

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ЕВСТЕГНЕЕВА НАТАЛЬЯ АНДРЕЕВНА

**БИОДИАГНОСТИКА ЭКОТОКСИЧНОСТИ ТЕЛЛУРА И ТАЛЛИЯ
В ПОЧВАХ ЮГА РОССИИ**

1.5.15. Экология (биологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Ростов-на-Дону – 2024

Работа выполнена на кафедре экологии и природопользования
Академии биологии и биотехнологии имени Д.И. Ивановского
Южного федерального университета

Научный руководитель: **Колесников Сергей Ильич,**
доктор сельскохозяйственных наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Южный федеральный
университет», кафедра экологии и
природопользования, заведующий

Официальные оппоненты: **Терехова Вера Александровна,**
доктор биологических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова», факультет
почвоведения, кафедра земельных ресурсов и
оценки почв, профессор

Довлетярова Эльвира Анварбековна,
кандидат биологических наук,
ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы
народов им. Патриса Лумумбы», Аграрно-
технологический институт, директор

Защита диссертации состоится **14 июня 2024 г. в 12:30** на заседании диссертационного совета ЮФУ801.01.01 по биологическим наукам на базе Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского Южного федерального университета по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки 194/1, к. 712.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. Ю.А. Жданова Южного федерального университета по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 21Ж и на сайте Южного федерального университета <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1326702/>

Автореферат разослан «___»_____ 2024 г.

Отзыв на автореферат в 2-х экз. (с указанием даты, полностью ФИО, учёной степени со специальностью, звания, организации, подразделения, должности, адреса, телефона, e-mail), заверенный печатью организации, просим направлять по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1, к. 803а, ученому секретарю диссертационного совета ЮФУ801.01.01 Тимошенко А.Н., а также в формате .pdf на e-mail: atimoshenko@sfedu.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Тимошенко Алёна Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. На сегодняшний день тяжелые металлы и металлоиды считаются одними из основных загрязнителей окружающей среды (Водяницкий, 2012; Raj et al., 2011; Sun et al., 2019; Adimalla, 2020). В то же время, не все тяжелые металлы и металлоиды исследованы в достаточной степени. Например, негативное воздействие Pb, Cd, Cu, Zn, Cr, Ni, Mo, Co, B, Se, As, Mn, Ba, V, Sb, Sr, Sn, W изучено многими авторами (Колесников и др., 2000, 2006, 2014; Минкина, 2004, 2009, 2017; Манджиева, 2009; Алексеенко, 2013; Горбов и др., 2015; Дауд, 2019; Федоров и др., 2022; Евстегнеева и др., 2022, 2023а; Тимошенко и др., 2024; Sun et al., 2019; Adimalla, 2020; Jiang et al., 2020; Sudina et al., 2021; Tsepina N. et al., 2022), а экотоксичность теллура и таллия исследована недостаточно (Водяницкий, 2012; Kolesnikov, 2019). При этом масштабы и степень загрязнения почв теллуrom и таллием с каждым годом значительно увеличиваются (Касимов, Власов, 2012).

Теллур относят к новым загрязняющим элементам, вызывающим потенциальную опасность (Wiklund et al., 2018; Alavi et al. 2020; McNulty, Jowitt, 2021). Загрязнение окружающей среды теллуrom резко выросло в последние десятилетия (Qin et al. 2017; Presentato et al., 2019). Встречаются территории, в почвах которых зафиксировано превышение содержания теллура в 10 раз (Grygouć, Jabłońska-Czapla, 2021). Загрязнение теллуrom почв создает большую опасность для биоты (Li Z. et al., 2022).

Таллий из-за своей высокой токсичности классифицируется как один из приоритетных загрязнителей (CCME, 2010; MEP&MLP, 2014; USEPA, 2018). Согласно исследованиям, острая и хроническая токсичность таллия выше, чем у других элементов, таких как свинец, кадмий, мышьяк и ртуть (Wang, et al., 2021). Основными источниками загрязнения почв таллием считаются отходы плавильных и горнодобывающих производств, а также угольные электростанции и цементная, электронная, фармацевтическая промышленности (Kazantzis, 2000; Antón, et al., 2013; Vaněk et al., 2018; Liu et al., 2019).

