

На правах рукописи



Буренина Анастасия Анатольевна

**ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РАСТЕНИЙ
НА РАЗНЫХ ЭТАПАХ РАЗВИТИЯ**

03.02.08 – Экология (биология)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Томск – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Научный руководитель: доктор биологических наук, профессор
Астафурова Татьяна Петровна

Официальные оппоненты:

Гусев Александр Анатольевич, доктор биологических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина», Научно-исследовательский институт экологии и биотехнологий, директор

Полонский Вадим Игоревич, доктор биологических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Красноярский государственный аграрный университет», кафедра ландшафтной архитектуры и ботаники, профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Агрофизический научно-исследовательский институт»

Защита состоится 19 марта 2020 года в 10 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.10, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (корпус НИИ ББ, конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ:
<http://www.ams.tsu.ru/TSU/QualificationDep/co-searchers.nsf/newpublicationn/BureninaAA19032020.html>

Автореферат разослан « ____ » января 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат биологических наук



Носков Юрий Александрович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Степень антропогенного воздействия высокодисперсных материалов (ВДМ) на природную среду связана, преимущественно, с интенсивным развитием наноиндустрии. Использование, утилизация и непреднамеренные утечки ВДМ неизбежно приводят к распространению и накоплению наночастиц (НЧ) в воздухе, почве и воде, при этом их воздействие на биологические объекты изучено недостаточно [Viswanath, Kim, 2016]. В последние годы ситуация усугубляется применением нового класса веществ – препаратов сельскохозяйственного назначения, содержащих НЧ. В настоящее время активно изучается возможная опасность применения микроудобрений, гербицидов, стимуляторов роста и т.д., разрабатываемых на основе наноматериалов [Iavicoli et al., 2017].

Большое внимание к воздействию высокодисперсных материалов на растительные объекты связано не только с ростом их производства и применения, но и с накоплением техногенных отходов. Проблема загрязнения окружающей среды отходами металлургии и других производств, содержащих высокодисперсные компоненты, требует разработки современных технологий их утилизации, в том числе с использованием методов биоконверсии.

Таким образом, в настоящее время исследования по экологической аттестации наночастиц, в том числе изучение закономерностей их поступления, распределения и накопления в растениях являются своевременными и актуальными.

Степень разработанности темы исследования. Показано, что наночастицы металлов, также как ионы из НЧ, способны поглощаться растениями и накапливаясь в них, могут попадать в пищевые цепи [Rawat et al., 2018a ; Cota-Ruiz et al., 2018]. Наночастицы оказывают как положительное, так и отрицательное влияние на рост и развитие растений [Reddy et al., 2016]. Известно, что характер взаимодействия между растениями и НЧ зависит от свойств самих наночастиц, включая их химический состав, форму и структуру поверхности [Nel et al., 2006 ; Nel et al., 2009 ; Sharifi et al., 2012]. В последнее время стали появляться сведения о разработке экологически безопасных методов биоконверсии металлургических отходов, содержащих высокодисперсные компоненты [Михайлова и др., 2013 ; Гусев и др., 2014, 2015 ; Захарова, 2017]. Наличие в составе этих отходов НЧ тяжелых металлов существенно изменяет механизмы взаимодействия с растениями и требует специализированных методов анализа как экотоксичности, так и биодоступности высокодисперсных компонентов.

Цель и задачи исследования. Целью исследований являлось выявление особенностей воздействия различных высокодисперсных материалов на морфогенез и функциональную активность растений на разных этапах развития в зависимости от условий их выращивания.

В соответствии с поставленной целью были определены следующие задачи:

1. Изучить степень аккумуляции наночастиц Pt и Ni и особенности морфогенеза пшеницы на ранних этапах развития при культивировании растений в дисперсионной системе и почве;
2. Определить концентрационную зависимость структурно-функциональных параметров проростков пшеницы при воздействии наночастиц Pt и Ni в дисперсионной системе;
3. Оценить влияние наночастиц Pt и Ni на морфофизиологические параметры пшеницы и амаранта в процессе онтогенеза в полевом эксперименте;
4. Выявить воздействие наночастиц Pt и ZnO на рост, развитие, продуктивность и качество плодов растений огурца.
5. Провести оценку экологической безопасности применения высокодисперсных металлосодержащих отходов при культивировании растений огурца.

Научная новизна. В работе впервые показано, что действие низких концентраций (0,01–10 мг/л) НЧ Pt, Ni и ZnO малых размеров (Δ_{50} = 5–20 нм) вызывает существенные изменения структурных и функциональных показателей растений. Выявлено, что в зависимости от среды культивирования наночастицы Pt (Δ_{50} =5 нм) и Ni (Δ_{50} =5 нм) по-разному аккумулировались в органах проростков пшеницы. Представлены новые данные о влиянии НЧ Pt и Ni на морфофизиологические параметры пшеницы и амаранта в процессе онтогенеза в полевых условиях. Впервые обнаружено, что внесение в почву суспензий НЧ ZnO (Δ_{50} =20 нм) в концентрации 10 мг/кг почвы приводит к ускорению роста и развития растений огурца, увеличению урожайности без снижения качества плодов. Обнаружена видоспецифичность в накоплении и воздействии НЧ Pt на структурно-функциональные параметры растений. Так, НЧ Pt стимулировали реакции морфогенеза пшеницы и амаранта и не оказывали воздействие на рост, развитие и продуктивность растений огурца. Впервые отмечены положительные эффекты при выращивании растений огурца на субстрате, содержащем 10 % шлама Череповецкого металлургического комбината. Показано увеличение содержания пигментов, повышение интенсивности фотосинтеза и транспирации. Выявлено различие в накоплении металлов в зависимости от элемента – наибольший коэффициент биологической аккумуляции обнаружен для цинка.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты исследования вносят новые представления об особенностях устойчивости растений при воздействии наночастиц Pt, Ni и ZnO, что может быть использовано для разработки практических рекомендаций по диагностике их влияния на растения. Полученные данные о хроническом, низкодозированном воздействии НЧ в полевых исследованиях могут быть использованы в системе обоснования допустимых уровней загрязнения агроценозов, существенным компонентом которых являются различные высокодисперсные материалы, что может иметь большое значение для решения вопросов продовольственной

безопасности. Ростостимулирующий эффект низких концентраций некоторых наночастиц расширяет показания к их использованию при предпосевной обработке семян и выращивании сельскохозяйственных культур, что может найти применение при разработке новых агротехнических приемов. Полученные результаты могут быть использованы в научных учреждениях и образовательном процессе при подготовке курсов лекций по экологии, сельскохозяйственной биологии и физиологии растений в ВУЗах.

Методология и методы исследования. Методология диссертационного исследования базировалась на общепринятых схемах лабораторных и полевых экспериментов по изучению реакции растений на контаминацию высокодисперсными материалами. Методы исследования включали в себя: оценку характера реакций модельных растений на действие наночастиц металлов по ростовым и весовым показателям в зависимости от среды культивирования, определение токсичности высокодисперсных шламовых отходов с использованием пластиковых планшетов «PHYTOTOXKIT» [Phytotoxkit ..., 2008] при проращивании семян в различных субстратах (водные системы, референтная почва по ISO/ИСО 11268-1); изучение воздействия металлургических отходов на растения в начальные этапы онтогенеза; оценку влияния наночастиц на рост и развитие растений в полевом опыте [Доспехов, 1985].

Работа выполнялась с использованием современных физико-химических методов анализа (спектрофотометрического, оптико-акустического, масс-спектрометрического с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS)), приборов и оборудования. Обработка данных и графические построения проводились с использованием пакетов программ MS Excel 2010 и STATISTICA 8.0.

Положения, выносимые на защиту:

1. Степень аккумуляции высокодисперсных материалов зависит от их свойств и способов внесения, видовых особенностей и фазы развития растений, а также условий их выращивания.

2. Наночастицы Pt, Ni и ZnO малых размеров ($\Delta_{50} = 5\text{--}20$ нм) в диапазоне низких концентраций (0,01–10 мг/л) оказывают различное влияние на морфогенез и функциональную активность растений.

3. Высокодисперсные металлосодержащие отходы (шламы Череповецкого металлургического комбината) в концентрации 10 % на кг почвы не угнетают рост и развитие растений огурца. Накопление металлов в органах растений зависит от свойств элементов, входящих в состав шлама.

