

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Лазарева Анна Максимовна

**Экотоксическое действие соединений и материалов
различной природы при изменении условий
альготестирования**

Специальность 1.5.16. Гидробиология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Москва – 2026

Диссертация подготовлена на кафедре общей экологии и гидробиологии биологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: *Ипатова Валентина Ивановна*
доцент, кандидат биологических наук

Официальные оппоненты: *Сарапульцева Елена Игоревна* – доктор биологических наук, профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Инженерно-физический институт биомедицины, кафедра фундаментальной медицины, профессор.

Олькова Анна Сергеевна – доктор биологических наук, доцент, Вятский государственный университет, Институт химии и экологии, кафедра экологии и природопользования, профессор.

Медянкина Мария Владимировна – кандидат биологических наук, доцент, Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет), факультет биотехнологий и рыбного хозяйства, кафедра экологии и природопользования, доцент.

Защита диссертации состоится «24» апреля 2026 года в 15 часов 35 минут на заседании диссертационного совета МГУ.015.6 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1, стр. 12, биологический факультет, аудитория М-1.

E-mail: dissovet_00155@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27) и на портале:

<https://dissovet.msu.ru/dissertation/3818>

Автореферат разослан «___» марта 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат биологических наук

Д.М. Гершкович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Для контроля состояния водных ресурсов существуют различные системы мониторинга и нормирования, важную роль в которых играют такие показатели, как полуэффективные концентрации ($ЭК_{50}$), предельно допустимые концентрации (ПДК) и ориентировочно безвредные уровни воздействия (ОБУВ) веществ, загрязняющих водоемы (Методические указания..., 2011). Ошибки при их определении ведут к драматическим последствиям: нарушению баланса внутри водоема и гибели чувствительных организмов.

Проведенный в данной работе анализ существующих методик биотестирования выявил недостатки условий проведения биоиспытаний, нуждающиеся в корректировке, что позволит более адекватно оценивать потенциальную токсичность различных веществ и материалов и оптимизировать процедуру биотестирования и нормирования.

Степень разработанности темы. В существующих методиках (Биологические методы ..., 2007; Методические указания ..., 2011; ГОСТ R 54496-2011, 2012; Терехова и др., 2014; Филенко и др., 2015; Терехова и др., 2017) проведения биотестирования время суток на момент добавки токсиканта не регламентировано. Аналогов проведенных в данной работе исследований влияния времени проведения эксперимента на исход аьготестирования в литературе нет.

Некоторые факторы, влияющие на результат биотеста, такие как плотность и возраст тест-культуры, состав среды культивирования уже были частично описаны (Tanno et al., 2020). Однако из-за большого разнообразия потенциальных токсикантов, тест-организмов, разного состава природных вод и комбинаций данных факторов, этот вопрос изучен недостаточно.

С появлением новых чужеродных веществ и материалов активно обсуждается вопрос об опасности пластикового загрязнения и влиянии микро- и наночастиц пластика на живые организмы (Kögel et al., 2020; Issac, Kandasubramanian, 2021). В литературе приведены данные краткосрочных опытов с частицами пластика для некоторых видов водных организмов по ограниченному числу показателей (Huang et al., 2021). Более полное представление о токсичности пластиков могут дать хронические эксперименты с учетом расширенного спектра показателей.

Совместное действие нескольких токсикантов является важным фактором при оценке их реальной токсичности в окружающей среде (Tunali et al., 2020; Wang et al., 2021). Следует исследовать совместное действие частиц пластика с другими загрязняющими веществами разной природы, чтобы выявить синергический, аддитивный или антагонистический эффекты их комбинаций.

Сравнительная оценка результатов экспериментов на природной воде и искусственной среде необходима для экстраполяции данных, полученных в лабораторных условиях, на природные водоемы. Также в настоящее время не существует стандартных методик аьготестирования для диапазона 1–6 ‰.

В связи с этим представляется важным детальное рассмотрение ряда ключевых экспериментальных условий проведения аьготестирования, потенциально влияющих на его результаты.

Цель и задачи исследования. Цель настоящей работы – исследование экотоксического действия соединений и материалов различной природы на микроводоросли при изменении факторов среды.

В задачи работы входило:

1. Изучить токсичность веществ в зависимости от состава среды (природная вода и искусственные среды), начальной численности и возраста культуры *Scenedesmus quadricauda*, концентрации и дозы токсиканта.

2. Исследовать связь циркадных ритмов с изменением токсикочувствительности микроводорослей.

3. Провести сравнительную оценку действия различных токсикантов на микроводоросли.

4. Изучить влияние разных уровней минерализации на рост пресноводных тест-организмов *Scenedesmus quadricauda* и *Monoraphidium arcuatum* с целью оценки их пригодности для биотестирования слабосоленых сред.

5. Исследовать влияние микро- и наночастиц пластика разного типа на структурные и функциональные показатели организмов фитопланктона, изучить комбинированные эффекты пластиков с другими токсикантами, провести сравнительный анализ токсичности пластиковых частиц в зависимости от их размера, состава и состояния.

Объект исследования. Взаимодействие потенциально токсичных веществ и материалов разной природы с представителями фитопланктона при различных условиях проведения токсикологических испытаний.

Научная новизна. Впервые выявлена зависимость токсичности вещества для тест-организмов от времени начала эксперимента. Это позволяет без дополнительных затрат значительно повысить точность результатов биотестов. В существующих методиках биотестирования параметр времени суток на момент начала опыта не регламентирован, нами же установлено, что при утренних и вечерних добавках токсиканта полученные величины ЭК₅₀ эталонного токсиканта К₂Сг₂О₇ для микроводорослей, отличаются более чем в 4 раза.

Впервые разработан оригинальный подход к оценке токсичности смеси наночастиц пластика и токсикантов разной природы, учитывающий как случаи угнетения, так и стимуляции показателей состояния микроводорослей, а также все возможные типы взаимодействия токсикантов в смеси. Данный подход может быть использован для оценки токсичности смеси любых загрязнителей.

Впервые определены диапазоны солености среды и сроки проведения биотестов, позволяющие осуществлять биотестирование на пресноводных видах микроводорослей *S. quadricauda* и *M. arcuatum*.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученная новая информация о циркадных (суточных) ритмах в жизнедеятельности гидробионтов позволяет разработать оптимальные режимы освещения и времени добавки питательных веществ или кормов, которые помогут получить максимальный прирост биомассы за короткий срок, что имеет высокую значимость при выращивании гидробионтов в аквакультуре или в биотехнологии.

Выводы, сделанные на основании исследования ключевых, влияющих на конечный результат, условий проведения биотестирования, помогут в дальнейшем избежать ошибок в определении показателей токсичности (ЭК₅₀, ОБУВ, ПДК и др.), повысят точность и воспроизводимость результатов и эффективность процедуры нормирования.

Проверка токсичности микро- и наночастиц пластика по шести показателям состояния растительного тест-организма позволила выявить наличие токсического эффекта при меньших токсических нагрузках. Эти данные помогут избежать недооценки опасности пластикового загрязнения.

Данные экспериментов на природной воде и искусственной среде важны для экстраполяции данных, полученных в лабораторных условиях, на природные водоемы, а также для определения региональных нормативов загрязняющих веществ с учетом геохимических особенностей местных водоемов.

Результаты настоящей работы позволяют рекомендовать в практику биотестирования слабосоленых сред культуры пресноводных водорослей *S. quadricauda* и *M. arcuatum*. Проведенное сравнительное исследование темпов роста адаптированной и неадаптированной культур *S. quadricauda* к уровню минерализации 2,5 г/л позволяет сократить процедуру подготовки к биотестированию с этим видом слабосоленых сред более чем на 2 недели.

Методология и методы исследования. В работе использовали как классические, так и современные методы изучения состояния микроводорослей в условиях токсической нагрузки. Исследования взаимодействия потенциально токсичных веществ и материалов разной природы с представителями фитопланктона при различных условиях альготестирования проводили с учетом ключевых контролируемых факторов, влияющих на результат.

Положения, выносимые на защиту:

1. Токсичность микро- и нано- частиц пластика зависит от их размера, типа и состояния, происхождения, концентрации, времени воздействия и оцениваемого тест-параметра.

2. Тип взаимодействия токсикантов с нанопластиком (НП) при комбинированном воздействии на культуры микроводорослей зависит от вида тест-организма, измеряемого параметра, природы токсиканта, концентраций токсикантов и НП, длительности воздействия.