Несмотря на высокую токсичность теллура и таллия, относительно немного известно об их поведении в почве и последующем влиянии на активность ферментов, почвенные микроорганизмы, растения. В связи с растущей тенденцией загрязнения окружающей среды представляется актуальным детальное изучение вопроса, связанного с качеством почв, загрязненных теллуrom и таллием. В том числе оценка токсичности теллура и таллия для живых организмов, основанная на оценке доступности этих элементов в окружающей среде, а не только на измерениях их общего содержания. При оценке устойчивости почв к загрязнению теллуrom и таллием целесообразно

использовать биологические показатели состояния почв (Терехова, 2022; Kolesnikov et al., 2021).

Цель исследования — оценка экотоксичности теллура и таллия по биологическим показателям состояния почв Юга России.

В основные задачи исследования входило:

1. Исследовать экологическую токсичность теллура и таллия методами биодиагностики по состоянию и функционированию почв Юга России, отличающихся свойствами, определяющими подвижность в почве металлов и металлоидов: чернозема обыкновенного, бурой лесной слабонасыщенной почвы, серопесков. Выявить закономерности изменения биологического состояния почв в динамике (10, 30, 90 сут), в зависимости от дозы внесения теллура и таллия, от химической формы (оксид/нитрат).

2. Определить концентрации теллура и таллия, не вызывающие нарушения экосистемных функций почв.

3. Оценить устойчивость почв к загрязнению теллуrom и таллием.

4. Определить наиболее чувствительные и информативные показатели биологического состояния почв к загрязнению теллуrom и таллием.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Теллур и таллий отличаются высокой экотоксичностью: превышение их фонового содержания в почве в 1,1–1,5 раза уже вызывает снижение биологических показателей. Нитраты теллура и таллия более токсичны, чем оксиды. Динамика биологических свойств почвы после загрязнения сильно зависит от типа почвы.

2. Концентрации теллура и таллия, вызывающие нарушение экосистемных функций почв, составляют соответственно 0,58 и 0,49 мг/кг в черноземе обыкновенном карбонатном, 0,55 и 0,41 мг/кг в бурой лесной слабонасыщенной почве, 0,55 и 0,15 мг/кг в серопесках.

3. Экотоксичность таллия значительно различается в контрастных по свойствам почвах: наибольшая в серопесках, наименьшая в черноземах обыкновенных. Для теллура такая закономерность не выражена.

Научная новизна исследования. Впервые проведено комплексное исследование влияния теллура и таллия на наиболее информативные и чувствительные показатели состояния и функционирования почв по единой методике с анализом различных параметров загрязнения. Впервые проведено исследование устойчивости к загрязнению теллуrom и таллием различающихся по свойствам почв: чернозем обыкновенный карбонатный тяжелосуглинистый, бурая лесная слабонасыщенная почва, серопески. Впервые проведено исследование влияния загрязнения теллуrom и таллием на экосистемные функции почв по интегральному показателю их биологического состояния

(ИПБС). Впервые установлены экологически безопасные концентрации теллура и таллия в исследованных почвах.

Практическая значимость. Полученные результаты позволят расширить современные данные о влиянии теллура и таллия на состояние окружающей среды. Установленные экологически безопасные концентрации теллура и таллия могут стать основой региональных экологических нормативов содержания этих элементов в исследуемых почвах, а также могут быть использованы для прогнозирования экологических рисков от загрязнения почв теллуrom и таллием.

Личный вклад автора. Автор самостоятельно выполнил анализ научной литературы по теме исследования. Совместно с научным руководителем были сформулированы цель и задачи исследования. Программа исследования составлена автором на основе предыдущих работ и скорректирована научным руководителем. Модельные эксперименты, лабораторно-аналитические исследования биологических свойств почв после загрязнения теллуrom и таллием проведены лично автором. Анализ, обобщение полученных результатов, формулирование защищаемых положений и выводов выполнены автором при участии научного руководителя. Подготовка основных публикаций проводилась с соавторами.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.5.15. Экология, прежде всего, пункту 10: «Антропогенное воздействие на популяции, сообщества и экосистемы. Биологические эффекты загрязнения среды токсичными веществами (экотоксикология). Разработка биологических методов и критериев оценки состояния среды, биоиндикация, биотестирование, биомониторинг. Разработка экологически обоснованных норм воздействия хозяйственной деятельности человека на живую природу».