Степень достоверности и апробация результатов. Научные положения и выводы данной работы обоснованы и базируются на воспроизводимых экспериментальных данных, степень достоверности которых доказана путем статистической обработки. Материалы и основные положения диссертации были представлены и обсуждены в виде устных, постерных и заочных докладов на конференциях разного уровня: Международной научной конференции «Физиология растений – теоретическая основа инновационных агро- и фитобиотехнологий» (Калининград, 2014 г.), Всероссийской научной конференции «Растения в условиях глобальных и локальных природно-

климатических и антропогенных воздействий» (Петрозаводск, 2015 г.), Всероссийской научной конференции «Сигнальные системы растений: от рецептора до ответной реакции организма» (Санкт-Петербург, 2016 г.), Научной конференции, посвященная 100-летию кафедры физиологии растений и микроорганизмов Пермского государственного национального исследовательского университета «История и методология физиолого-биохимических и почвенных исследований» (Пермь, 2017 г.), Научной конференции «Механизмы устойчивости растений и микроорганизмов к неблагоприятным условиям среды» (Иркутск, 2018 г.), V Международной научно-методологической конференции «Роль физиологии и биохимии в интродукции и селекции сельскохозяйственных растений» (Москва, 2019 г.).

Финансовая поддержка исследования. Основные этапы экспериментов были выполнены в 2011–2018 гг. в лаборатории физиологии и биотехнологии растений Сибирского ботанического сада ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет». Работа выполнена в рамках междисциплинарных комплексных проектов: ФЦП «Развитие инфраструктуры наноиндустрии на 2008–2011 гг.» ГК 16.648.12.3003 «Оценка опасности транслокации наночастиц по пищевым сетям агро- и аквапромышленного производства», ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2013 годы» ГК 14.512.12.0003 «Исследование воздействий высокодисперсных металлургических отходов на морфологические, физиологические и биохимические параметры наземных и водных растений для разработки научных основ создания безопасных технологий их биоконверсии», Государственного задания № 37.901.2014 «Особенности продукционного процесса сельскохозяйственных культур в условиях техногенного загрязнения территорий высокодисперсными материалами» (2014–2016 гг.), Государственного задания № 37.7810.2017 «Структурно-функциональные особенности редких и хозяйственно ценных растений мировой флоры при интродукции в Западной Сибири» (2017–2019 гг.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 8 статей в рецензируемых журналах из Перечня изданий, рекомендованных ВАК для опубликования результатов диссертаций (из них 3 статьи в научных журналах, входящих в базы данных Web of Science и / или Scopus), 7 публикаций в сборниках материалов конференций.

Личный вклад автора. При непосредственном участии автора совместно с научным руководителем была обоснована научная тематика диссертационной работы, определены цель и задачи исследований. Автор лично принимала участие в проведении лабораторных и полевых экспериментов, отборе образцов для исследований, статистической обработке данных, анализе полученных результатов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 176 страницах, состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений, списка литературы, включающего 350 источников (из них 258 на иностранном языке); содержит 18 таблиц и 32 рисунка.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю доктору биологических наук, профессору Т. П. Астафуровой, коллегам и соавторам: кандидату биологических наук Ю. Н. Моргалеву (Центр биотестирования безопасности нанотехнологий и наноматериалов НИ ТГУ), кандидату биологических наук А. П. Зотиковой, кандидату биологических наук С. И. Михайловой, кандидату сельскохозяйственных наук С. А. Сучковой, кандидату биологических наук А. В. Куровскому, сотрудникам лаборатории фотосинтеза НИИ ББ ТГУ – за всестороннюю поддержку и помощь в проведении ряда исследований по теме диссертации. Автор также благодарен сотрудникам Сибирского ботанического сада ТГУ за ценные советы и моральную поддержку.

Основное содержание работы

1 Обзор литературы

В главе дана характеристика высокодисперсных материалов и источников их поступления в окружающую среду, освещается степень изученности воздействия наночастиц металлов и оксидов металлов на растения [Antonoglou et al., 2018 ; Verma et al., 2018], представлены данные по фиторемедиационному потенциалу некоторых растений и их способности накапливать наночастицы металлов или высвобождаемые ионы [Cota-Ruiz et al., 2018], обсуждаются экологически безопасные методы биоконверсии металлургических шламов, содержащих высокодисперсные компоненты [Михайлова и др., 2014 ; Гусев и др., 2015 ; Захарова, 2017].

2 Объекты и методы исследования

Исследования выполнены в период 2011–2018 гг. на базе лаборатории физиологии и биотехнологии растений Сибирского ботанического сада (СибБС) ТГУ. В качестве тестовых организмов были выбраны: пшеница мягкая яровая (*Triticum aestivum* L.) сорт Новосибирская 29; амарант метельчатый (*Amaranthus cruentus* L.) сорт Чергинский; огурец посевной (*Cucumis sativus* L.) сорт Маша.

Наночастицы металлического никеля и платины размером $\Delta_{50}=5$ нм, а также ZnO размером $\Delta_{50}=20$ нм сферической формы были изготовлены в лаборатории новых материалов и перспективных технологий СФТИ ТГУ (г. Томск). Там же были проведены физико-химические исследования образцов доменных шламов из шламонакопителей Череповецкого металлургического комбината (ПАО «Северсталь»). Используемый в эксперименте шлам содержал следующие элементы: железо – от 40 до 55 масс. %, кремний – около 8 масс. %, кальций – более 4 масс. %, цинк – более 4 масс. %, алюминий – более 2 масс. %, сера – более 2 масс. %. Содержание остальных элементов в шламе – менее 1 масс. %. Частицы размером менее 1 мкм присутствовали в шламе в объеме до

1,5 %, а при фракционировании их объём достигал 15 %. Методом электронной микроскопии в пробах обнаружены частицы размером до 50 нм.

Необходимые концентрации дисперсионных систем НЧ Ni, Pt, ZnO и шламовых отходов получали разведением исходных дисперсионных сред и шламов дистиллированной водой и последующей 45-минутной обработкой ультразвуком с частотой 35 кГц в ультразвуковой ванне («Сапфир» 5,7/1 ТТЦ, Россия). Приготовление субстратов для исследований заключалось в смешивании исходного шлама с референтной почвой в соотношении 1:10 (ШИ 10 %).

Лабораторные эксперименты. Для опытных вариантов использовали семена пшеницы и суспензии НЧ Pt ($\Delta_{50}=5$ нм) и Ni ($\Delta_{50}=5$ нм) в концентрации 10 мг/л, либо в интервале концентраций 0,01, 0,1, 1 и 10 мг/л, в контрольном варианте – дистиллированную воду. Растения выращивали в сосудах объемом 500 мл, в водных культурах – на дисперсионной среде, содержащей наночастицы Pt и Ni, в почвенных культурах – в грунте «Гарант» для выращивания рассады, содержащем на 100 г почвы: азота 30–50 мг, фосфора – 70 мг, калия 80–100 мг, pH 6,5.

Оценку экологической безопасности применения высокодисперсных металлосодержащих отходов (ВМО) проводили при культивировании растений огурца в почве следующего состава: 70% песка, 30% торфа, pH среды – 7. Шлам Череповецкого металлургического комбината вносили в сухом виде непосредственно в почву перед посевом семян в концентрации 10 %.

Растения выращивали в климатической камере (Lab-Line, Польша) при 12-часовом фотопериоде, при постоянной температуре 22–23° С и освещенности 150 мкМ/м²с, проростки пшеницы до 10-дневного, а растения огурца – до 24-дневного возраста. Эксперименты были проведены в четырех повторностях.

Оценка острой токсичности ВМО методом фитотестирования в планшетах проводили на семенах огурца по модифицированной методике, основанной на ФР.1.31.2012.11560 [Терехова и др., 2014] и «РНУТОТОХКИТ» [Phytotoxkit ..., 2008], семена проращивали в водных растворах и почве по ISO/ИСО 11268-1. Для каждого параметра при каждой концентрации ВМО вычисляли индекс токсичности.

Опыт в защищенном грунте. Растения огурца выращивали в теплице, расположенной на территории учебно-экспериментального участка СибБС ТГУ (г. Томск). Использовали почвенный грунт следующего состава: дерновая почва, торф, вермикомпост, перегной (1:1:1:1). Перед посевом семян огурца в почвенный грунт опытных вариантов вносили суспензии наночастиц Pt ($\Delta_{50}=5$ нм) или ZnO ($\Delta_{50}=20$ нм) в концентрации 5 мг на 1 кг почвы. Второй раз обрабатывали почву суспензией наночастиц в той же концентрации через 45 дней после посева семян. Площадь делянок 1 м², каждый вариант опыта заложен в четырех повторностях. Урожайность плодов огурца в опыте оценивали через каждые 10 дней.

