

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Жуйковой Татьяны Валерьевны
на диссертацию **Черниковой Натальи Петровны**
**«Трансформация и миграция микро- и наночастичек оксидов меди и цинка
в системе почва-растения»**,
представленную на соискание ученой степени кандидата биологических наук
по специальности 1.5.19. Почвоведение (биологические науки)

1. Актуальность темы диссертационного исследования. Диссертационная работа Н.П. Черниковой посвящена одной из наиболее значимых и быстро развивающихся областей современного почвоведения и экологической токсикологии – исследованию поведения наноразмерных форм тяжелых металлов в агроэкосистемах. В современных условиях возрастающего мирового производства и применения наноматериалов, в том числе на основе оксидов меди и цинка, неизбежно их поступление в почву в количествах, которые могут представлять опасность для биоты. В связи с этим поступление тяжелых металлов в форме наночастиц в окружающую среду становится новым техногенным фактором, требующим всестороннего изучения.

Наночастицы CuO и ZnO, обладающие более высокой удельной поверхностью, реакционной способностью, скоростью растворения, подвижностью по сравнению с их микродисперсными аналогами, легко транспортируются по трофическим цепочкам, достигая наивысших уровней биологической организации, включая человека. При этом в Российской Федерации до сих пор не установлены предельно допустимые концентрации для наночастичек этих металлов в почвах и растительной продукции. Токсические эффекты от наночастиц, проявляющиеся на растительных и животных организмах могут существенно отличаться от эффектов, вызываемых микрочастицами. Однако, систематических комплексных исследований в этой области очень мало. Наиболее важное значение такие исследования приобретают в агропромышленных районах с развитым сельским хозяйством. реакция сельскохозяйственных культур на высокие концентрации тяжелых металлов в почвах в наночастичках. В этой связи диссертационное исследование Н.П. Черниковой имеет важное практическое значение для черноземов юга России, которые составляют основу агропроизводства региона.

Диссертация Н.П. Черниковой является комплексным фундаментальным исследованием трансформации, миграции, биодоступности и фитотоксичности микро- и наночастичек CuO и ZnO в черноземе обыкновенном карбонатном на примере ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.). Выбранный объект исследования (чернозем) и тест-культура (ячмень) имеют высокую практическую значимость, что делает работу своевременной и востребованной. Таким образом, актуальность диссертационного исследования не вызывает сомнений и соответствует приоритетным направлениям развития почвоведения, агроэкологии и экологической токсикологии.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научные положения, выводы и практические рекомендации, представленные в диссертации, являются логическим следствием проведенных экспериментов и обладают высокой степенью обоснованности, что достигается следующими фактами.

Автором проведен глубокий анализ литературы (Глава 1), охватывающий современные данные о производстве и применении наночастиц, их трансформации в почве, механизмах миграции в растениях и токсическом действии. Анализ литературы демонстрирует актуальность исследования, которая определяет четко сформулированные цель и задачи, а также положения, выносимые на защиту.

Положение о трансформации подтверждается данными фракционного анализа (метод BCR), которые показывают достоверное перераспределение Cu и Zn между фракциями при внесении наночастиц по сравнению с микроформами. Автор убедительно демонстрирует специфику поведения металлов: определяющую роль органического вещества для Cu и оксидов Fe/Mn для Zn (Рисунок 8, Таблицы 4, 5).

Положение о биодоступности базируется на анализе группы непрочно связанных соединений. Показано, что наночастицы формируют более высокий пул подвижных форм. Особенно ценным является выявленное изменение соотношения форм: доминирование комплексных соединений для наночастиц CuO и специфически сорбированных для ZnO (Рисунок 9, Таблицы 6, 7).

Положение о миграции и барьерной функции строится на вычислениях коэффициентов накопления (КН) и акропетальных коэффициентов (АК). Данные о преимущественном накоплении металлов в корнях и снижении транслокации в надземные органы с ростом концентрации (Таблицы 8, 9) являются статистически значимыми и согласуются с механизмами физиологической защиты.