Степень достоверности и апробация диссертации. Достоверность выводов и научных положений диссертации обеспечена применением методов, позволяющих решить поставленные задачи, современных методов определения экотоксичности химических элементов, сопоставлением полученных результатов с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации. Результаты диссертационного исследования были представлены на конференциях различного уровня: на Международных научных конференциях: «Биодиагностика и экологическая оценка окружающей среды: современные технологии, проблемы и решения» (Москва, 2023 г.), «Ломоносов. Секция Почвоведение» (Москва, 2023, 2021, 2020, 2019), «Современное состояние чернозёмов» (Ростов-на-Дону, 2023), «Степная Евразия – устойчивое развитие» (Ростов-на-Дону, 2022), «Эволюция и деградация почвенного покрова» (Ставрополь, 2022), «Наука, образование и инновации для АПК: состояние,

проблемы и перспективы» (Майкоп, 2020). На Всероссийских конференциях: «Почвы и окружающая среда» (Новосибирск, 2023), «Актуальные вопросы теории и практики лесного почвоведения» (Петрозаводск, 2023). На остальных научных конференциях: «Достижения и перспективы научных исследований молодых ученых Юга России» (Ростов-на-Дону, 2023), «Экология и природопользование» (Ростов-на-Дону, 2023, 2022, 2021, 2020), «Мониторинг, охрана и восстановление почвенных экосистем в условиях антропогенной нагрузки» (Ростов-на-Дону, 2022), «Актуальные проблемы экологии и природопользования» (Ростов-на-Дону, 2022, 2021, 2020, 2019).

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликованы 24 печатные работы. В том числе 9 статей в журналах, входящих в международные библиографические и реферативные базы данных Scopus и Web of Science, 3 статьи опубликованы в научных журналах из Перечней рецензируемых научных изданий ЮФУ и ВАК.

Структура и объем диссертации. Объем диссертационной работы 167 страниц. Диссертация содержит введение, пять глав, выводы, список литературы, 22 таблицы, 119 рисунков. Список литературы содержит 265 источников.

Финансовая поддержка работы. Исследование поддержано Российским научным фондом (22-24-01041), Программой стратегического академического лидерства Южного федерального университета, "Приоритет 2030" (СП-12-22-10, СП-12-23-01, СП-12-24-04), Министерством образования и науки Российской Федерации (5.5735.2017/8.9), Президентом Российской Федерации (НШ-9072.2016.11, НШ-3464.2018.11, НШ-2511.2020.11, НШ-075.15.2022.811, МК-2688.2022.1.5).

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю, заведующему кафедрой экологии и природопользования, д.с.-х.н., профессору С.И. Колесникову за поддержку в становлении как специалиста, за его многочисленные советы и за все время, которое он посвятил руководству исследованиями. Автор благодарит директора АБиБ ЮФУ, д.г.н., профессора К.Ш. Казеева за ценные рекомендации, д.б.н., профессора Т.В. Денисову за поддержку и советы по оформлению работы, всех преподавателей кафедры экологии и природопользования Академии биологии и биотехнологии ЮФУ за качественное обучение и помощь при оформлении данной работы, а также м.н.с. ИФХиБПП РАН (г. Пущино), Д.А. Хорошаева и сотрудников Российского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского (г. Санкт-Петербург) за помощь в проведении лабораторных исследований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. ЭКОТОКСИЧНОСТЬ ТЕЛЛУРА И ТАЛЛИЯ

В главе рассмотрен обзор научной литературы по проблеме загрязнения компонентов окружающей среды теллуrom и таллием. Проанализированы естественные и антропогенные источники поступления теллура и таллия в окружающую среду, мировое производство и основные потребители. Дан обзор токсического действия теллура и таллия на живые организмы и компоненты окружающей среды.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Объекты исследования

Для исследования были отобраны верхние гумусовые горизонты чернозема обыкновенного карбонатного, бурой лесной слабонасыщенной почвы, серопесков. Данные почвы отличаются свойствами, которые, как правило, влияют на подвижность загрязнителей, а именно, отличаются по гранулометрическому составу, кислотности и содержанию органического вещества (Вальков и др., 2008а, 2008б; Казеев и др., 2015; Безуглова и др., 2019).