Полевой опыт по выращиванию сельскохозяйственных культур был заложен в коллекционном питомнике лаборатории сельскохозяйственных растений Учебно-экспериментального участка СибБС ТГУ (г. Томск),

исследования проводились согласно методикам Б.А. Доспехова [1985]. Для каждой культуры были заложены делянки площадью 2 м² в 4-х кратной повторности. Перед посевом семена контрольных растений замачивали в дистиллированной воде в течение 12 часов, а опытных – в суспензиях наночастиц Pt ($\Delta_{50}=5$ нм) и Ni ($\Delta_{50}=5$ нм) в концентрации 5 мг/л. Опрыскивание и полив растений суспензиями наночастиц проводились в сухую погоду в первой половине дня, контрольные растения обрабатывались дистиллированной водой. Фенологические наблюдения за растениями проводили с периодичностью 1 раз в 7–10 дней [Бейдеман, 1974].

Физиолого-биохимические исследования. Чистую продуктивность фотосинтеза рассчитывали по формуле Кидда, Веста и Брикса [Гродзинский, Гродзинский, 1973]. Содержание фотосинтетических пигментов определяли спектрофотометрическим методом по величине оптической плотности при 665, 649 и 440 нм в 96 % этаноле [Шлык А.А., 1971]. Количество амарантина определяли при длине волны 537 нм [Кононков П.Ф. и др., 2008]. Сумму хлорофиллов и флавоноиды определяли методом фотометрической экспресс-диагностики с использованием флавоноид- и хлорофиллометра Dualex 4 (Forse-A, Франция). Интенсивность фотосинтеза и транспирации измеряли с помощью портативного инфракрасного газоанализатора Li-6400, LI-COR (USA) с открытой системой.

Оценка качества и питательной ценности полученного урожая огурца проводилась на базе ФГБУ «Станция агрохимической службы «Томская» в лаборатории анализа кормов, растениеводческой и пищевой продукции (аттестат аккредитации № RA.RU.21ПЯ58 от 04.08.2016 г.).

Количественный анализ поступления и распределения металлов в растениях был выполнен с использованием метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на базе ООО «Химико-аналитический центр «Плазма», г. Томск (аттестат аккредитации № RA.RU.516895 от 05.05.2016 г.). Корни растений перед анализом промывали 0,01 % раствором Na-ЭДТА, затем дистиллированной водой для удаления частиц, сорбированных на поверхности.

Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась с помощью программ Microsoft Office Excel 2013 и Statistica 8.0. По морфологическим параметрам каждая исследуемая выборка сформирована из 25–40 наблюдений, по физиолого-биохимическим – из 8–10 наблюдений. Проверка всех исследуемых совокупностей на нормальность распределения по критериям Шапиро-Уилка и W/S-тесту во всех случаях позволила принять нулевую гипотезу о нормальном распределении данных в выборках. Исходя из этого для анализа данных применялись методы параметрической статистики. В работе использованы следующие статистические методы: вычисление описательных статистик; сравнение двух средних арифметических с использованием t-критерия Стьюдента для независимых выборок; однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) [Рокицкий, 1973]. Во всех таблицах и рисунках данные представлены в виде средних арифметических и их стандартных ошибок. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

3 Воздействие наночастиц Pt и Ni на растения пшеницы (*Triticum aestivum* L.) и амаранта (*Amaranthus cruentus* L.)

3.1 Влияние наночастиц Pt и Ni на морфофизиологические параметры проростков пшеницы

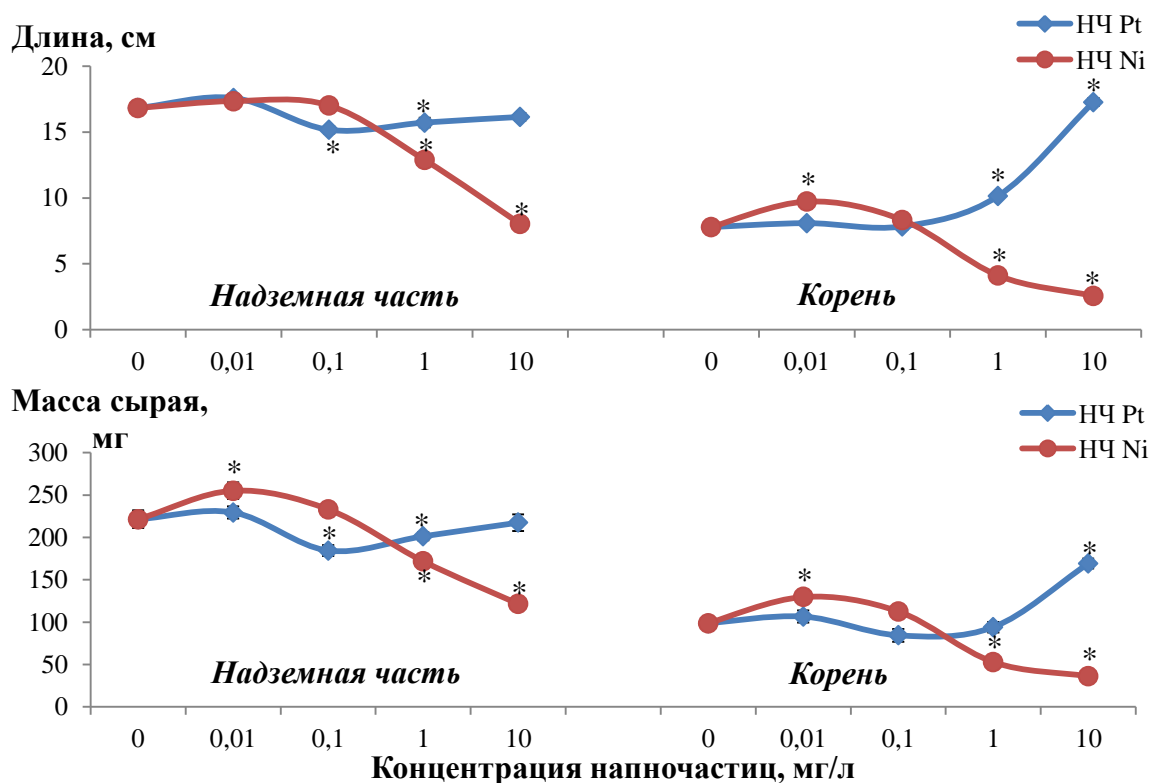
Были изучены особенности накопления и распределения НЧ Pt ($\Delta_{50} = 5$ нм) и Ni ($\Delta_{50} = 5$ нм) по органам растений пшеницы после 10-суточного культивирования их в дисперсионной системе (ДС) и в почвенном субстрате. Показано, что в водной и почвенной культурах пшеницы корни в большей степени аккумулировали металлы, чем листья и стебель, корневая система поглощала никель в 9–11 раз активнее, чем платину, а в надземной части проростков никеля было в 22–30 раз больше, чем платины. Процессы поглощения и последующего накопления НЧ Pt и Ni растениями протекали наиболее интенсивно из ДС, чем из почвы (таблица 1). Это согласуется с литературными данными о том, что абсорбция наночастиц зависит от субстрата выращивания растений [Моргалев и др., 2010 в ; Schwab et al., 2015 ; Dev et al., 2017].

Таблица 1 – Содержание платины и никеля в 10-дневных проростках пшеницы

Вид наночастиц	Вариант опыта	Содержание металлов, мг/кг сырой массы			
		Водные культуры		Почвенные культуры	
		Корни	Надземная часть	Корни	Надземная часть
НЧ Pt	Контроль	0,0012	<0,0001	0,0016	<0,0001
	Опыт	4,73 ± 0,19*	0,48 ± 0,08*	0,82 ± 1,16*	0,09 ± 0,002*
НЧ Ni	Контроль	3,98 ± 0,15	0,63 ± 0,025	3,06 ± 0,13	0,51 ± 0,01
	Опыт	50,89 ± 1,67*	14,20 ± 2,38*	7,13 ± 0,54*	1,95 ± 0,12*
Примечание – знаком * отмечены достоверные различия между контролем и опытом при $p < 0,05$. Водные культуры – проростки культивировали на ДС, содержащей НЧ Pt и Ni в концентрации 10 мг/л. Почвенные культуры – проростки культивировали в почвенном субстрате при поливе ДС, содержащей НЧ Pt и Ni в концентрации 10 мг/л.					