3. Ключевые контролируемые факторы эксперимента: состав среды для выращивания культуры, возраст культуры, начальную плотность ее клеток, концентрацию, а не дозу токсиканта, и время суток на момент его добавки следует строго регламентировать в методиках и учитывать при проведении биотестирования.

4. Культуры пресноводных водорослей *S. quadricauda* и *M. arcuatum* могут быть рекомендованы в качестве тест-организмов для оценки соленых проб при низких и средних уровнях минерализации среды.

Личный вклад автора. Диссертантом лично осуществлен поиск и анализ данных литературы, разработана рабочая гипотеза о влиянии времени суток на результат альготестирования, определена методология постановки опытов, выполнены в полном объеме экспериментальные исследования, обработано 3240 проб и выполнено более 12 тыс. измерений, проведены обсуждение, интерпретация и анализ полученных результатов, подготовлены печатные работы.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов подтверждается использованием общепризнанных методов водной экотоксикологии и статистической обработки. Результаты работы были представлены на заседании кафедры общей экологии и гидробиологии биологического факультета МГУ, а также на 23 всероссийских и международных конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 11 статей (2 из которых также вышли в переводных изданиях), из них 9 в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности 1.5.16. Гидробиология (биологические науки).

Структура диссертации. Диссертация изложена на 262 страницах и состоит из введения, 3 глав, заключения и приложения. Основной текст работы включает 71 рисунок и 55 таблиц. Список литературы содержит 218 источников.

Благодарности и финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития (Соглашение № 075-15-2024-546).

Автор выражает глубочайшую благодарность к.б.н. Ипатовой Валентине Ивановне за чуткое научное руководство и помощь на всех этапах выполнения работы. Благодарю сотрудников кафедры общей экологии и гидробиологии биологического факультета МГУ за обучение, поддержку, ценные замечания и комментарии к диссертации. Я очень признательна всем моим друзьям и близким за поддержку на всём протяжении работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Обзор литературы. В данной главе проанализированы данные о токсичности для планктонных организмов соединений и материалов разной природы. Отдельно описаны существующие модели оценки комбинированного действия токсикантов на организмы. Систематизированы данные о влиянии ключевых, контролируемых факторов среды на водоросли в лабораторных условиях при проведении биотестирования. Особое внимание уделено следующим факторам: время суток на момент добавления токсиканта, концентрация или доза токсиканта, а также уровень минерализации среды.

Глава 2. Материалы и методы. Основными тест-организмами в хронических экспериментах были альгологически чистые культуры зелёных микроводорослей *Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Vreb. и *Monoraphidium arcuatum* (Korsch.) Hind., которые выращивали на среде Успенского № 1 в климатостате при освещённости 3 клк со сменой дня и ночи (12:12 ч), при температуре 24 ± 1 °С.

Большинство острых экспериментов проводили с термофильным штаммом *Chlorella vulgaris* Beijer. на среде Тамия 2% в культиваторе КВМ-05 при постоянном освещении и $T=36$ °С (ПНД Ф Т 14.1:2:4.10-2004..., 2004).

Культуру диатомовой водоросли *Thalassiosira weissflogii* (Grunow) Fryxell et Hastle в хроническом опыте выращивали на среде Гольдберга-Кабановой в люминостате при освещённости 3 клк со сменой дня и ночи (12:12 ч), $T=22 \pm 2$ °С.

Эксперименты по изучению влияния условий постановки опытов на результаты биотестирования проводили по схеме (рис. 1).

Статистическую обработку результатов проводили в программе STATISTICA Version 10 (StatSoft Inc., USA) и с применением пакета Microsoft Office Excel 2019. Нормальность распределения оценивали по критерию Колмогорова-Смирнова. Оценку статистической значимости проводили в зависимости от эксперимента с использованием критериев Стьюдента, Манна-Уитни или Даннета. Различия считали значимыми при $p < 0,05$ и при $q_{\text{критич}} < q$.

Развитие *S. quadricauda* изучали в норме и при добавлении в среду 6 образцов микропластика (МП) в концентрации 3 мг/л. Виды исследуемых пластиков, отобранных на супралиторали Баренцева моря (30.08.2020):

1. EPS (пенополистирол, размер частиц (р.ч): $18,9 \pm 12,6$ мкм),
2. PU (пенополиуретан, р.ч.: $76,7 \pm 18,9$ мкм),
3. HDPE белый пищевой (полиэтилен, р.ч.: $208,3 \pm 72,3$ мкм),
4. HDPE красный пищевой (р.ч.: 220 ± 74 мкм),
5. PP (полипропилен, диаметр волокон: $171,3 \pm 17,7$ мкм).

А также исследовали EPS (интактный, чистый), 2019 года производства, с размером частиц: $130,2 \pm 35,9$ мкм.

МП получали из макрообразцов, обрабатывая их поверхность и просеивая через стальное сито с размером ячеек 300 мкм. МП отделяли от абразивного материала плотностной сепарацией в дистиллированной воде. Размеры частиц определяли на микрофотографиях с помощью ПО «КОМПАС-3D v14».

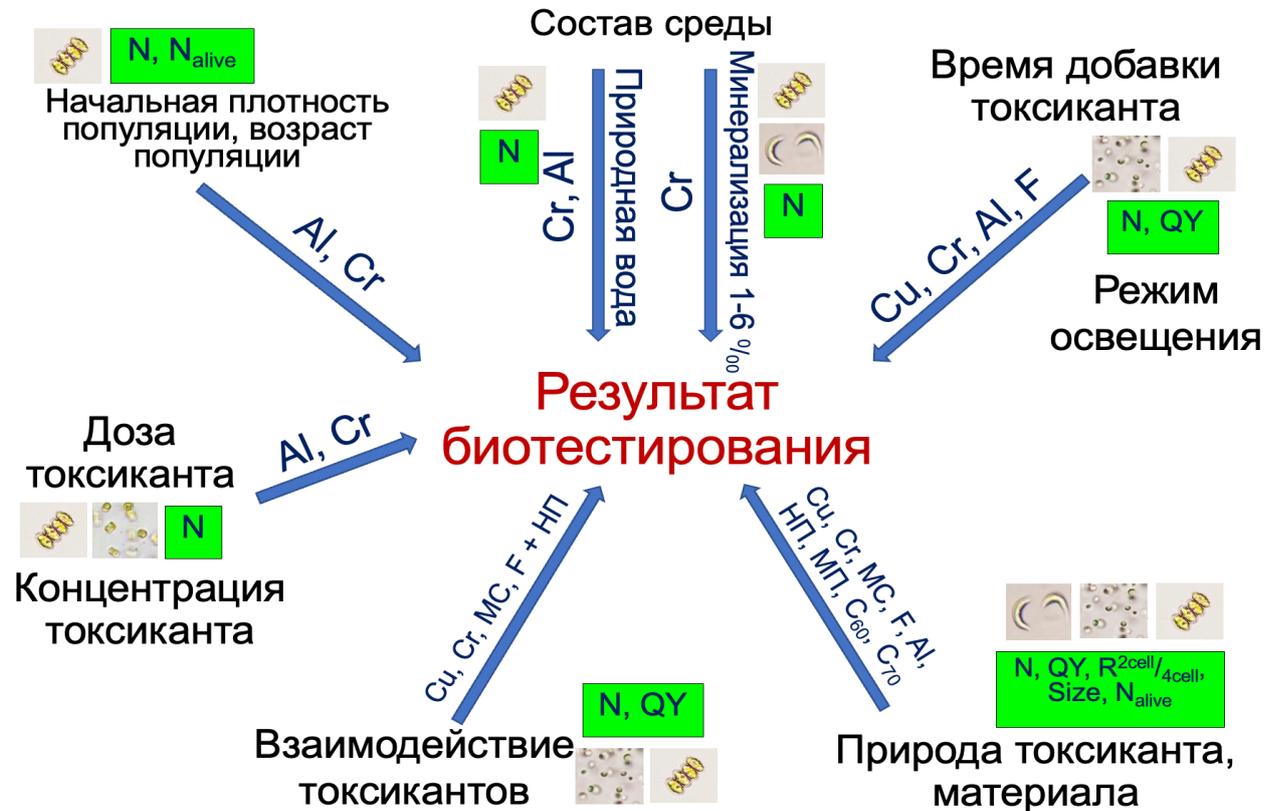


Рисунок 1. Общая схема проведенных экспериментов по влиянию условий на результат биотестирования с использованием культур микроводорослей **полужирным** шрифтом выделены условия экспериментов, на стрелках указаны названия токсикантов, на фото представлены тест-организмы, зеленым отмечены показатели состояния культур: QY – эффективность фотосинтеза, N – общая численность, N_{alive} – доля живых клеток, $R^{2cell}/4cell$ – соотношение 2х- и 4х- клеточных ценобиов, Size – ширина клеток).