Чернозем обыкновенный карбонатный тяжелосуглинистый южно-европейской фации (Haplic Chernozems Calcic). Место отбора – г. Ростов-на-Дону, Ботанический сад. Содержание гумуса в верхнем горизонте – 3,6 %, слабощелочная реакция среды ($\text{pH} = 7,8\%$), тяжелый гранулометрический состав.

Бурая лесная слабонасыщенная почва (Haplic Cambisols Eutric) отобрана в п. Никель, Майкопского р-на, Республики Адыгея. Содержание гумуса в верхнем горизонте – 4,8%, слабокислая реакция среды — $\text{pH} = 5,8$, тяжелый гранулометрический состав.

Серопески (Haplic Arenosols Eutric), место отбора – Ростовская область, Усть-Донецкий р-н, ст-ца Верхнекундрюченская. В данной почве содержание гумуса в верхнем горизонте – 3,1 %, нейтральная реакция среды — $\text{pH} = 6,8$, легкий гранулометрический состав.

Количественное определение фонового содержания теллура и таллия в изучаемых почвах было проведено коллегами из Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) на приборе ELAN-DRC-e (Perkin Elmer). Диапазон измерения химических элементов (металлов, металлоидов и неметаллов) масс-спектрометром составляет от 10–5 до 0,1 % (табл. 1).

2.2. Методика исследования

Для достижения поставленных задач были проведены лабораторные модельные эксперименты по загрязнению чернозема обыкновенного, бурой лесной почвы и серопесков теллуром и таллием.

В модельном опыте теллур и таллий вносили в двух формах: водорастворимой – нитрат $\text{Te}_2\text{O}_3(\text{OH})\text{NO}_3$ и $\text{Tl}(\text{NO}_3)_3$, нерастворимой в воде – оксиды Tl_2O_3 , и TeO_2 . Использование оксидов позволяет исключить воздействие на свойства почвы сопутствующих анионов, как это происходит при внесении солей металлов. Использование нитратов позволяет оценить воздействие водорастворимой (наиболее подвижной в почве) формы элемента.

Поскольку токсичность тяжелых металлов (ТМ) и металлоидов зависит от степени превышения фоновой концентрации элемента в почве и обычно начинает проявляться при их концентрации в почве от 3–5 фонов (Kolesnikov et al., 2022), степень загрязнения почв в модельном эксперименте выражали в условно допустимой концентрации (УДК), равной трем фоновым концентрациям элемента в почве. В почву вносили 0,5, 1, 3, 10 и 30 УДК элементов, то есть 1,5, 3, 9, 30, 90 фонов. Концентрации теллура и таллия, вносимые в почвы в модельном эксперименте представлены в табл. 1. Контролем служила незагрязненная почва с естественным фоновым содержанием элемента.

Для оценки экотоксичности теллура и таллия лабораторные исследования были проведены в динамике (через 10, 30 и 90 сут).

На протяжении всего срока эксперимента поддерживали оптимальные условия: температура воздуха на уровне $+18\text{--}20^\circ\text{C}$. Влажность почвы поддерживалась на уровне 60% от полевой влагоемкости (30% от массы почвы).

Таблица 1

Концентрация теллура и таллия в почвах в модельном эксперименте, мг/кг

Фон	1 (контроль)	1,5	3	9	30	90
УДК (3 фона)		0,5	1	3	10	30
Почва	Концентрация теллура, мг/кг					
Чернозем обыкновенный Haplic Chernozem (Calcic)	0,5	0,75	1,5	4,5	15,0	45,0
Бурая лесная слабонасыщенная Eutric Cambisol	0,5	0,75	1,5	4,5	15,0	45,0
Серопески – Eutric Arenosol	0,5	0,75	1,5	4,5	15,0	45,0
	Концентрация таллия, мг/кг					
Чернозем обыкновенный – Haplic Chernozem (Calcic)	0,47	0,71	1,41	4,23	14,1	42,3
Бурая лесная слабонасыщенная – Eutric Cambisol	0,39	0,59	1,17	3,51	11,7	35,1
Серопески – Eutric Arenosol	0,14	0,21	0,42	1,26	4,2	12,6

2.3. Методы исследования

В табл. 2 представлены биологические и биохимические показатели состояния почв, проанализированные в исследовании. Они считаются наиболее чувствительными и информативными, а также одними из первых реагируют на антропогенное загрязнение (Терехова, 2022; Kolesnikov et al., 2019; Aponte et al., 2020).