Положение о структурных и биохимических изменениях подтверждено результатами электронно-микроскопического анализа, а также физиолого-биохимическими анализами (содержание малонового альдегида, активность супероксиддисмутазы, каталазы, глутатионредуктазы (Рисунок 11–15). Выявленные гистологические изменения корня и листьев (редукция корневых волосков, уменьшение площади первичной коры за счет разрушения клеток мезодермы (Рисунок 16, 17, Таблица 12), изменение мезофилла в сторону увеличения межклетников, увеличение размеров клеток губчатого мезофилла и уменьшение их количества на единице площади) и ультраструктурные повреждения (разрушение мембран, дезориентация тилакоидов, набухание митохондрий, увеличение количества пластоглобул, уменьшение размеров и количества крахмальных зерен (Рисунок 18, 19, Таблица 13) иллюстрируют механизм токсического действия.

Таким образом, выводы, представленные в работе, являются результатом экспериментальных исследований. Они соотносятся с литературными

данными. Результаты исследования в части различий в реакции *Hordeum vulgare* L. на токсическое действие нано- и микроформ ZnO и CuO подвергнуты статистическому анализу с использованием непараметрических критериев Краскела-Уоллиса и Манна-Уитни.

3. Достоверность и новизна научных положений, выводов, рекомендаций

Достоверность результатов не вызывает сомнений. Исследование выполнено на высоком методическом уровне с использованием современных и взаимодополняющих подходов: вегетационные опыты в контролируемых условиях, атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС), рентгено-флуоресцентный анализ (РФА), методы последовательной и параллельной экстракции для оценки фракционного состава, а также комплексные физиолого-биохимические и микроскопические (световая и просвечивающая электронная микроскопия) методы. Экспериментальная база Южного федерального университета и использование стандартизированных методик (ГОСТ, модифицированная схема BCR) гарантируют надежность полученных данных. Статистическая обработка результатов (критерий Краскела-Уоллиса, Манна-Уитни) подтверждает значимость различий между вариантами опытов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

Впервые детально изучена роль различных почвенных компонентов (органическое вещество, оксиды Fe/Mn, алюмосиликаты, карбонаты) в трансформации наноформ CuO и ZnO в черноземе обыкновенном карбонатном, что позволило не только количественно оценить перераспределение металлов, но и выявить принципиальные различия в механизмах закрепления Cu и Zn.

Впервые установлена специфика формирования пула непрочно связанных соединений: показано, что для наноформ CuO характерно резкое увеличение доли комплексных соединений, для наноформ ZnO – специфически сорбированных и обменных форм. Это является принципиально новым знанием о поведении металлов на границе раздела фаз.

Впервые выявлена более высокая биодоступность наноформ относительно микроформ, а также более высокая биодоступность наноформ ZnO, по сравнению с CuO. Выявлена дифференцированная барьерная роль корневой системы ячменя, которая эффективно ограничивает транспорт металлов в надземную часть.

Впервые с применением трансмиссионного электронного микроскопа охарактеризованы ультраструктурные повреждения клеточных органелл корней и листьев ячменя при воздействии микро- и наноформ, что позволило визуализировать механизмы токсичности на клеточном уровне.

4. Значимость для науки и практики полученных автором результатов

Теоретическая значимость работы заключается в углублении фундаментальных представлений о поведении наночастиц тяжелых металлов в системе «почва – растение». Полученные данные вносят существенный вклад в

химию почв, экологическое почвоведение и нанотоксикологию, раскрывая механизмы трансформации, миграции и токсического действия наночастиц CuO и ZnO.

Практическая значимость работы. Разработанный комплекс показателей (фракционный состав, группа непрочно связанных соединений, фактор биодоступности, коэффициенты накопления и транслокации, морфометрические и биохимические реакции растений) может служить методической основой для экологической оценки риска загрязнения почв металлосодержащими наноматериалами, мониторинга состояния почв и зерновых культур в зонах потенциального техногенного воздействия, обоснования нормативов безопасного содержания наночастиц Cu и Zn в почвах сельскохозяйственного назначения.

