines on the growth of green microalgae // J. Pharm. Nutr. Sci. – 2021. – vol. 11. – P. 144–150. DOI: 10.29169/1927-5951.2021.11.17. Импакт-фактор 0,193 (SNIP). 0,4 из 0,8 п.л.
8. Oleskin A. V., Postnov A. L., **Сao В.** Impact of biogenic amines on the growth of a *Chlorella vulgaris* culture // J. Pharm. Nutr. Sci. – 2021. – vol. 11. – P. 49–53. DOI: 10.29169/1927-5951.2021.11.07. Импакт-фактор 0,193 (SNIP). 0,4 из 0,8 п.л.
9. **Сao В.**, Oleskin A. V., Vlasova T.A. Detecting biogenic amines in food and drug plants with HPLC: medical and nutritional implications // J. Pharm. Nutr. Sci. – 2020. – vol. 10, no/ 3. – P. 88–91. DOI: 10.29169/1927-5951.2020.10.03.2. Импакт-фактор 0,193 (SNIP). 0,3 из 0,7 п.л.
- Перевод автореферата на русский язык выполнен д.б.н., проф. А.В. Олескиным.*