2.4. Расчет интегрального показателя биологического состояния почвы

Для проведения комплексной оценки экотоксичности теллура и таллия рассчитывали интегральный показатель биологического состояния почв (ИПБС) (Вальков и др., 1999; Колесников и др., 2000; Казеев и др., 2003).

2.5. Статистическая обработка результатов

Достоверность полученных результатов оценивали на основе результатов дисперсионного и корреляционного анализов. Регрессионный анализ использовали для определения экологически безопасных концентраций теллура и таллия в почвах. Статистическая обработка данных проводилась с использованием программы Statistica 13.3 и программы MS Excel (2016).

Таблица 2

Биологические показатели состояния почв, используемые в исследовании

Показатель, единицы измерения	Метод определения
Общая численность бактерий, млрд в 1 г почвы	Метод люминесцентной микроскопии (Звягинцев, Кожевин, 1974; Казеев и др., 2016)
Активность каталазы, мл O ₂ на 1 г почвы за 1 мин	Газометрический метод, по объему выделенного кислорода при разложении перекиси водорода (Галстян, 1978)
Активность дегидрогеназ, мг ТФФ на 10 г почвы за 24 часа	Фотоколориметрический метод по восстановлению солей тетразолия в формазан, метод Галстяна А.Ш. (1978)
Активность пероксидазы, мг 1,4 бензохинона в 1 г почвы за 30 мин	Метод окисления гидрохинона до хинонов в присутствии перекиси водорода (Карягина, Михайлова, 1986)
Активность полифенолоксидазы, мг 1, 4 бензохинона в 1 г почвы	Метод окисления гидрохинона до хинонов (Галстян, 1974)
Активность аскорбатоксидазы, мг ДГАК в 1 г почвы за 1 час.	По разнице между количеством остаточной аскорбиновой кислоты и количеством образующейся дегидроаскорбиновой кислоты (ДГАК) (Галстян, Марукян, 1973)
Активность ферриредуктазы, мг Fe ₂ O ₃ в 100 г за 48 часов	По количеству восстановленного трехвалентного железа (модифицированный метод А.Ш. Галстяна, Н.А. Оганесяна (1973))
Активность инвертазы, мг глюкозы в 1 г почвы за 24 часа	Колориметрический метод определения с реактивом Феллинга (Даденко, 2021)
Активность уреазы, мг NH ₃ в г почвы за 24 часа	Модифицированный метод Галстяна (1978) с использованием реактива Несслера (Даденко, 2021)
Активность фосфатазы, мкг п-нитрофенола в 1 грамме почвы за 1 час	Модифицированный метод М. Табатабая и Дж. Бремнера (Tabatabai, Bremner, 1969; Eivazy, Tabatabai, 1977; Даденко, 2021)
Активность протеазы, мг глицина в 1 г почвы за 24 часа	По количеству аминокислот при протеолизе казеина (Галстян, 1978)
Показатели интенсивности начального роста (длина корней и побегов), мм	Морфометрический метод (Бабьева, Зенова, 1989)
Скорость микробного дыхания (базальное дыхание, V _{basal}), мкг С/ г*ч	По интенсивности выделения CO ₂ с помощью инфракрасного газового анализатора Li-820 (LiCor, США).
Углерод микробной биомассы (С _{мик}), мкг С/г почвы ⁻¹	Метод субстрат-индуцированного дыхания (Anderson and Domsch, 1978)

ГЛАВА 3. ОЦЕНКА ЭКОТОКСИЧНОСТИ ТЕЛЛУРА ПО БИОЛОГИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ ПОЧВ

В главе изложены результаты модельного опыта по изучению влияния теллура на показатели биологической активности чернозема обыкновенного карбонатного, бурой лесной слабонасыщенной почвы и серопесков. В качестве примера в табл. 3 приведены результаты исследования чернозема обыкновенного.