Результаты работы могут быть использованы при разработке природоохранных мероприятий и стратегий минимизации рисков, связанных с применением нанотехнологий в агропромышленном комплексе.

5. Соответствие диссертации паспорту специальности

Тематика и содержание диссертационной работы Н.П. Черниковой полностью соответствуют паспорту научной специальности 1.5.19. Почвоведение (биологические науки):

Пункт 6. Теоретические и научно-методические вопросы химии почв. Изучение взаимодействия органических и минеральных компонентов почв. Техногенное и агрогенное химическое загрязнение почв: исследование полностью посвящено взаимодействию наночастиц с минеральными и органическими компонентами чернозема, оценке трансформации и загрязнения почв.

Пункт 9. Теоретические и научно-методические вопросы экологического почвоведения. Функции почв в биосфере и жизни человека, в обеспечении экологической безопасности: работа непосредственно касается оценки экологических рисков и биологической безопасности почв, загрязненных наноматериалами.

6. Личный вклад соискателя в разработку научной проблемы, репрезентативность эмпирического материала

Соискателем лично проведены все модельные и вегетационные опыты, выполнены анализы по определению содержания тяжелых металлов в почве и растениях, осуществлены физиолого-биохимические и микроскопические исследования. Автором самостоятельно проведены обработка, статистический анализ и интерпретация экспериментальных данных. Это свидетельствует о высокой квалификации и самостоятельности исследователя.

Эмпирический материал является репрезентативным. Эксперимент охватывает широкий диапазон доз загрязнителей (от 300 до 3000 мг/кг), что позволяет проследить закономерности в широком диапазоне нагрузок. Анализы выполнены в трехкратной повторности, что обеспечивает статистическую надежность результатов. Объем выборки (более 40 растений на вариант в вегетационном опыте) является достаточным для корректной статистиче-

ской оценки. Использование широкого спектра физико-химических и биологических методов подтверждает комплексный и всесторонний подход к решению поставленных задач.

7. Полнота освещения результатов диссертации в печати

Результаты диссертационного исследования прошли апробацию на многих Всероссийских и Международных конференциях (Докучаевские чтения, Международная конференция «Ломоносов», съезды Общества почвоведов и др.) в период с 2020 по 2025 гг., что подтверждает высокий уровень признания работы в профессиональном сообществе. По теме диссертации опубликовано 25 научных работ, из них 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 6 статей в журналах первого и второго квартилей, индексируемых в Scopus и Web of Science, что полностью соответствует критериям Положения о присуждении ученых степеней. Публикации в полной мере отражают основное содержание работы. Публикационная активность автора полностью соответствует требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям.

8. Краткая характеристика структуры и содержания диссертации, ее завершенность

Диссертация имеет классическую структуру и состоит из введения, 3 глав, списка литературы. Материал изложен на 101 странице, содержит 19 иллюстраций, 13 таблиц. Библиография насчитывает 167 источников, из которых 139 – на иностранных языках.

Во введении представлен методологический аппарат исследования: обоснована актуальность, степень разработанности темы, сформулированы цель, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы диссертационного исследования, положения, выносимые на защиту, сведения о практическом использовании результатов исследования, степень достоверности и апробация результатов, личный вклад автора.

В первой главе «Обзор литературы» (стр. 10–28) дан глубокий анализ отечественных и зарубежных источников по теме диссертации. Данная часть работы представляет собой самостоятельное аналитическое исследование, которое задает направление всей последующей экспериментальной работе и формирует базу для разработки практических рекомендаций.

Анализ литературы отражает междисциплинарный подход в исследовании – объединение знаний из почвоведения, экотоксикологии, анатомии и морфологии растений и физиологии растений. Материалы данной главы логически подводят к необходимости исследования влияния наночастиц на растения.

Во второй главе «Объекты и методы исследования» (стр. 29–41), дано полное и ясное описание использованных подходов и методик, включая детали проведения модельных и вегетационных опытов.

В третьей главе «Результаты и их обсуждение» (стр. 42–81) является центральной и самой объемной частью. Экспериментальные данные изложены

последовательно и логично: от фитотоксичности и трансформации в почве нано- и микрочастиц до миграции в растения и структурно-функциональных нарушений. Обсуждение собственных результатов построено на сопоставлении с данными других исследователей.