При изучении концентрационной зависимости воздействия НЧ Pt и Ni на морфометрические и физиолого-биохимические параметры проростков пшеницы при культивировании их на ДС показано, что с повышением концентрации НЧ Pt у растений отмечено стимулирование ростовых процессов в корневой системе, а НЧ Ni в концентрациях 1 и 10 мг/л значительно угнетали рост корней и надземной части (рисунок 1).

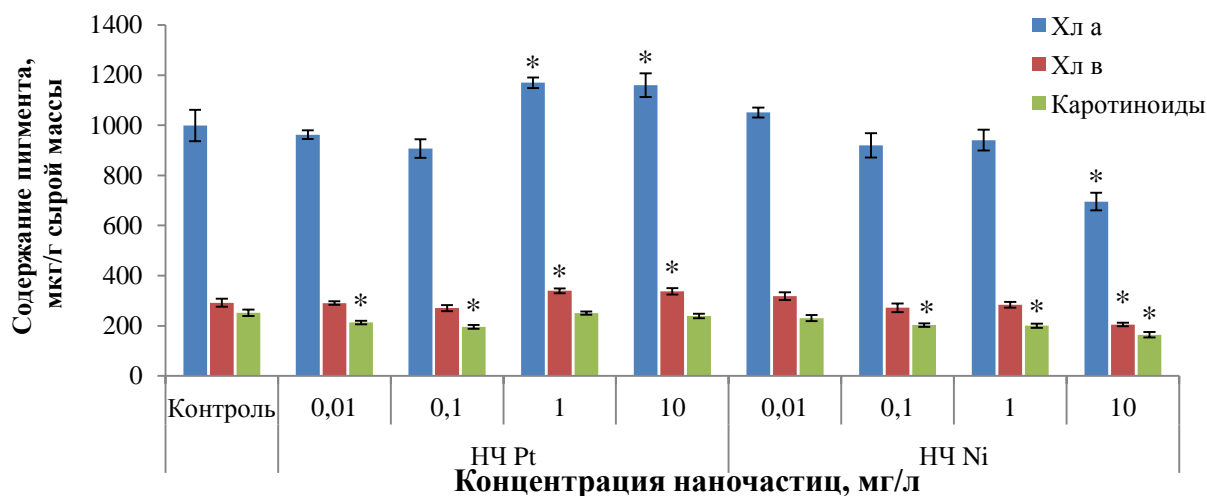
При воздействии НЧ Pt низких концентраций (0,01 и 0,1 мг/л) содержание хлорофиллов (Хл) *a* и *b* в листьях пшеницы не изменялось, однако снижалось количество каротиноидов. При более высоких концентрациях НЧ Pt (1 и 10 мг/л) содержание Хл *a* и *b* увеличивалось на 14–17 % при сохранении оптимального уровня каротиноидов (рисунок 2).



* – достоверные отличия между контролем и опытом при $p < 0,05$

Рисунок 1 – Морфометрические параметры 10-дневных проростков пшеницы при культивировании на ДС, содержащей НЧ Pt и Ni различной концентрации

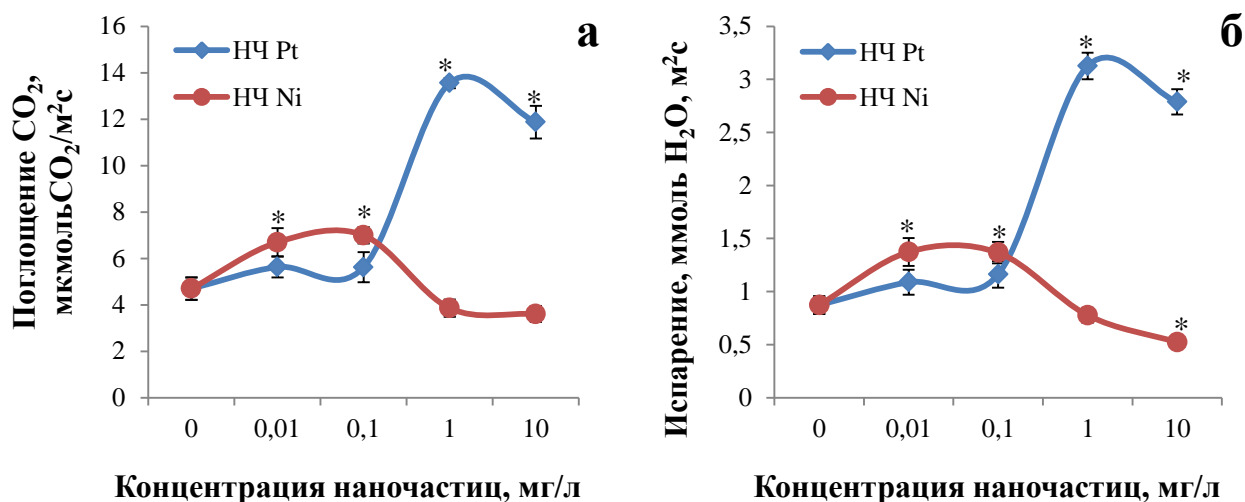
С повышением концентрации НЧ Ni наблюдался тренд снижения хлорофиллов. Каротиноиды показали большую чувствительность к воздействию НЧ Ni по сравнению с хлорофиллами – при концентрациях НЧ Ni 0,1 и 1 мг/л их количество снижалось на 19–20 %, при 10 мг/л – на 35 %, что может быть связано с их окислительной деструкцией [Edge et al., 1997].



* – достоверные отличия между контролем и опытом при $p < 0,05$

Рисунок 2 – Зависимость содержания хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов в листьях пшеницы от концентрации НЧ Pt и Ni в ДС [Буренина и др., 2016]

Показано, что НЧ Pt способствовали повышению интенсивности фотосинтеза, наиболее эффективна была концентрация 1 мг/л (рисунок 3 а). При воздействии НЧ Ni низких концентраций (0,01 и 0,1 мг/л) достоверно повышалась интенсивность фотосинтеза, а НЧ в концентрациях 1 и 10 мг/л не влияли на данный параметр. Похожая закономерность обнаружена и при исследовании интенсивности транспирации (рисунок 3 б).



* – достоверные различия между контролем и опытом при $p < 0,05$
 а – интенсивность фотосинтеза; б – интенсивность транспирации
 Рисунок 3 – Зависимость интенсивности фотосинтеза и транспирации от концентрации НЧ Pt и Ni в ДС [Буренина и др., 2017]

Таким образом, НЧ Pt малых концентраций (0,01 и 0,1 мг/л) не изменяли или снижали параметры проростков пшеницы, под влиянием более высоких концентраций (1 и 10 мг/л) наблюдали, в основном, стимулирующие эффекты. Под воздействием НЧ Ni для большинства изученных показателей наблюдалась сходная концентрационная зависимость: увеличение на малых и отчетливое снижение при более высоких концентрациях наночастиц.

3.2 Воздействие наночастиц Pt и Ni на морфофизиологические параметры пшеницы и амаранта в полевом опыте

Показано, что суспензии НЧ Pt ($\Delta_{50} = 5$ нм) и Ni ($\Delta_{50} = 5$ нм) в концентрации 5 мг/л, используемые для обработки растений (замачивание семян, неоднократный полив и опрыскивание растений), оказывали влияние на рост, развитие и метаболизм пшеницы и амаранта. Воздействие НЧ Pt на данные процессы было, в основном, положительным, а НЧ Ni – неоднозначным. Характер изменений морфометрических параметров был видоспецифичен и зависел от фазы развития растений – у пшеницы отличия наиболее сильно проявились в фазу плодоношения, у амаранта – в фазу цветения.

Под влиянием НЧ Pt увеличались весовые параметры зерновой продуктивности пшеницы: масса зерен в колосе, масса колоса, масса 1000 штук

семян, а также урожайность зерна, которая превысила контроль на 34,8 %. Под воздействием НЧ Ni наблюдалась тенденция к уменьшению основных показателей структуры урожая пшеницы (таблица 2).