Действие золы, полученной от сжигания при 400 °C смеси разных типов морского пластика в соотношениях, близких к наблюдаемым на побережье Баренцева моря, на культуру *S. quadricauda* оценивали в интервале концентраций 0,01–1000 мг/л.

Наночастицы полистирола (НП) использовали в качестве модельного НП для исследования его влияния на токсичность иных веществ и соединений для микроводорослей. Для приготовления суспензии НП использовали образец первичного полистирола (EPS) с размером частиц 100 нм, поставляемый Sigma Aldrich, Germany в виде 10% водной суспензии с содержанием наночастиц 1,05 г/см³. Опыты поставлены по плану полнофакторного эксперимента 2² – два фактора (2 токсиканта НП и MC) на двух уровнях (2 концентрации). Взяты

концентрации НП 10 и 50 мг/л наночастиц и концентрации второго исследуемого токсиканта, выбранные по результатам предварительных опытов.

Воздействие НП в комбинации с метиленовым синим (МС) и медью на культуру *S. quadricauda* оценивали в хронических опытах, а на культуру *C. vulgaris* в комбинациях с хромом, медью и фтором – в острых опытах.

В экспериментах эффект токсиканта или состава среды на культуры *S. quadricauda*, *M. arcuatum* и *T. weissflogii* оценивали по показателям численности, доле живых и мертвых клеток в течение хронических опытов.

Токсическое действие $K_2Cr_2O_7$ оценивали на культурах *S. quadricauda* и *T. weissflogii* как с однократным, так и с многократными его добавками.

Проведены опыты с исходной плотностью 200, 500 тыс. кл/мл, 1,2 млн кл/мл с добавлением 1 мг/л хрома и 25, 100, 500 и 1000 тыс. кл/мл с добавлением 5,6 мг Al^{3+} /л с культурой *S. quadricauda*, которые сравнивали с контролем с тем же исходным числом клеток, но без токсиканта.

Добавки $AlCl_3$ в концентрациях 50 и 100 мг/л проводили на 0, 7, 14, 21 и 28 сут развития культуры *S. quadricauda* без регулирования численности клеток на момент внесения токсиканта. Длительность опыта – 49 сут.

Развитие *S. quadricauda* изучали в течение 21 сут в норме и при добавлении $AlCl_3$ на среде Успенского №1 и в озерной воде М. Вудьявр (с аналогичными добавками питательных солей).

При изучении влияния низкой минерализации среды на микроводоросли в опытные растворы с заданным уровнем минерализации производили добавки питательных солей для среды Успенского №1.

На *C. vulgaris* исследовали токсичность $K_2Cr_2O_7$; $CuSO_4$; $AlCl_3$ и Na_2HPO_4 в зависимости от времени суток на момент добавки токсиканта в культуру.

Эксперименты проводили в люминостате 3 сут и культиваторе КВМ-05 – 48 ч. Начинали опыты и добавляли токсикант утром в 9.00 (начало светового периода в люминостате) или вечером в 21.00 (конец светового периода в люминостате). Схема опытов на рис 2.

Условия Токсикант	Люминостат или культиватор	
	Начало в 9:00	в 21:00
Концентрация 1		
Концентрация 2		
Концентрация 3		
Контроль		

Рисунок 2. Схема добавки токсикантов в острых опытах по изучению влияния на результат биотестирования времени суток на момент добавки токсиканта в культуру *Chlorella vulgaris*.

В опытах с культурой *S. quadricauda* оценена токсичность $K_2Cr_2O_7$ в зависимости от времени добавления его в среду: вечером во время, совпадающее с

окончанием светового периода, и утром во время, совпадающее с началом светового периода. Хронический 21 сут эксперимент состоял из двух параллельных опытов, начальные условия были максимально унифицированы за исключением времени постановки.

В некоторых экспериментах использовали такие дополнительные показатели, как изменение размеров клеток, соотношение 2-х и 4-х клеточных ценобиев в популяции, а также содержание ТБК-активных продуктов в клетках (согласно Stewart, Bewley, 1980 с небольшими модификациями).

Примененный в работе подход учитывает данные комбинированного действия добавок на измеряемый показатель культуры при всех сроках испытаний.

По вертикальной оси откладывают значения оценок комбинированного воздействия добавок (например, НП и МС) на изменение численности клеток (1):

$$\frac{N_{\text{контроль}}}{N(\text{МС+НП})} \quad (1).$$

Однако это может быть и другой количественный параметр состояния культуры, например, величина эффективности фотосинтеза QY.

А по горизонтальной оси откладывают произведение оценок при действии их порознь (2):

$$\frac{N_{\text{контроль}}}{N(\text{МС})} \times \frac{N_{\text{контроль}}}{N(\text{НП})} \quad (2).$$

Точки, лежащие на биссектрисе или вблизи нее, указывают на аддитивность действия добавок, отклонение вниз – на антагонизм (ослабление совместного действия), а вверх – на синергизм (усиление действия).

Данный метод оценки комбинированных эффектов является модификацией метода W.S. Abbott (1925). Однако вместо отклонения опытных значений от контроля (угнетение в %) в настоящей работе предложено использовать отношение абсолютных значений измеряемого параметра в контроле к абсолютным значениям в опыте. Это позволяет учитывать случаи, в которых токсикант вызывает стимуляцию измеряемого параметра.

Глава 3. Результаты и обсуждение

Влияние частиц пластика на микроводоросли. Исследование токсичности 5 образцов МП, отобранных на литорали Баренцева моря, и 1 свежего образца по показателю численности клеток *S. quadricauda* позволило установить ряд токсичности в порядке ее убывания:

$$\text{PU} > \text{HDPE (белый)} > \text{HDPE (красный)} > \text{EPS} > \text{EPS (свежий)} > \text{PP}.$$

В присутствии PU доля мертвых клеток в процессе роста колебалась в пределах 13–42% и была максимальной на 7 сут опыта, а в присутствии HDPE (красный) – 15–18% до 7 сут опыта. В остальных случаях жизнеспособность культуры была на уровне контроля.

Влияние микропластика на культуру *S. quadricauda* носит неоднозначный характер и вызывает мозаичную ответную реакцию, оцениваемую по разным

структурным и функциональным показателям ее состояния: сильное угнетение роста культуры может сопровождаться значительным повышением ТБК-активных продуктов в клетках, при этом величина эффективности фотосинтеза не меняется.

Токсичность зольного остатка в интервале концентраций от 0,01 до 1000 мг/л была выявлена по показателю численности клеток при 1000 мг/л, по показателю максимального квантового выхода фотохимии ФСII (F_V/F_M) – при 0,01 мг/л, а по изменению количества ТБК-активных продуктов в клетках – при 0,1 мг/л и выше. Следовательно, зола оказалась намного токсичнее исследованных видов МП, поскольку для МП по разным показателям токсический эффект выявлен при 3 г/л.

При воздействии наночастиц полистирола (НП) ответная реакция культуры происходит сразу и отмечена в эксперименте уже на 1 сут или в виде стимуляции численности клеток при малых дозах 1 и 5 мг/л (в результате ускоренного деления клеток при стрессе), или снижения эффективности работы фотосинтетического аппарата клеток, начиная с 5 мг/л.

НП на 3 порядка токсичнее частиц МП, поскольку значимый эффект на ростовые и физиологические показатели состояния популяции клеток микроводоросли *S. quadricauda* был обнаружен только при высоких концентрациях (3 г/л) частиц МП, а в случае с НП – уже при 1 мг/л.

Проанализирована доля 2- и 4- клеточных ценобиев в контроле и при добавлении НП. При 10 мг/л НП к 10 сут наблюдали уменьшение, а при 50 мг/л – увеличение доли 2- клеточных ценобиев *S. quadricauda*.

Дополнительно была рассчитана встречаемость клеток с разной шириной (рис. 3) в присутствии НП на 2 сут и 4 сут и 7 сут опыта. Длина клеток практически не менялась как в опыте, так и в контроле.