Установлено, что в результате загрязнения исследуемых почв соединениями теллура снижаются биологические показатели состояния почв.

Статистически достоверные увеличения показателей активности почв (активность пероксидазы, аскорбатоксидазы, фосфатазы, уреазы) были зафиксированы только при внесении минимальной концентрации оксида теллура (0,5 УДК) в чернозем обыкновенный на 10-е сут исследования, на 90 сут отмечена достоверная стимуляция активности каталазы. Полученные данные свидетельствуют о высокой токсичности теллура по сравнению с многими другими ТМ, для которых стимуляция биологических показателей почвы не редкость даже в значительно более высоких дозах (Колесников и др., 2006; Kabata-Pendias, 2011).

Для большинства исследуемых показателей отмечена прямая зависимость между снижением этого показателя и концентрацией теллура в почве.

Таблица 3

Изменение свойств чернозема обыкновенного карбонатного после
загрязнения теллуrom

Соединение	Срок моделирования, сут	Концентрация Те, мг/кг						НСР _{0.05}
		1 фон (контроль)	1,5 фона	3 фона	9 фонов	30 фонов	90 фонов	
			0,5 УДК	1 УДК	3 УДК	10 УДК	30 УДК	
		0,5	0,75	1,5	4,5	15,0	45,0	
Общая численность бактерий, млрд/г								
TeO ₂	10	2,1	1,7	1,6	1,4	1,4	1,2	0.1
	30	1,9	1,5	1,4	1,1	1,2	1,0	0.1
	90	1,8	1,2	1,5	1,4	0,8	0,5	0.1
Te ₂ O ₃ (OH)NO ₃	10	2,1	1,0	0,8	0,8	0,7	0,5	0,1
	30	1,9	0,9	0,6	0,7	0,4	0,2	0,1
	90	1,8	0,7	0,7	0,6	0,4	0,3	0,1
Активность каталазы, мл кислорода/г почвы, за 1 мин								
TeO ₂	10	6,9	6,1	5,6	5,3	4,1	3,3	0,4
	30	12,1	10,8	9,9	9,7	8,9	8,9	0,7
	90	11,3	11,8	11,5	11,1	10,6	10,3	0,8
Te ₂ O ₃ (OH)NO ₃	10	6,9	5,3	5,2	3,6	1,7	1,8	0,3
	30	12,1	10,6	9,9	9,2	6,5	2,4	0,6
	90	11,3	12,5	10,3	8,9	7,6	4,9	0,7