Таблица 2 – Влияние наночастиц Pt и Ni на структуру урожая пшеницы

Параметры	Контроль	НЧ Pt	НЧ Ni
Высота растений, см	99,53 ± 1,32	91,18 ± 0,92*	90,07 ± 1,05*
Количество побегов, шт./м ²	287,56 ± 13,54	291,24 ± 19,17	277,71 ± 21,82
Длина колоса, см	8,38 ± 0,13	8,69 ± 0,17	8,82 ± 0,65
Масса колоса, см	1,63 ± 0,12	2,08 ± 0,16*	1,73 ± 0,21
Количество зерен в колосе, шт.	28,42 ± 1,92	34,81 ± 1,63*	25,54 ± 1,98
Масса зерен в колосе, г	1,18 ± 0,09	1,68 ± 0,13*	1,12 ± 0,10
Масса 1000 шт. семян, г	41,52 ± 1,25	48,26 ± 2,11*	43,93 ± 1,98
Урожайность зерна, г/м ²	359,14 ± 29,18	484,28 ± 31,65*	311,03 ± 26,39
Примечание – знаком * отмечены достоверные различия между контролем и опытом при p<0,05			

Наиболее значимыми для урожайности амаранта являются листья главного побега, так как они служат основными фотосинтезирующими органами, накопителями белка и биологически активных веществ. В варианте с НЧ Pt масса листьев превышала контрольные значения на 36,5 %, в варианте с НЧ Ni этот показатель не отличался от контроля (таблица 3).

Таблица 3 – Влияние наночастиц Pt и Ni на структуру урожая амаранта

Параметры	Контроль	НЧ Pt	НЧ Ni
Высота растений, см	157,89 ± 3,42	166,44 ± 4,03*	138,44 ± 2,14*
Количество листьев	19,78 ± 0,98	23,33 ± 0,82*	18,67 ± 0,41
Площадь листьев, см ²	1204,55 ± 152,30	1667,41 ± 151,41*	1142,25 ± 51,05
Биомасса растения, г	235,73 ± 28,60	324,91 ± 31,84*	209,87 ± 11,33
Масса листьев, г	44,26 ± 5,60	60,44 ± 5,90*	41,97 ± 1,88
Примечание – знаком * отмечены достоверные различия между контролем и опытом при p<0,05			

Аккумуляция металлов растениями, выращенными в полевых условиях, была ниже, чем в контролируемых лабораторных экспериментах. Никеля накапливалось в листьях пшеницы в 1,5 раза, а в корнях в 137 раз больше, чем платины, а его содержание в листьях и зерне было в 2–2,2 раза выше контроля (таблица 4). Платина накапливалась, в основном, в листьях пшеницы, а в зерне не была обнаружена. Амарант накапливал никеля почти в два раза больше, чем платины, а содержание никеля в листьях было в 1,9 раз больше, чем в контроле.

Таким образом, выявлена видоспецифичность в накоплении наночастиц – амарант накапливал платину и никель в листьях в 1,5–1,8 раз активнее, чем пшеница. Полученные данные по аккумуляции наночастиц растениями

амаранта позволяют рекомендовать эту культуру для фиторемедиации техногенно-загрязненных территорий.

Таблица 4 – Накопление наночастиц платины и никеля в органах растений пшеницы и амаранта, выращенных в полевых условиях

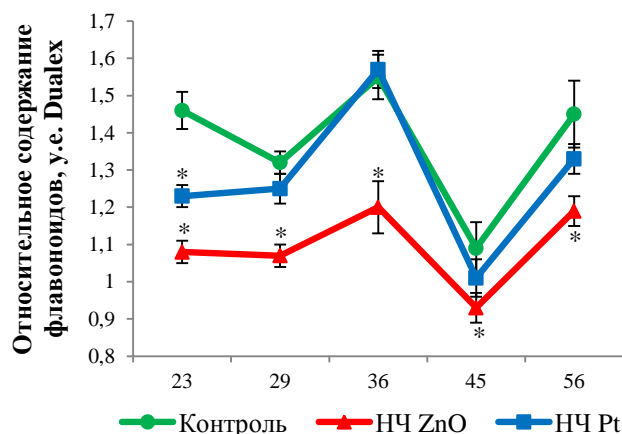
Варианты опыта	Содержание металла, мкг/г сухой массы		
	Корни	Листья	Зерно
Пшеница	<i>Платина</i>		
	Контроль	<0,0001	<0,0001
	НЧ Pt	$0,0078 \pm 0,001^*$	$0,197 \pm 0,030^*$
	<i>Никель</i>		
	Контроль	$0,93 \pm 0,13$	$0,145 \pm 0,022$
Амарант	НЧ Ni	$1,07 \pm 0,16$	$0,245 \pm 0,034^*$
	<i>Платина</i>		
	Контроль	–	<0,0001
	НЧ Pt	–	$0,299 \pm 0,050^*$
	<i>Никель</i>		
	Контроль	–	$0,270 \pm 0,073$
	НЧ Ni	–	$0,525 \pm 0,088^*$

Примечание – знаком * отмечены достоверные различия между контролем и опытом при $p < 0,05$

4 Выявление воздействия наночастиц Pt и ZnO на структурно-функциональные параметры *Cucumis sativus* L.

Показано, что внесение в почву НЧ ZnO ($\Delta_{50}=20$ нм) в концентрации 10 мг/кг почвы привело к ускорению роста и развития растений огурца. Стимулирующее влияние НЧ Pt ($\Delta_{50}=5$ нм) в той же концентрации на морфометрические параметры огурца оказалось менее выражено.

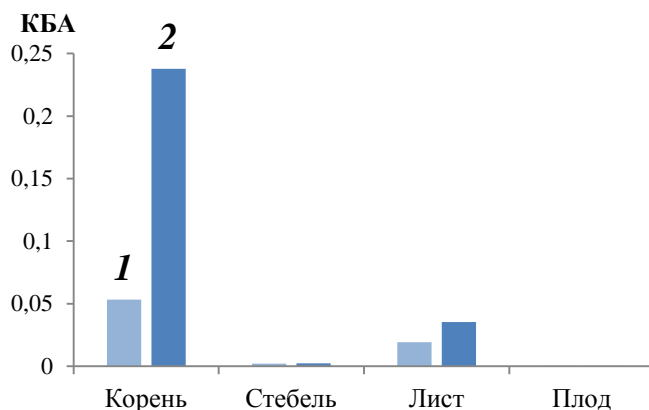
Было обнаружено, что почвенное внесение НЧ ZnO практически не оказывало влияния на содержание хлорофилла в листьях, но вызвало изменения содержания флавоноидов – во все сроки анализа их количество снижалось в опытном варианте на 15–27 % по сравнению с контролем (рисунок 4).



* – достоверные различия между контролем и опытом при $p < 0,05$;
 а – сумма хлорофиллов;
 б – флавоноиды

Рисунок 4 – Влияние почвенного внесения НЧ Pt и ZnO на содержание хлорофиллов и флавоноиды в листьях огурца

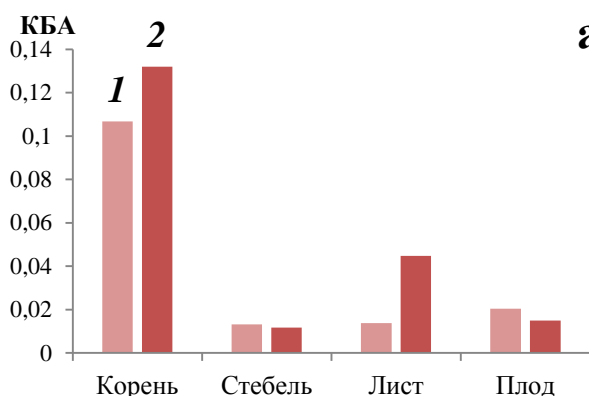
Для сравнения способности растений накапливать компоненты из почвенных субстратов и распределения их по тканям использовали коэффициент биологической аккумуляции (КБА). Показано, что концентрация Pt и Zn в тканях уменьшались по следующей схеме: корень > лист > стебель > плоды. Накопление НЧ Pt возрастало с увеличением времени выращивания растений – в фазе плодоношения платина поглощалась из почвы в 3 раза интенсивнее, чем в начале вегетации (рисунок 5).