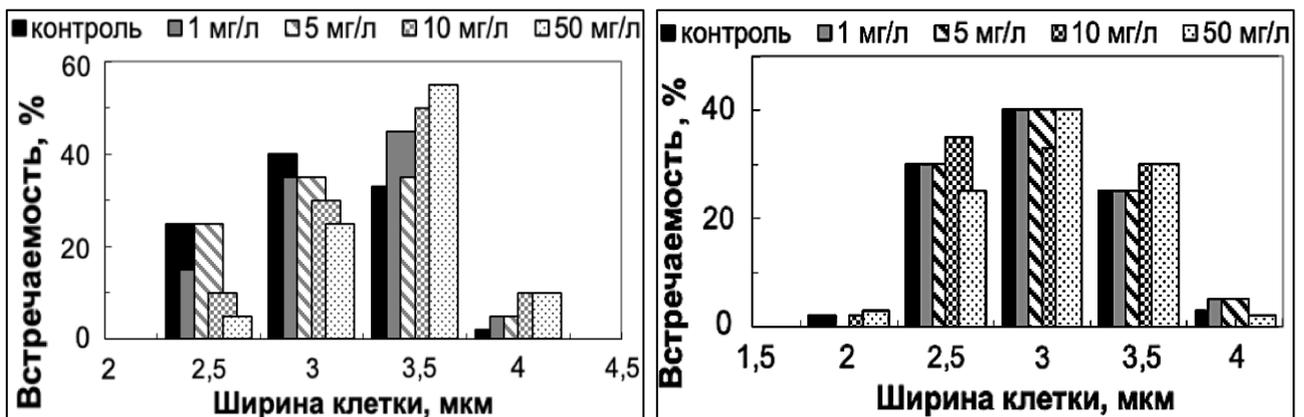


Рисунок 3. Влияние наночастиц полистирола на изменение ширины клеток в культуре *Scenedesmus quadricauda* на 2 сут (слева) и на 7 сут (справа).

На 2 сут в контроле и опыте отмечена наибольшая встречаемость клеток шириной 3–3,5 мкм. Однако при добавках НП увеличивалась доля крупных клеток 3,5 и 4 мкм, что является признаком задержки деления. На 7 сут доля крупных

клеток 3,5–4 мкм уменьшалась, а мелких (2,5 мкм) – увеличивалась, что является результатом деления клеток.

Встречаемость клеток разной размерной группы может служить хорошим показателем состояния популяции в норме и при токсическом воздействии.

Доля живых клеток *S. quadricauda* мало менялась в присутствии НП и в большинстве случаев разница не превышала 1–6%.

Как показали наши исследования, токсичность наночастиц полистирола зависит от его концентрации, времени воздействия и оцениваемого тест-параметра. Обнаружена неоднозначная мозаичная ответная реакция тест-культуры на присутствие 100 нм частиц интактного полистирола в культуральной среде в интервале концентраций 1–50 мг/л.

Сочетание разных структурных и функциональных показателей развития и состояния популяции клеток микроводоросли *S. quadricauda* в хроническом эксперименте позволяет выявить токсический эффект НП, МП и золы от сжигания смеси пластиков при меньших их концентрациях и более адекватно давать оценку токсичности исследуемого образца.

Адгезия планктонных водорослей на частицах микропластика. Для обеспечения визуализации МП при его нахождении в среде с клетками микроводоросли *S. quadricauda* использовали образец полиэтилена (ПЭТ) красного цвета с добавлением флуоресцентного красителя.

Через 60 мин инкубации наблюдали редкие случаи присутствия единичных клеток на частицах МП (рис. 4). При падающем УФ свете живые клетки микроводорослей светятся красным светом.

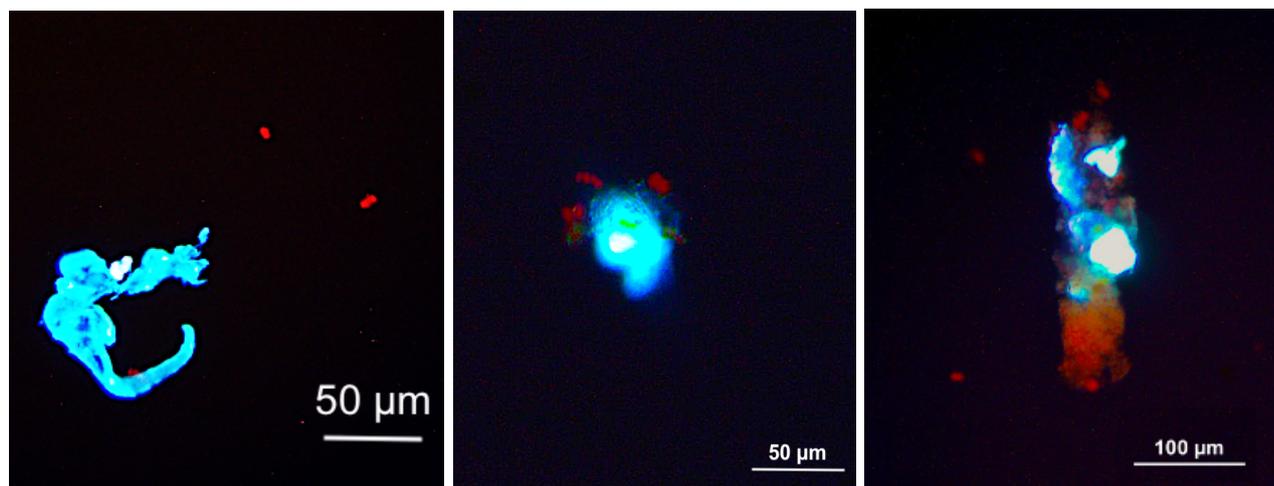


Рисунок 4. Единичные случаи адгезии клеток водоросли *Scenedesmus quadricauda* на частицах микропластика в культуральной среде через 60 мин инкубации (слева), через 24 ч (в центре) и после 48 ч инкубации (справа) (под люминесцентным микроскопом Микромед, с системой визуализации TourCam 5.1 MP под УФ светом, увеличение 400).

Спустя 24 ч пребывания МП в среде с клетками водоросли наблюдали увеличение числа случаев адгезии клеток на частицах МП (рис. 4). При этом

заметно, что в большинстве случаев клетки контактируют не с пластиком напрямую, а со взвесью, осевшей на частицах МП. Эта тенденция сохраняется и спустя 48 ч пребывания МП в среде с клетками водоросли.

Таким образом, адгезия клеток и частиц МП в водной среде происходит достаточно быстро – уже через один час после добавления в среду частиц МП, причем со временем налипание клеток на эти частицы усиливается.

Оценка токсичности водорастворимых фуллеренов C₆₀ и C₇₀. Действие фуллеренов C₆₀ и C₇₀ на культуру *S. quadricauda* оценивали при концентрациях 1, 5 и 10 мг/л в 17 сут в хроническом опыте. Их добавка приводит к лучшему росту культуры, отмеченному как по показателю численности клеток, так и по величине эффективности фотосинтеза. Фуллерен C₆₀ стимулирует рост культуры, начиная с 5 мг/л, а фуллерен C₇₀ – с 10 мг/л.

Токсикологический анализ комбинированных эффектов НП с другими токсикантами различной природы.

Действие НП в комбинации с хромом на культуру *C. vulgaris*. По показателю численности клеток больше всего случаев (12 из 16 комбинаций) отмечено для взаимодействия исследуемых добавок по типу антагонизма. Результаты показали, что комбинированный эффект хрома и НП на *C. vulgaris* зависит как от различных комбинаций концентраций этих добавок, так и от времени действия.

Действие НП в комбинации с фтором на культуру *C. vulgaris*. Оценка комбинированного действия изучаемых добавок в опытах свидетельствует о преобладании случаев антагонизма при их взаимодействии в среде в присутствии клеток *C. vulgaris*. Нейтрализм отмечен только при малой концентрации 250 мг F/л в присутствии разных концентраций НП. В то же время наблюдаемые случаи антагонизма были вызваны большими концентрациями 1500 мг F/л в сочетании с разными концентрациями НП.

При комбинированном действии фтора и НП на величину эффективности фотосинтеза отмечены: 1 случай синергизма при комбинации F 1500 + НП 10 мг/л, 3 случая антагонизма при комбинации высоких концентрациях фтора и НП, а также высокой концентрации фтора и малой концентрации НП, и 2 достоверных случая независимого действия.