Активность дегидрогеназ, мг 2.3.5-трифенилтетразолия хлористого/ 10 г почвы за 24 ч								
TeO ₂	10	25,5	23,1	21,8	21,0	20,3	18,1	1,5
	30	35,6	33,4	32,7	32,6	30,5	24,7	2,2
	90	30,8	32,1	30,7	30,5	29,3	28,9	2,2
Te ₂ O ₃ (OH)NO ₃	10	25,5	19,3	14,7	9,5	8,2	8,1	1,0
	30	35,6	25,9	23,2	16,0	12,4	9,1	1,4
	90	30,8	29,6	24,8	17,3	12,6	9,6	1,5
Активность пероксидазы, мг 1,4 бензохинона в 1 г почвы за 30 мин								
TeO ₂	10	1,37	1,51	1,40	1,37	1,33	1,19	0,10
Te ₂ O ₃ (OH)NO ₃		1,37	1,35	0,67	0,67	0,47	0,23	0,06
Активность полифенолоксидазы, мг 1, 4 бензохинона в 1 г почвы								
TeO ₂	10	1,39	1,44	1,37	1,35	1,35	1,15	0,10
Te ₂ O ₃ (OH)NO ₃		1,39	0,86	0,86	0,33	0,21	0,19	0,05
Активность аскорбатоксидазы, мг ДГАК в 1 г почвы за 1 час.								
TeO ₂	10	6,5	7,2	7,1	6,9	6,4	6,0	0,5
Te ₂ O ₃ (OH)NO ₃		6,5	6,2	6,4	6,4	6,6	6,7	0,5
Активность ферриредуктазы, мг Fe ₂ O ₃ в 100 г за 48 часов								
TeO ₂	10	2,13	1,66	1,40	0,94	0,83	0,58	0,09
Te ₂ O ₃ (OH)NO ₃		2,13	2,08	1,98	0,42	0,16	0,04	0,08
Активность инвертазы, мг глюкозы в 1 г почвы за 24 часа								
TeO ₂	10	35,0	34,2	32,0	30,5	29,0	27,1	2,2
Te ₂ O ₃ (OH)NO ₃		35,0	36,9	36,1	32,8	16,1	7,8	1,9
Активность уреазы, мг NH ₃ в г почвы за 24 часа								
TeO ₂	10	3,13	3,52	3,47	3,16	3,13	3,09	0,23
Te ₂ O ₃ (OH)NO ₃		3,13	3,35	3,26	3,20	2,93	2,82	0,22
Активность фосфатазы, мкг п-нитрофенола в 1 грамме почвы за 1 час								
TeO ₂	10	0,29	0,33	0,30	0,27	0,25	0,24	0,02
Te ₂ O ₃ (OH)NO ₃		0,29	0,14	0,13	0,13	0,05	0,02	0,01
Активность протеазы, мг глицина в 1 г почвы за 24 часа								
TeO ₂	10	186,0	161,8	128,5	120,2	103,5	85,2	9
Te ₂ O ₃ (OH)NO ₃		186,0	173,5	166,8	146,8	123,5	100,2	11
Длина корней пшеницы, %								
TeO ₂	10	100	83	72	74	57	51	10
	30	100	59	36	27	26	22	6
	90	100	107	93	94	86	68	12
Te ₂ O ₃ (OH)NO ₃	10	100	78	63	25	15	7	6
	30	100	55	54	18	4	4	5
	90	100	106	108	32	13	4	8
Длина побегов пшеницы, %								
TeO ₂	10	100	75	72	63	57	53	9
	30	100	88	39	38	33	22	7
	90	100	79	68	55	52	44	9
Te ₂ O ₃ (OH)NO ₃	10	100	87	82	46	27	8	8
	30	100	77	58	38	26	16	7
	90	100	99	76	43	34	20	8

Оценка чувствительности биологических показателей показала, что наиболее чувствительными биологическими показателями загрязнения чернозема обыкновенного теллуром являются активность ферриредуктазы (48), общая численность микроорганизмов (52) и показатели фитотоксичности (длина корней (53) и побегов (52)). Оксидоредуктазы проявили бóльшую чувствительность к загрязнению теллуром, чем гидролазы. Высокая чувствительность ферментов класса оксидоредуктаз к загрязнению ТМ ранее была установлена рядом авторов (Плешакова и др., 2018; Поляк, Сухаревич, 2020). Наименьшая чувствительность зафиксирована для аскорбатоксидазы (101) и уреазы (102).

При загрязнении теллуром чернозема обыкновенного наибольшую информативность проявили активность инвертазы, протеазы, каталазы и пероксидазы. Активность аскорбатоксидазы является неинформативным показателем.

Для проведения общей оценки исследованных почв к загрязнению теллуром были рассчитаны значения ИПБС (рис. 1). Для расчета ИПБС использовали результаты исследования общей численности бактерий, активности каталазы и дегидрогеназ, длины корней и побегов пшеницы.