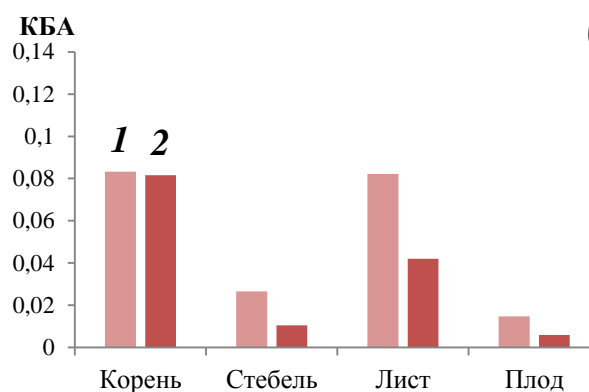
1 – 29-дневные растения;
2 – 56-дневные растения

Рисунок 5 – Влияние наночастиц Pt на КБА огурца

Наибольшее накопление Zn в растениях огурца отмечено в корне и листьях, причем аккумуляция цинка в варианте с наночастицами происходила медленнее, чем из почвы в контрольном варианте (рисунок 6 а, б). Результаты анализа показали, что количество цинка в плодах при воздействии НЧ ZnO не отличалось от контроля, а в опыте с НЧ Pt платина в плодах не обнаружена.



а



б

а – контроль; б – вариант опыта с внесением НЧ ZnO;

1 – 29-дневные растения; 2 – 56-дневные растения

Рисунок 6 – Влияние наночастиц ZnO на КБА огурца

Общая урожайность огурца в варианте с НЧ ZnO составила $1296,2 \pm 46,3$ г/растение и превышала контрольный вариант на 36 %. Воздействие НЧ Pt вызвало снижение урожайности на 12 % относительно контроля. Исследование массовой доли сухих веществ, растворимых углеводов, содержания нитратов и каротина, а также микроэлементов показало, что качество плодов при обработке почвы НЧ ZnO не ухудшилось и не привело к накоплению цинка в плодах [Astafurova et al., 2017].

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности применения суспензий НЧ ZnO малых размеров и низких концентраций (до 10 мг/кг почвы) в качестве микроудобрения при выращивании растений огурца.

5 Оценка экологической безопасности применения высокодисперсных металлосодержащих отходов при культивировании растений огурца

Для определения токсического эффекта, вызванного наличием в металлургических отходах наночастиц металлов, рассчитывали индекс токсичности для исследуемых параметров и сред культивирования. Обнаружено преимущественно стимулирующее действие высокодисперсных металлургических отходов в концентрации 10 % на ростовые и весовые параметры проростков (рисунок 7). При культивировании растений на водной среде обнаружено больше отрицательных эффектов по сравнению с почвенными культурами.

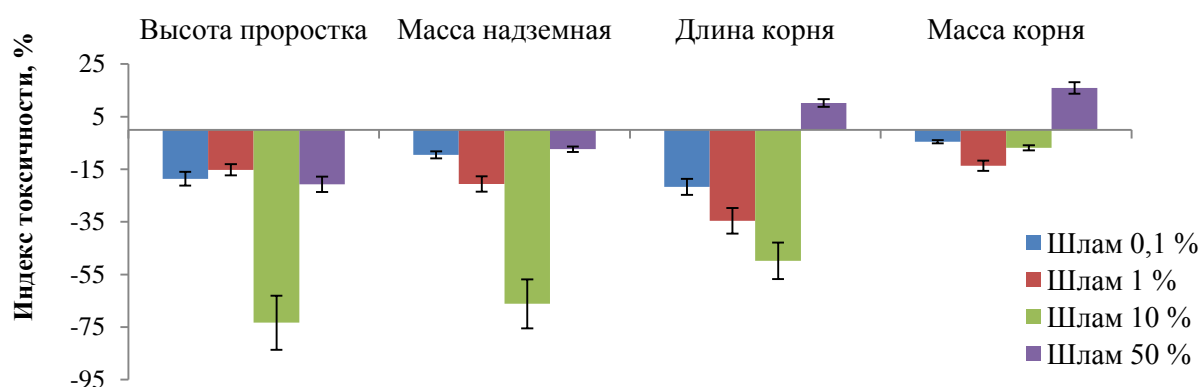


Рисунок 7 – Индексы токсичности тестируемых концентраций ВМО по изменению морфометрических параметров растений огурца, культивируемого на почве

Проводились наблюдения за ростом и развитием растений огурца при выращивании в сосудах в почвенной культуре с добавлением шлама. Показано, что под воздействием шлама 10 % у растений огурца в 25-дневном возрасте масса листьев была на 37 % больше контроля, но общая надземная масса достоверно не увеличивалась (таблица 5).

Таблица 5 – Морфометрические показатели 25-дневных растений огурца, выращенных на почвенном субстрате, содержащем шлама 10 %

Варианты опыта	Масса надземных органов, г/растение			Площадь ассимилирующей поверхности, см ²
	Общая масса	Листья	Стебли	
Контроль	3,15 ± 0,21	1,23 ± 0,10	1,93 ± 0,31	19,49 ± 0,85
Шлам 10 %	3,58 ± 0,29	1,68 ± 0,15*	1,92 ± 0,16	19,60 ± 1,12

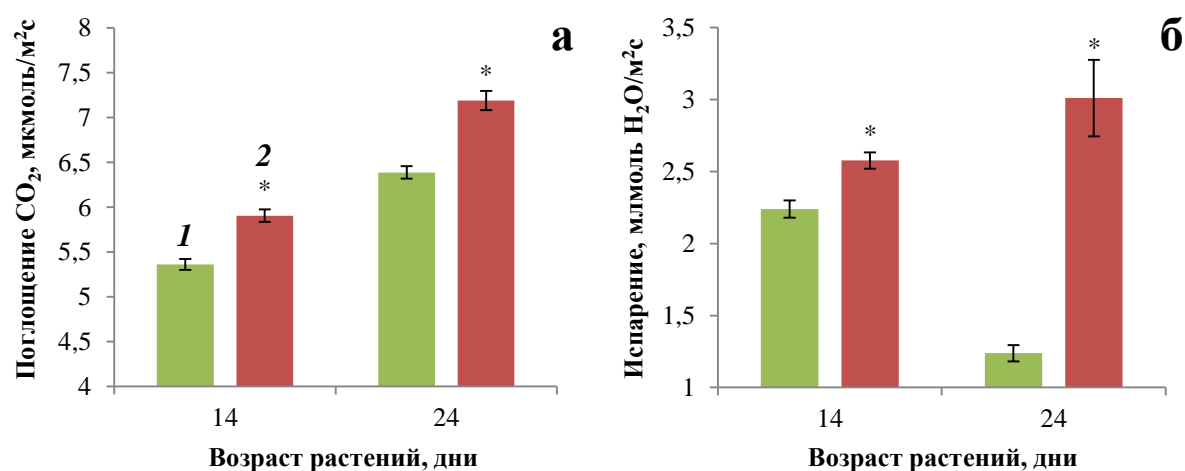
Примечание – знаком * отмечены достоверные различия между контролем и опытом при p<0,05

Под воздействием шлама 10 % в листьях 25-дневных растений огурца происходило значительное увеличение содержания фотосинтетических пигментов – уровень Хл *a* возрос на 41 %, а Хл *b* на 56 % относительно контроля (таблица 6). Подобный эффект увеличения содержания пигментов, возможно, вызван большим количеством железа, входящим в состав шлама [Лебедев и др., 2014]. Анализ содержания уровня каротиноидов показал увеличение их количества на 32 % по сравнению с контролем, что может свидетельствовать о первичной неспецифической реакции растений на стресс [Кузнецов, Дмитриева, 2016].

Таблица 6 – Содержание фотосинтетических пигментов в листьях 25-дневных растений огурца под влиянием шлама 10 %

Показатели	Контроль	Шлам 10 %
Хлорофилл <i>a</i> , мкг/г сырой массы	1359 ± 18	1911 ± 30*
Хлорофилл <i>b</i> , мкг/г сырой массы	441 ± 3	640 ± 16*
Каротиноиды, мкг/г сырой массы	393 ± 3	519 ± 7*
Хл <i>a</i> + хл <i>b</i> , мкг/г сырой массы	1800 ± 21	2536 ± 69*
Хл <i>a</i> / хл <i>b</i>	3,06 ± 0,03	3,09 ± 0,04
(Хл <i>a</i> + хл <i>b</i>) / каротиноиды	4,64 ± 0,05	4,76 ± 0,13
Хл <i>a</i> / каротиноиды	3,46 ± 0,01	3,68 ± 0,03*
Примечание – знаком * обозначены достоверные различия между контролем и опытом при $p < 0,05$		

Исследование газообмена показало, что под воздействием шлама 10 % у листьев огурца наблюдалось увеличение интенсивности фотосинтеза во все сроки измерений (рисунок 8 а). При исследовании интенсивности транспирации обнаружена та же закономерность (рисунок 8 б).