Действие НП в комбинации с метиленовым синим на культуры *C. vulgaris* и *S. quadricauda*. На рис. 5 представлены данные комбинированного действия добавок НП и МС на изменение численности клеток *C. vulgaris* и *S. quadricauda* при всех сроках испытаний.

Для обеих культур по численности клеток антагонизм отмечен в большинстве случаев при всех комбинациях НП и МС и сроков наблюдения. Однако, по показателю эффективности фотосинтеза клеток *S. quadricauda* обнаружены продолжительные эффекты усиления токсического действия среды при совместном присутствии в ней высоких концентраций 0,5 мг/л МС и 50 мг/л НП, в то же время

как комбинации их низких концентраций – 0,1 мг/л МС и 10 мг/л НП – приводят к усилению токсичности среды со временем.

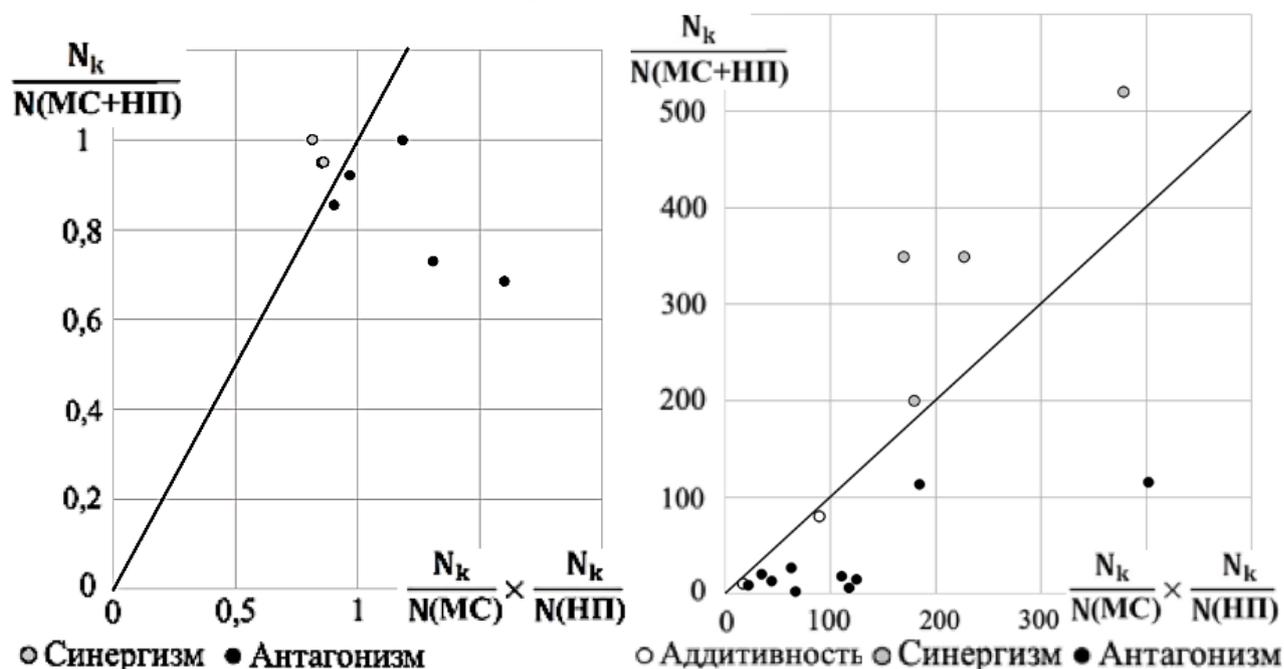


Рисунок 5. Зависимость между оценками комбинированного и раздельного действия метиленового синего и нанопластика на изменение численности клеток (N) *Chlorella vulgaris* в остром опыте (слева) и *Scenedesmus quadricauda* в хроническом опыте (справа). N_k – контроль.

Действие НП с CuSO_4 на *C. vulgaris* и *S. quadricauda*. Совместное присутствие обоих токсикантов в среде культивирования *C. vulgaris* приводило к разному результату в зависимости как от концентраций, так и срока их действия (рис. 6).

Так, при 0,01 мг/л меди и 10 мг/л НП наблюдали небольшое, но значимое улучшение роста культуры на 2 сут. С увеличением концентрации меди (0,05 и 0,15 мг/л) в присутствии малой концентрации 10 мг/л НП наблюдали независимое действие токсикантов. А в присутствии 50 мг/л НП при всех исследованных концентрациях меди во все сроки наблюдений отмечен антагонизм. Присутствие высоких концентраций НП вызывает протекторный эффект, что может быть связано с адсорбцией CuSO_4 на частицах НП, которая приводит к уменьшению концентрации меди в среде и снижению ее токсического действия на *C. vulgaris*.

Улучшение роста *S. quadricauda* к концу хронического эксперимента при комбинированном действии токсикантов может происходить как в результате адаптации культуры после длительного токсического воздействия, так и вследствие адсорбции меди на НП и ее частичного ухода из водной фазы среды.

При действии меди и НП в бинарных комбинациях на *S. quadricauda* были обнаружены все три типа взаимодействий (синергизм, антагонизм и нейтрализм), а на *C. vulgaris* – два типа (антагонизм и нейтрализм).

При повышении концентрации НП от 10 до 50 мг/л чаще встречающиеся вначале случаи антагонистического взаимодействия токсикантов впоследствии сменялись синергизмом (рис. 7).

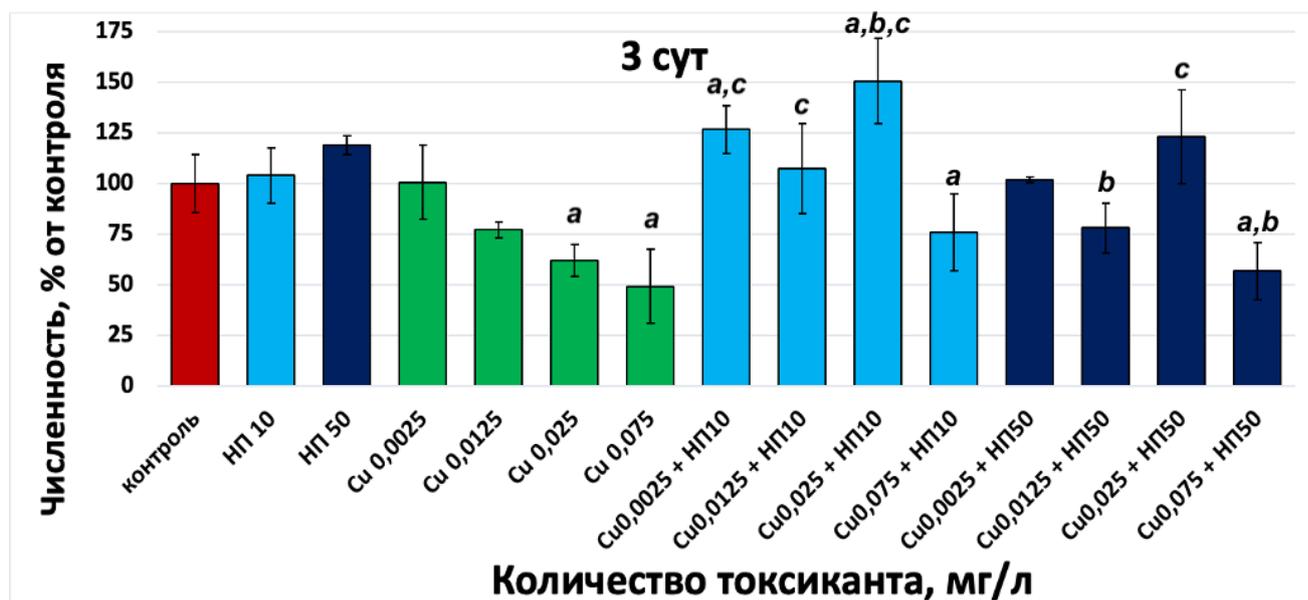


Рисунок 6. Изменение численности клеток культуры *Scenedesmus quadricauda* в присутствии в среде CuSO_4 и нанопластика отдельно и совместно (*a*, *b*, *c* – значимые отличия опытных значений по критерию Даннета при $p < 0,05$: *a* – от чистого контроля, *b* – от значений в опыте с нанопластиком в соответствующей концентрации, *c* – от значений в опыте с токсическим веществом в соответствующей концентрации).