Выводы сформулированы четко и лаконично, полностью соответствуют поставленным задачам и вытекают из содержания диссертации.

Работа производит впечатление завершенного научного исследования, выполненного на высоком профессиональном уровне. Отличается логикой выполненного исследования и взаимосвязью структурных частей диссертации.

9. Соответствие содержания автореферата основным положениям и выводам диссертации

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации. В нем в сжатой форме воспроизведены актуальность, цели, задачи, научная новизна, практическая значимость и методология работы. Основные положения, выносимые на защиту, и выводы идентичны тем, что представлены в диссертации. В тексте автореферата приведены ключевые результаты в виде таблиц и рисунков, достаточных для понимания сути проведенного исследования. Структура и стиль автореферата соответствуют предъявляемым требованиям и дают объективное представление о проделанной работе.

10. Оценка достоинств и недостатков в содержании и оформлении диссертации

Основные достоинства работы:

1. Комплексный междисциплинарный подход, объединяющий методы химии почв, экологической токсикологии, физиологии и анатомии растений.

2. Высокий методический уровень: использование современных методов анализа (атомно-абсорбционная спектрофотометрия, рентгено-флуоресцентный метод, просвечивающая электронная микроскопия) и адекватных статистических методов.

3. Оригинальность и новизна полученных данных: впервые проведено сравнение поведения микро- и наночастиц на всех этапах системы «почва-растение» для черноземов юга России.

4. Глубокий анализ полученных результатов с привлечением обширной литературы, что повышает теоретическую значимость работы.

5. Практическая направленность результатов для разработки нормативных документов, в том числе предельно-допустимых концентраций для наночастиц и экологического мониторинга.

Замечания и вопросы по диссертационной работе:

1. В работе сделан акцент на фракционный состав и накопление металлов. Хотелось бы видеть более глубокое обсуждение молекулярных механизмов взаимодействия наночастиц с поверхностью корней и транспорта через мембраны на основе результатов просвечивающей электронной микроскопии (ТЭМ), например, визуализированы ли были сами наночастицы в тканях растений, или наблюдались только следствия их действия?

2. В Главе 1 обсуждается сульфидирование и окислительно-восстановительные превращения как значимые процессы. Почему эти процессы не были рассмотрены более детально в экспериментальной части при интерпретации трансформации металлов в черноземе, учитывая его карбонатность и окислительную среду?

3. В исследовании использованы как микро-, так и наночастицы. В выводах акцент сделан на большей токсичности и подвижности наночастиц. Можно ли утверждать, что наблюдаемые различия обусловлены исключительно размерным фактором («наночастичным эффектом»), или они частично связаны с различиями в морфологии и кристалличности частиц, показанными на ТЭМ-фотографиях (Рисунок 3)?

Эти замечания носят характер пожеланий для дальнейшей работы и не снижают общей высокой оценки диссертации.

Заключение

Диссертационная работа Черниковой Натальи Петровны на тему: «Трансформация и миграция микро- и наночастиц оксидов меди и цинка в системе почва-растения» является самостоятельно выполненным, завершенным научным исследованием, имеющим важное научное и практическое значение для почвоведения, агроэкологии и охраны окружающей среды. Она соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней в ЮФУ» (№62-ОД от 27.03.2026 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Автор диссертации, Черникова Наталья Петровна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата биологических наук по специальности 1.5.19. Почвоведение (биологические науки).

Официальный оппонент,
Жуйкова Татьяна Валерьевна,
доктор биологических наук
(03.00.16 – экология, 03.00.05 – ботаника)
профессор



Тел.: 8(3435) 25-48-00; e-mail: hbfnt@rambler.ru,
622031, Свердловская обл. Нижний Тагил, ул. Красногвардейская, 57
Нижнетагильский государственный
социально-педагогический институт (филиал)
ФГАОУ ВО «Уральского государственного педагогического
университета», директор
31 августа 2026 года