1 – контроль; 2 – вариант опыта с внесением шлама в концентрации 10 %;

* – достоверные различия между контролем и опытом при $p < 0,05$;

a – интенсивность фотосинтеза; *б* – интенсивность транспирации

Рисунок 8 – Интенсивность фотосинтеза и транспирации в листьях 14 и 24-дневных растений огурца при выращивании в почве, содержащей шлама 10 %

Сопоставление результатов анализа по количественному определению элементов Fe, Zn и Pb, входящих в состав металлургических шламов и поглощаемых растениями огурца в разные сроки выращивания показало, что концентрация металлов в тканях растений уменьшалась, преимущественно, по следующей схеме: корень > лист > стебель. Отмечено возрастание накопления компонентов шламов с увеличением времени выращивания растений. Выявлено различие в аккумуляции металлов – наибольший КБА показан для цинка (рисунок 9). Выявлены эффекты специфичности в содержании элементов железа, цинка, свинца, их накоплении и локализации по тканям и органам растений. Обнаружено превышение ПДК свинца в корне и листьях опытного (Шлам 10 %) варианта.

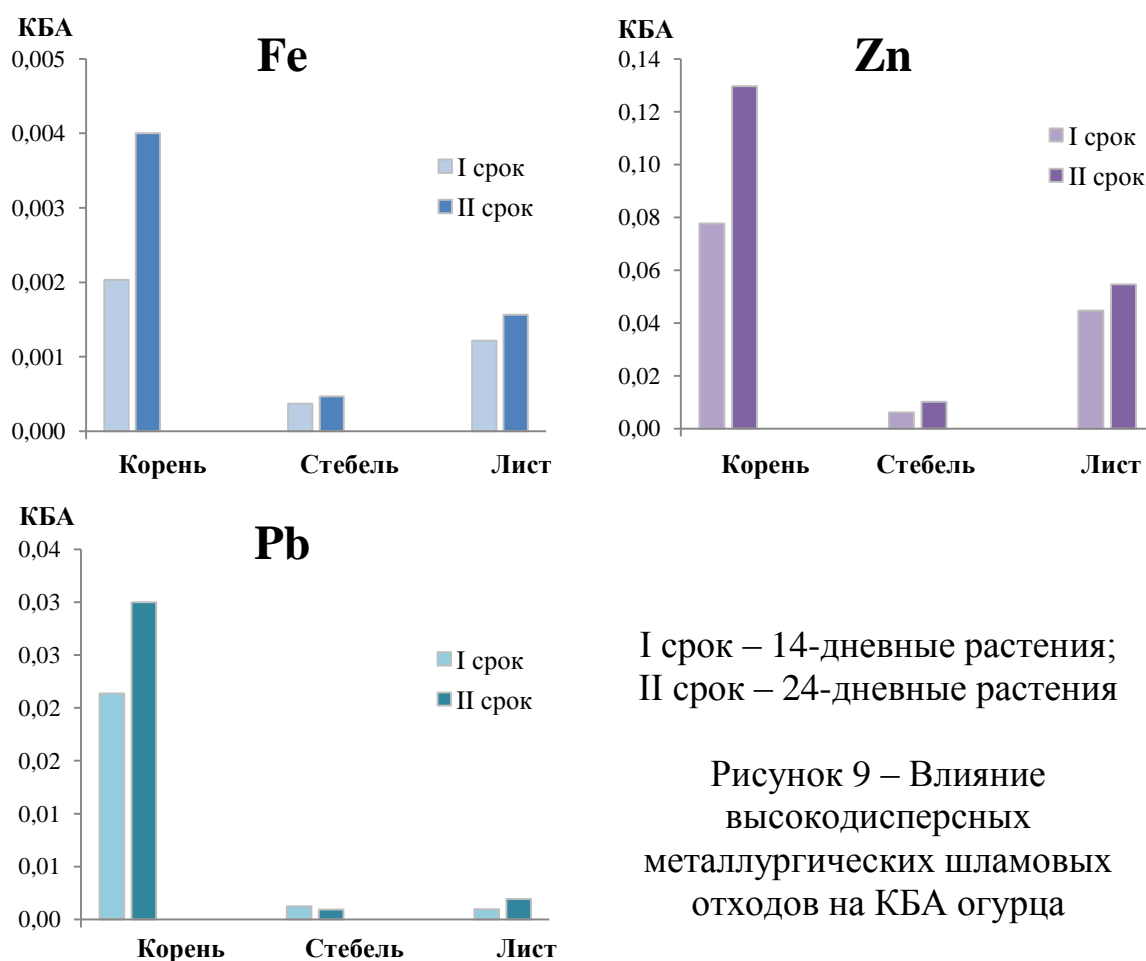


Рисунок 9 – Влияние высокодисперсных металлургических шламовых отходов на КБА огурца

Таким образом, можно предположить, что растения огурца, культивируемые до 25-дневного возраста в лабораторных условиях на субстрате, содержащем 10 % шлама не испытывали чрезмерной нагрузки на изученные показатели. Полученные данные по поглощению растениями элементов Fe, Zn и Pb, входящих в состав металлургических шламов, указывают на необходимость контроля степени аккумуляции металлов в растениях, культивируемых в почве с добавлением высокодисперсных металлосодержащих отходов.

Заключение

В результате поведенных исследований были сделаны следующие выводы:

1. Показано, что накопление наночастиц Pt ($\Delta_{50}=5$ нм) и Ni ($\Delta_{50}=5$ нм) в органах 10-ти дневных растений пшеницы протекало наиболее интенсивно из дисперсионной среды, чем из почвы, корень накапливал металлы в 3–10 раз больше по сравнению с надземной частью. Корневая система проростков поглощала никель в 9–11 раз активнее, чем платину.

2. Аккумуляированные металлы оказывали влияние на морфометрические параметры проростков пшеницы. Под воздействием НЧ Pt при культивировании растений на дисперсионной среде увеличивалась длина и масса корней, при этом параметры надземной части не изменялись, а на почвенном субстрате не наблюдалось изменений ни ростовых, ни весовых параметров проростков пшеницы. Воздействие НЧ Ni вызывало угнетение роста проростков на дисперсионной среде, а в почве не оказало влияния на длину корней и надземной части, но способствовало уменьшению их массы.

3. Обнаружено, что НЧ Pt малых концентраций (0,01 и 0,1 мг/л) не изменяли или снижали структурно-функциональные параметры проростков пшеницы (морфометрические параметры, интенсивность фотосинтеза и транспирации, накопление фотосинтетических пигментов), под влиянием более высоких концентраций НЧ Pt (1 и 10 мг/л) наблюдали преимущественно стимулирующие эффекты. Под воздействием НЧ Ni показатели проростков пшеницы увеличивались при малых концентрациях и снижались при более высоких.

4. Показано, что неоднократные обработки суспензиями наночастиц Pt ($\Delta_{50}=5$ нм) и Ni ($\Delta_{50}=5$ нм) в концентрации 5 мг/л оказывали влияние на рост, развитие и метаболизм пшеницы и амаранта. Характер изменений этих параметров был видоспецифичен и зависел от фазы развития растений. У пшеницы отличия наиболее сильно проявлялись в период формирования генеративных органов, у амаранта – в фазу цветения. Отмечено стимулирующее влияние НЧ Pt на урожайность пшеницы и амаранта.

5. Аккумуляция металлов под влиянием наночастиц Pt и Ni растениями, выращенными в полевых условиях, была ниже, чем в контролируемых лабораторных экспериментах. Обнаружена видоспецифичность в накоплении наночастиц – амарант накапливал платину и никель в листьях в 1,5–2 раза активнее, чем пшеница.

6. Установлено, что внесение в почву НЧ ZnO ($\Delta_{50}=20$ нм) в концентрации 10 мг/кг почвы привело к ускорению роста и развития растений огурца и увеличению урожайности на 36 % по сравнению с контролем, при этом качество плодов не снижалось. Воздействие НЧ Pt ($\Delta_{50}=5$ нм) оказало меньшее влияние на морфологические и физиолого-биохимические параметры огурца.

7. Определена концентрация аккумуляированных металлов в органах растений огурца, которая уменьшалась по схеме: корень > лист > стебель >

плоды. Накопление платины возрастало с увеличением времени выращивания растений огурца, а в фазу плодоношения было максимальным – в 3 раза выше, чем у молодых растений. Количество цинка в плодах при воздействии наночастиц ZnO не отличалось от контроля, платина в плодах не была обнаружена.