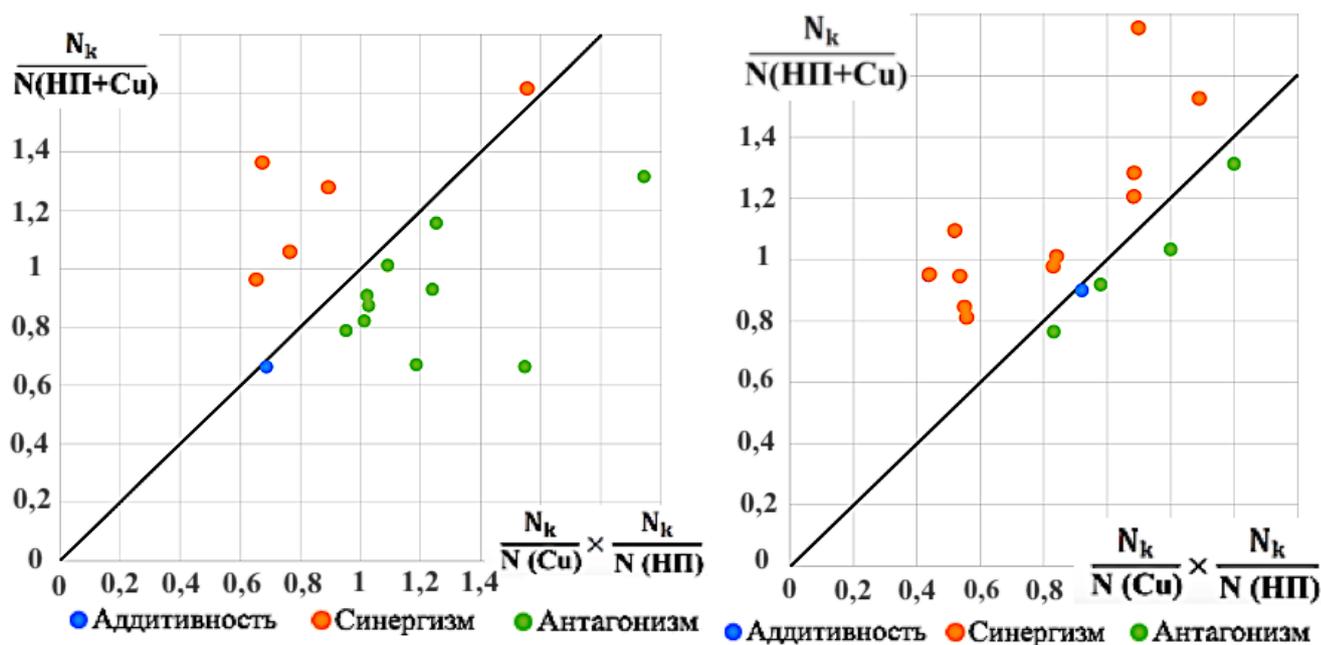


Рисунок 7. Распределение значений оценок комбинированного и раздельного действия ионов меди и нанопластика в концентрациях 10 мг/л (слева) и 50 мг/л (справа) на изменение численности клеток (*N*) водоросли *Scenedesmus quadricauda* в хроническом опыте. N_k – контроль.

Разницу в ответной реакции двух видов микроводорослей можно объяснить их видовой спецификой, условиями культивирования, разными размерами и морфологией клеток.

Влияние ключевых, контролируемых факторов среды в лабораторных условиях при проведении альготестирования.

Влияние фактора времени добавления токсиканта. В остром 3-сут опыте была обнаружена зависимость токсичности $K_2Cr_2O_7$ от времени его добавления в культуру *S. quadricauda*.

Хронический 21 сут эксперимент представлял собой два параллельных опыта, каждый со своим контролем. Постановка опытов была проведена непосредственно перед добавлением токсиканта. Тенденция усиления токсичности $K_2Cr_2O_7$ при утренней добавке, обнаруженная в остром эксперименте на 3 сут, сохранялась на этот же срок и в хроническом опыте.

Рассчитанные величины $ЭК_{50}$ на разные сроки наблюдений подтверждают усиление токсичности $K_2Cr_2O_7$ для культуры при постановке опыта утром (табл. 1).

Таблица 1. Величины $ЭК_{50}$ $K_2Cr_2O_7$ для *Scenedesmus quadricauda* на разные сроки наблюдений.

Срок, сут	$ЭК_{50}$	
	Утро	Вечер
3	0,80	4,18
7	1,39	1,54
14	0,48	2,48
21	2,49	1,17

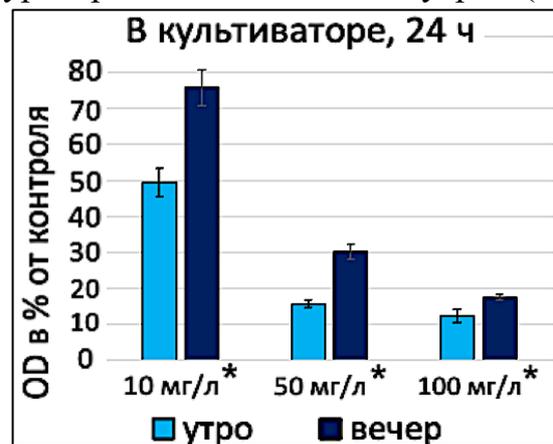


Рисунок 8. Изменение оптической плотности (OD) культуры *Chlorella vulgaris* в зависимости от концентрации $AlCl_3$ при постановке опыта утром и вечером в культиваторе через 24 ч (* – значимые отличия в опытах с утренними и вечерними добавками $AlCl_3$ по критерию Даннета).

Полученные на культуре *S. quadricauda* результаты свидетельствовали о необходимости проведения исследований влияния фактора времени добавления токсиканта на результат биотеста и на других тест-организмах и/или с токсикантами другой природы.

Поэтому были проведены дополнительные эксперименты с культурой *C. vulgaris* с четырьмя токсикантами разной природы. Все опыты были острыми, поскольку наибольшая разница в ответной реакции культуры *S. quadricauda* на утренние и вечерние добавки токсиканта была отмечена на ранние сроки (до 3 сут) хронического эксперимента.

Эксперименты с разным временем добавок $AlCl_3$ на *C. vulgaris*. В опытах с $AlCl_3$ в культиваторе через 24 ч при сравнении одинаковых концентраций утренних и вечерних добавок токсиканта значимые различия численности *C. vulgaris* отмечены при всех испытанных концентрациях (рис. 8).

В люминостате с ежедневным измерением величины оптической плотности наиболее сильное значимое угнетение роста в большинстве дат наблюдения фиксировали утром. А при сравнении одинаковых концентраций утренних и вечерних добавок токсиканта значимые различия величин этого показателя отмечены при концентрациях 10 и 100 мг/л на 1 сут и при всех изученных концентрациях – на 2 сут (рис. 9).

Расчёт $ЭК_{50}$ $AlCl_3$ в опыте с культурой *C. vulgaris* в культиваторе за 24 ч и люминостате за 48 ч подтверждает факт большей чувствительности к токсиканту при постановке опыта и добавке токсиканта утром ($ЭК_{50}=8,91$ мг/л в культиваторе и 153,65 мг/л в люминостате) по сравнению с вечерней добавкой ($ЭК_{50}=26,25$ мг/л в культиваторе и 276,96 мг/л в люминостате).

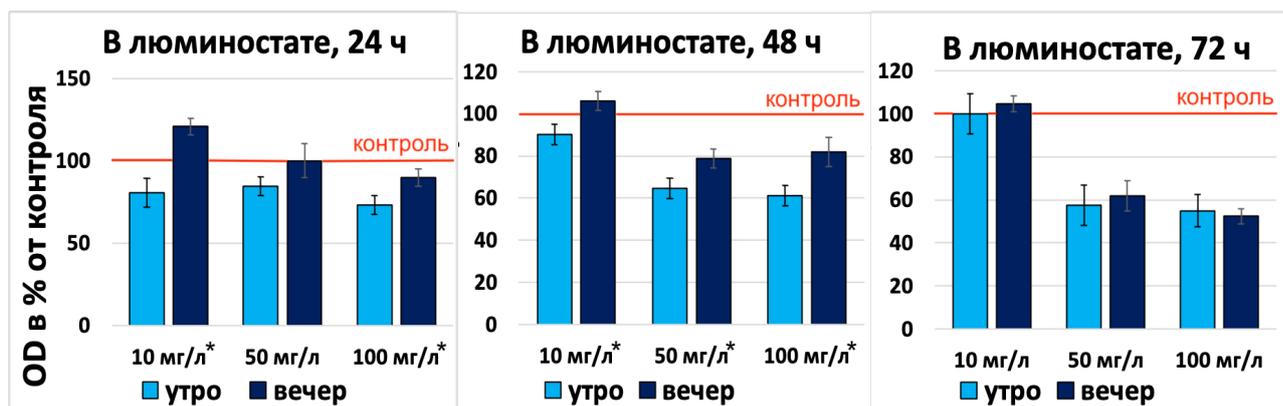


Рисунок 9. Изменение оптической плотности (численности клеток) культуры *Chlorella vulgaris* в зависимости от концентрации $AlCl_3$ при постановке опыта утром и вечером (*значимые отличия значений исследуемого показателя по критерию Даннета в опытах с утренними и вечерними добавками токсиканта).

Полученные результаты с культурой *C. vulgaris* с $AlCl_3$ в диапазоне концентраций 10–100 мг/л по показателям численности клеток и эффективности фотосинтеза показали, что как в люминостате при освещении в режиме смены дня и ночи и лимитировании по температурным условиям, так и в культиваторе при круглосуточном освещении и оптимальной температуре, токсичность вещества в утренние часы постановки опыта выше, чем при постановке опыта вечером.

В экспериментах с $K_2Cr_2O_7$ наиболее сильное угнетение эффективности фотосинтеза клеток культуры отмечено при постановке опыта утром как в люминостате, так и в культиваторе. Расчёт $ЭК_{50}$ $K_2Cr_2O_7$ за 24 ч в остром опыте с культурой *C. vulgaris* в культиваторе подтверждает факт ее большей чувствительности к токсиканту при постановке опыта и добавке токсиканта утром ($ЭК_{50}=1,74$) по сравнению с вечерней добавкой ($ЭК_{50}=2,14$).

В опытах с CuSO_4 как в люминостате при освещении в режиме смены дня и ночи, так и в культиваторе при круглосуточном освещении, токсичность меди по численности клеток и эффективности фотосинтеза в утренние часы постановки опыта оказывается выше, чем при постановке опыта вечером, как и в экспериментах с $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$.

Опыты с культурой *S. vulgaris* в диапазоне концентраций 100–1000 мг/л Na_3PO_4 показали, что как в люминостате, так и в культиваторе, действие вещества в утренние часы постановки опыта угнетает эффективность фотосинтеза сильнее. При этом, стимулирующее действие фосфата натрия на численность клеток в культиваторе было выше при вечерних добавках.

Установлено, что время суток на момент добавки токсиканта является ключевым фактором и влияет на результаты биотестирования. В большинстве случаев утренние добавки токсиканта в большей степени влияют на рост и физиологическое состояние культур, чем вечерние, как при постоянном освещении, так и в режиме 12:12 ч. ЭК₅₀ для двух видов водорослей на разные сроки наблюдений подтверждают факт усиления токсичности при постановке опыта утром, по сравнению с вечерней добавкой $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, CuSO_4 или AlCl_3 .

Обнаруженный эффект можно объяснить повышенной чувствительностью к токсиканту молодых клеток, появившихся в результате деления клеток культуры в ночное время.

Поэтому время суток, как ключевой и критически важный фактор, следует учитывать при проведении алыготестирования, в частности, для интерпретации экспериментальных данных о токсичности исследуемых веществ, а также для получения воспроизводимых результатов.

Влияние концентрации и дозы токсиканта. В условиях постоянной дозы при низких концентрациях хрома 0,001 и 0,01 мг/л в течение хронических экспериментов с периодическими добавками $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ скорость роста *S. quadricauda* и *T. weissflogii* была близкой как к уровню контроля без $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, так и к уровню контроля с однократным добавлением хрома в начале эксперимента, хотя суммарные концентрации $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ в конце экспериментов были в 3,3–3,4 раз выше, чем при однократном его добавлении.

Следовательно, периодическое добавление хрома в течение эксперимента при сохранении его постоянной дозы при испытанных уровнях токсического воздействия мало меняет картину развития токсического эффекта во времени по сравнению с однократной его добавкой в начале опыта.

Изучено влияние $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ на рост культуры *S. quadricauda* в зависимости от исходной плотности популяции (200 тыс. кл/мл, 500 тыс. кл/мл, 1 млн кл/мл, 2 млн кл/мл). С увеличением исходной плотности популяции клеток токсичность 1 мг/л хрома снижается. Таким образом, наибольшая токсичность выявлена при

наименьшей плотности клеток 200 тыс. кл/мл, когда начальная доза токсиканта на клетку была максимальной.

Исследовано влияние $AlCl_3$ на рост *S. quadricauda* в зависимости от исходной плотности популяции (25 тыс. кл/мл, 100 тыс. кл/мл, 500 тыс. кл/мл, 1 млн кл/мл). Самую высокую токсичность 50 мг/л $AlCl_3$ (5,6 мг/л Al^{3+}) обнаружили при начальной плотности 25 тыс. кл/мл, с увеличением ее до 1 млн кл/мл доза токсиканта на одну клетку уменьшалась, а токсичность снижалась.

Отдельно было показано, что с увеличением возраста культуры в процессе ее роста на момент внесения $AlCl_3$, доза токсиканта на клетку и его токсичность снижались. Уже для 14-сут культуры концентрация 50 мг/л становилась нетоксичной. Начиная с 28 сут роста культура переходила в стационарную фазу, а с 35 сут – в фазу отмирания. Поэтому при добавках $AlCl_3$ в культуру в эти сроки ее роста токсичность была незначительной.

Влияние состава среды на результат альготестирования. При сравнении токсичности $AlCl_3$ в диапазоне концентраций от 1 до 20 мг/л на среде Успенского №1 после 8 сут наблюдалось угнетение роста, а на природной воде рост культуры был или на уровне контроля, или даже превышал его. Это может быть связано с присутствием в природной воде фона других макро- и микроэлементов, снижающих токсичность алюминия вследствие взаимодействия элементов по типу антагонизма.

В экспериментах по исследованию влияния низких уровней солености на пресноводные микроводоросли рост культуры *S. quadricauda* был близок к контролю при всех исследованных уровнях минерализации (1; 2,5; 4 г/л и 6 г/л), поэтому она может быть рекомендована для проведения процедуры биотестирования в этом диапазоне в хронических испытаниях.

Значения численности клеток *M. arcuatum* при уровнях минерализации 1,0, 2,5 и 4 г/л в остром опыте до 3 сут не превышали пороговых (20%) значений токсичности, а в дальнейшем снижались. Культура *M. arcuatum* может быть рекомендована в качестве тест-организма только в острых опытах с минерализацией 1–4 г/л.

Таким образом, в настоящей работе проведен детальный анализ ключевых факторов, существенно влияющих на результат альготестирования с использованием микроводорослей с целью оценки токсичности веществ или материалов, поступающих в окружающую водную среду в качестве загрязнителей. Среди них: природа токсиканта, его форма и происхождение; концентрация, а не доза токсиканта; комбинация токсикантов в смеси; вид тест-организма, его возраст, начальная плотность посадки в опыт; срок, на который добавляют токсикант (с возрастом изменяется физиологическое состояние культуры), режим освещения, состав среды, рН, соленость и время суток, в которое проводят добавки токсиканта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении подведены итоги экспериментальной работы по исследованию влияния целого ряда условий альтигестирования на проявление токсичности соединений и материалов различной природы и сформулированы **выводы**:

1. В присутствии 5 видов микропластика из макрообразцов, отобранных на супралиторали Баренцева моря, и одного интактного образца, по изменению численности клеток *S. quadricauda* получен ряд токсичности в порядке ее убывания: PU > HDPE (белый) > HDPE (красный) > EPS > EPS (интактный) > PP. Влияние МП вызывает неоднозначную ответную реакцию культуры: сильное угнетение роста сопровождается значительным повышением содержания продуктов перекисного окисления липидов в клетках, при этом величина эффективности фотосинтеза не меняется.