8. Выявлено преимущественно стимулирующее действие металлургического шлама в концентрации 10 % на ростовые и весовые параметры проростков огурца. При культивировании растений огурца в лабораторных условиях до 25-дневного возраста на субстрате, содержащем шлам, отмечены положительные эффекты в накоплении пигментов, интенсивности фотосинтеза и транспирации.

9. Показано, что концентрация железа, цинка и свинца, входящих в состав металлургических шламов и поглощаемых растениями огурца в разные сроки выращивания уменьшалась по схеме: корень > лист > стебель. Накопление компонентов шламов возрастало с увеличением времени выращивания растений. Выявлено различие в аккумуляции металлов – наиболее активно поглощался цинк.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Астафурова Т. П. Влияние наночастиц диоксида титана и оксида алюминия на морфофизиологические параметры растений / Т. П. Астафурова, Ю. Н. Моргалев, А. П. Зотикова, Г. С. Верхотурова, С. И. Михайлова, **А. А. Буренина**, Т. А. Зайцева, В. М. Постовалова, Л. К. Цыцарева, Г. В. Боровикова // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2011. – № 1 (13). – С. 113–122. – 0,65 / 0,09 а.л.

2. Михайлова С. И. Морфо-физиологические особенности видов рода *Amaranthus* L. в условиях Томской области / С. И. Михайлова, С. А. Войцекоская, Т. П. Астафурова, **А. А. Буренина** // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2012. – № 4 (227). – С. 55–61. – 0,39 / 0,08 а.л.

3. Михайлова С. И. Оценка сортов амаранта в Томской области / С. И. Михайлова, **А. А. Буренина**, Т. П. Астафурова // Кормопроизводство. – 2013. – № 4. – С. 26–27. – 0,24 / 0,09 а.л.

4. Михайлова С. И. Влияние наночастиц платины и никеля на урожайность кормовых культур / С. И. Михайлова, Т. П. Астафурова, **А. А. Буренина**, Ю. Н. Моргалев, А. П. Зотикова, Т. Г. Моргалева // Кормопроизводство. – 2013. – № 7. – С. 13–15. – 0,27 / 0,08 а.л.

5. Зибарева Л. Н. Исследование воздействий высокодисперсных металлургических отходов на содержание пролина в листьях сельскохозяйственных растений [Электронный ресурс] / Л. Н. Зибарева, О. В. Жилина, **А. А. Буренина**, Ю. Н. Моргалев // Современные проблемы

науки и образования. – 2013. – № 4. – 8 с. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=9675> (дата обращения: 23.12.2019). – 0,28 / 0,04 а.л.

6. Kurovsky A. V. Amaranth Nutritional Properties Assessment Based on Potassium and Nitrate Concentration in Tissues / A. V. Kurovsky, **A. A. Burenina**, S. I. Mikhailova, K. A. Petrochenko, T. P. Astafurova // Biosciences biotechnology research Asia. – 2015. – Vol. 12, is. 3. – P. 2161–2166. – DOI: 10.13005/bbra/1887. – 0,38 / 0,09 а.л. (*Scopus*).

7. Astafurova T. P. Influence of ZnO and Pt Nanoparticles on Cucumber Yielding Capacity and Fruit Quality / T. P. Astafurova, **A. A. Burenina**, S. A. Suchkova, A. P. Zotikova, S. P. Kulizhskiy, Y. N. Morgalev // Nano Hybrids and Composites. – 2017. – Vol. 13. – P. 142–148. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/NHC.13.142. – 0,48 / 0,26 а.л. (*Web of Science*).

8. Зотикова А. П. Морфофизиологические особенности проростков пшеницы (*Triticum aestivum* L.) при воздействии наночастиц никеля / А. П. Зотикова, Т. П. Астафурова, **A. A. Буренина**, С. А. Сучкова, Ю. Н. Моргалев // Сельскохозяйственная биология. – 2018. – Т. 53, № 3. – С. 578–586. – DOI: 10.15389/agrobiology.2018.3.578rus. – 0,83 / 0,37 а.л.

Scopus:

Zotikova A. P. Morphophysiological features of wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings upon exposure to nickel nanoparticles / A. P. Zotikova, T. P. Astafurova, **A. A. Burenina**, S. A. Suchkova, Yu. N. Morgalev // Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya. – 2018. – Vol. 53, is. 3. – P. 578–586. – DOI: 10.15389/agrobiology.2018.3.578eng.

Публикации в прочих научных изданиях:

9. Михайлова С. И. Влияние высокодисперсных шламов черной металлургии на *Avena sativa* L. / С. И. Михайлова, Т. П. Астафурова, **A. A. Буренина**, А. П. Зотикова, Ю. Н. Моргалев // Физиология растений – теоретическая основа инновационных агро- и фитобиотехнологий : материалы международной научной конференции и школы молодых ученых. Калининград, 19–25 мая 2014 г. – Калининград, 2014. – Ч. II. – С. 307–309. – 0,21 / 0,05 а.л.

10. Астафурова Т. П. Биологические эффекты и механизмы воздействия высокодисперсных металлургических отходов на морфологические и физиолого-биохимические параметры сельскохозяйственных растений / Т. П. Астафурова, А. П. Зотикова, С. И. Михайлова, **A. A. Буренина** // Растения в условиях глобальных и локальных природно-климатических и антропогенных воздействий : тезисы докладов всероссийской научной конференции с международным участием и школы для молодых ученых. Петрозаводск, 21–26 сентября 2015 г. – Петрозаводск, 2015. – С. 45. – 0,13 / 0,04 а.л.

11. Астафурова Т. П. Влияние высокодисперсных шламовых отходов металлургии на сельскохозяйственные культуры / Т. П. Астафурова, А. П. Зотикова, Ю. Н. Моргалев, С. И. Михайлова, **A. A. Буренина** // Роль государственной агрохимической службы в развитии агропромышленного комплекса – прошлое, настоящее и будущее : материалы межрегиональной научно-практической конференции, посвященной 50-летию создания

Государственной агрохимической службы Томской области. Томск, 09–10 июля 2015 г. – Томск, 2015. – С. 14–16. – 0,17 / 0,06 а.л.

12. **Буренина А. А.** Влияние наночастиц платины на морфофизиологические параметры проростков пшеницы / А. А. Буренина, А. П. Зотикова, Т. П. Астафурова // Годичное собрание общества физиологов растений России. Сигнальные системы растений: от рецептора до ответной реакции организма : материалы научной конференции с международным участием и школы молодых ученых. Санкт-Петербург, 21–24 июня 2016 г. – Санкт-Петербург, 2016. – С. 264–265. – 0,12 / 0,08 а.л.

13. **Буренина А. А.** Морфофизиологические эффекты при воздействии наночастиц платины на проростки пшеницы / А. А. Буренина, А. О. Воронова, Т. П. Астафурова // История и методология физиолого-биохимических и почвенных исследований : сборник научных трудов по материалам научной конференции, посвященной 100-летию кафедры физиологии растений и микроорганизмов Пермского государственного национального исследовательского университета. Пермь, 18–19 октября 2017 г. – Пермь, 2017. – С. 9–11. – 0,22 / 0,18 а.л.

14. **Буренина А. А.** Структурно-функциональные особенности растений огурца при воздействии наночастиц ZnO / А. А. Буренина, Т. П. Астафурова, Е. Н. Сурнина // Механизмы устойчивости растений и микроорганизмов к неблагоприятным условиям среды : сборник материалов Годичного собрания Общества физиологов растений России, Всероссийской научной конференции с международным участием и школы молодых ученых. Иркутск, 10–15 июля 2018 г. – Иркутск, 2018. – Ч. II. – С. 1199–1202. – DOI: 10.31255/978-5-94797-319-8-1199-1202. – 0,24 / 0,2 а.л.

15. **Буренина А. А.** Влияние наночастиц и ионов никеля на морфофизиологические параметры проростков пшеницы / А. А. Буренина, Т. П. Астафурова // Роль физиологии и биохимии в интродукции и селекции сельскохозяйственных растений : сборник материалов V Международной научно-методологической конференции. Москва, 15–19 апреля 2019 г. – Москва, 2019. – Т. II. – С. 33–36. – DOI: 10.22363/09359-2019-33-36. – 0,14 / 0,12 а.л.

Издание подготовлено в авторской редакции.
Отпечатано на участке цифровой печати
Издательского Дома Томского государственного университета
Заказ № 6654 от «17» января 2020 г. Тираж 100 экз.
г. Томск Московский тр.8 тел. 53-15-28