2. Токсичность зольного остатка от сжигания смеси разных видов пластика в интервале концентраций 0,01–1000 мг/л выявлена по показателю численности клеток *S. quadricauda* при 1000 мг/л, по изменению количества ТБК–активных продуктов в клетках – при 0,1 мг/л и выше, а по величине эффективности фотосинтеза – при 0,01 мг/л, что на 5 порядков выше, чем по численности клеток.

3. Токсичность наночастиц (100 нм) интактного полистирола (НП) зависит от его концентрации, времени воздействия и оцениваемого тест-параметра. Общебиологические интегральные показатели – численность клеток и выживаемость, а также структурные показатели – размер и число клеток в ценобии *S. quadricauda*, под действием 1–50 мг/л НП изменяются несинхронно как между собой, так и с физиологическим показателем – эффективностью фотосинтеза. При интоксикации показано увеличение доли ценобиев с нетипичным числом клеток и увеличение их размеров. НП по показателю численности клеток на 3 порядка токсичнее МП полистирола. При проведении биотестирования для более адекватной оценки токсичности нанопластика необходимо применять сочетание структурных и функциональных показателей состояния тест-организма.

4. Показан синергический, аддитивный и антагонистический эффекты парных комбинаций 10 и 50 мг/л НП с токсикантами разной природы (хром, медь, метиленовый синий, фтор) на культуры *S. quadricauda* и *C. vulgaris* в зависимости от типа токсиканта, его концентрации и срока действия. Для обеих культур по параметру численности клеток антагонизм отмечен в большинстве случаев из всех использованных комбинаций НП с другими токсикантами и сроков наблюдений. Метиленовый синий (МС), фтор и медь действуют сильнее на изменение численности клеток, чем на величину эффективности фотосинтеза, а в смеси с нанопластиком МС и фтор, в отличие от меди, оказывают большее токсическое действие на физиологическое состояние клеток микроводорослей.

5. При изучении связи циркадных ритмов с изменением токсикочувствительности микроводорослей впервые выявлено, что время суток на момент добавки токсиканта ($K_2Cr_2O_7$, $CuSO_4$, $AlCl_3$, Na_2HPO_4) является ключевым фактором и влияет на результаты биотестирования на культурах микроводорослей *S. quadricauda* и *C. vulgaris*. В большинстве случаев утренние добавки в большей степени влияют на показатели роста и физиологическое состояние культур, чем вечерние. Для повышения воспроизводимости результатов биотестирования необходимо фиксировать и учитывать время добавления токсиканта.

6. При проведении биотестирования на водорослях уместно ориентироваться на концентрацию, а не дозу токсиканта, в то же время следует учитывать возраст культуры, начальную плотность ее клеток и состав сред, поскольку от этих параметров зависит расчетная величина полуэффективной концентрации ($ЭК_{50}$) испытываемых веществ.

7. Впервые установлено, что культура пресноводной микроводоросли *S. quadricauda* может быть рекомендована в качестве тест-организма для оценки токсичности соленых проб при уровнях их минерализации 1–6 г/л, а культура пресноводной микроводоросли *M. arcuatum* может быть предложена для проведения биотестирования только в острых (3 сут) испытаниях на средах с уровнем минерализации 1–4 г/л.

Список публикаций в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В.Ломоносова по специальности 1.5.16. Гидробиология (биологические науки)

1. **Лазарева А.М.**, Рак А.Н., Гершкович Д.М., Ильина О.В., Ипатова В.И. Оценка токсичности микропластика супралиторали Баренцева моря с использованием тест-объектов разных трофических уровней // Биология внутренних вод. – 2024. – № 2. – С. 296–305. — EDN: XTHYHQ. Импакт-фактор 0,822 (РИНЦ). **0,46 из 1,05 п.л.** **Lazareva A.M.**, Rak A.N., Gershkovich D.M., Ilyina O.V., Ipatova V.I. Evaluation of the Toxicity of Microplastics in the Supralittoral of the Barents Sea Using Test Objects of Different Trophic Levels // Inland Water Biology. – 2024. – Vol. 17, № 2. – P. 307–315. — EDN: UQEMNX. Импакт-фактор 0,302 (SJR). **0,42 из 0,96 п.л.** (здесь и далее приведен объем публикации и вклад автора в печатных листах)

2. **Лазарева А.М.**, Рак А.Н., Ипатова В.И., Гершкович Д.М., Ильинский В.В., Ильина О.В., Поярков А.А. Исследование влияния наночастиц пластика на представителей фито- и зоопланктона // Экологические системы и приборы. – 2023. – № 11. – С. 45–56. — EDN: OKGYXQ. Импакт-фактор 0,352 (РИНЦ). **0,65 из 1,27 п.л.**

3. **Лазарева А.М.**, Михайлина М.А., Добровольская К.Э., Петрунина В.С., Прохоров И.А., Мозговая М.А. Зависимость токсичности $K_2Cr_2O_7$ от времени постановки опыта в фитотестировании на *Chlorella vulgaris* // Экологические

системы и приборы. – 2023. – № 5. – С. 3–10. — EDN: TSYMAG. Импакт-фактор 0,352 (РИНЦ). **0,31 из 0,82 п.л.**

4. Лазарева А.М., Ипатова В.И. Влияние фосфора на растительный тест-объект при культивировании на природной воде // Экологические системы и приборы. – 2023. – № 4. – С. 58–66. — EDN: CVSENB. Импакт-фактор 0,352 (РИНЦ). **0,54 из 0,81 п.л.**

5. Ипатова В.И., Лазарева А.М. Концентрация или доза токсиканта в биотестировании с использованием микроводорослей // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. – 2022. – Т. 127, № 5. – С. 54–65. — EDN: FTXLWN. Импакт-фактор 0,505 (РИНЦ). **0,56 из 1,27 п.л.**

6. Лазарева А.М., Ипатова В.И. Время суток как биологически важный фактор при проведении биотестирования // Экологические системы и приборы. – 2022. – № 4. – С. 28–37. — EDN: XOXRPG. Импакт-фактор 0,352 (РИНЦ). **0,76 из 1,07 п.л.**

7. Лазарева А.М., Ипатова В.И., Ильина О.В., Годоренко Д.А., Маторин Д.Н., Байжуманов А.А. Токсическое влияние микропластицик пластика на культуру *Scenedesmus quadricauda*: взаимодействие между микропластициками пластика и водорослью // Вестник Московского университета. Серия 16: Биология. – 2021. – Т. 76, № 4. – С. 225–233. — EDN: RHTHUD. Импакт-фактор 0,318 (РИНЦ). **0,57 из 1,04 п.л.** Lazareva A.M., Ipatova V.I., Il'ina O.V., Todorenko D.A., Matorin D.N., Baizhumanov A.A. Toxic Effects of Microplastics on Culture *Scenedesmus quadricauda*: Interactions between Microplastics and Algae // Moscow University Biological Sciences Bulletin. – 2021. – Vol. 76, № 4. – P. 202–209. — EDN: OJYGHU. Импакт-фактор 0,161 (SJR). **0,50 из 0,92 п.л.**

8. Даллакян Г.А., Ипатова В.И., Михеев И.В., Лазарева А.М., Погосян С.И. Влияние фуллеренов C₆₀ и C₇₀ на развитие и фотосинтез культуры водоросли *Scenedesmus quadricauda* // Теоретическая и прикладная экология. – 2021. – № 3. – С. 193–197. — EDN: GCPPPZ. Импакт-фактор 0,302 (SJR). **0,11 из 0,54 п.л.**

9. Лазарева А.М., Ипатова В.И., Михеев М.А., Конюхов И.В. Особенности токсического действия соли алюминия на разных средах культивирования микроводорослей // Экологические системы и приборы. – 2019. – № 7. – С. 45–53. — EDN: SERGAV. Импакт-фактор 0,352 (РИНЦ). **0,45 из 0,96 п.л.**

Прочие публикации

10. Ильина О.В., Сапожников Ф.В., Ильинский В.В., Коваленко Д.В., Манухова Д.А., Лазарева А.М., Рак А.Н., Поярков А.А. Пластиковое загрязнение гидросферы: судьба пластика в водной среде и его взаимодействие с живыми организмами // Природа. – 2024. – № 7. – С. 50–60. — EDN MFIOHZ. **0,18 из 1,16 п.л.**

11. Лазарева А.М., Ипатова В.И. Влияние плотности лабораторной популяции *Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Vreb. на результаты биотестирования // Бюллетень Главного ботанического сада. – 2021. – № 2. – С. 53–58. — EDN SLCBUZ. **0,42 из 0,69 п.л.**