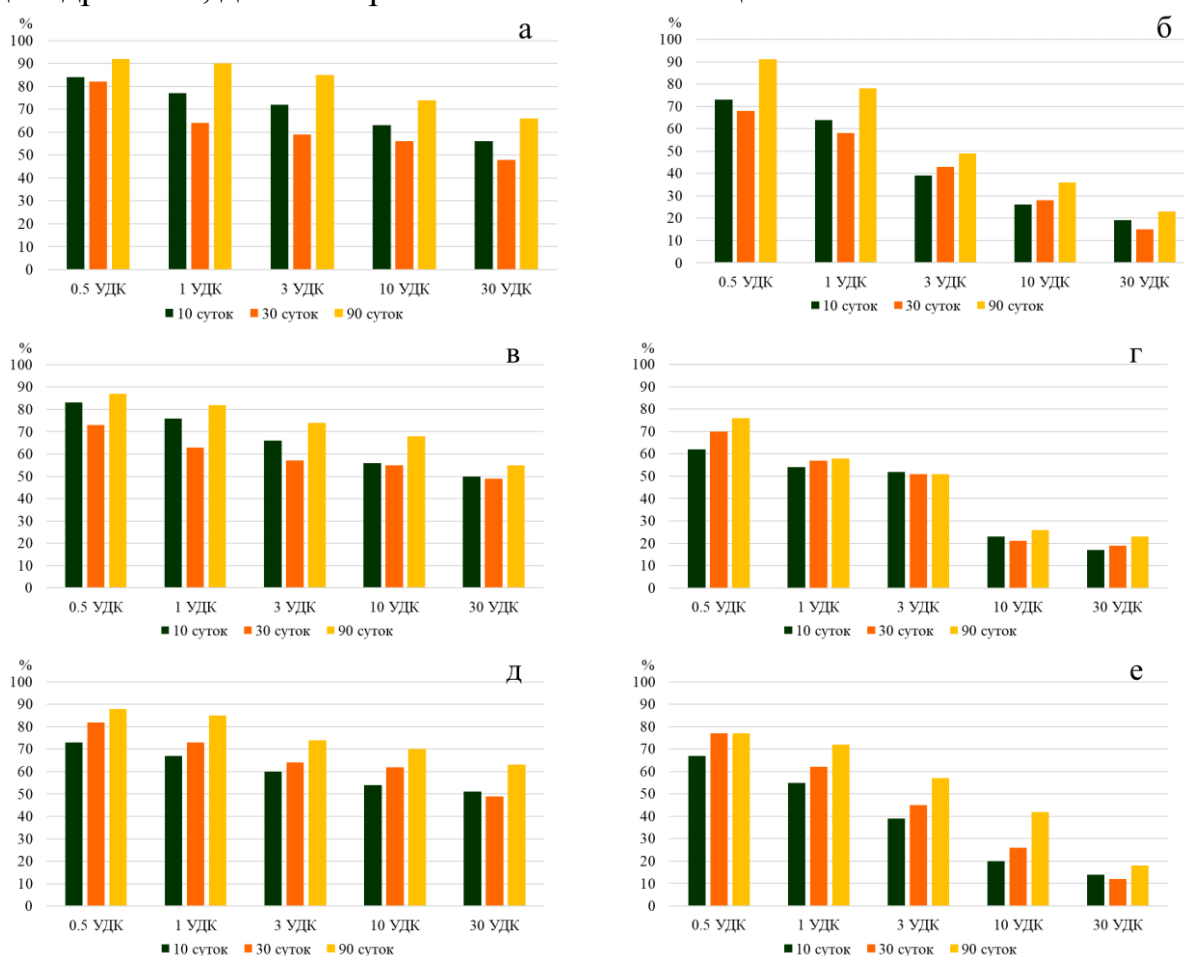


Рис. 1. Сравнительная оценка ИПБС почв при загрязнении теллуром в черноземе обыкновенном (а – оксид теллура, б – нитрат теллура), в бурой лесной почве (в – оксид теллура, г – нитрат теллура), в серопесках (д – оксид теллура, е – нитрат теллура), % от контроля

Уже 0,5 УДК (1,5 фоновых концентрации) теллура вызвали значительное снижение значения ИПБС, больше, чем на 10%, по сравнению с контролем (100%), а некоторые показатели снизились более чем на 25%. Полученные результаты свидетельствуют о нарушении информационных, биохимических, физико-химических, химических, целостных и физических функций почвы.

Столь высокая токсичность теллура в почвах может быть обусловлена тем, что этот элемент обладает низкой биологической абсорбцией. Его соединения, оказывают многочисленные негативные эффекты как на прокариотические, так и на эукариотические организмы в окружающей среде (Vávrová et al., 2021).

ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ЭКОТОКСИЧНОСТИ ТАЛЛИЯ ПО БИОЛОГИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ ПОЧВ

В главе изложены результаты модельного опыта по изучению влияния таллия на показатели биологической активности чернозема обыкновенного карбонатного, бурой лесной слабонасыщенной почвы и серопесков. В качестве примера в табл. 4 приведены результаты исследования чернозема обыкновенного.

Установлено, что в результате загрязнения исследуемых почв соединениями таллия (оксидом и нитратом) снижаются биологические свойства почв.

Эффект гормезиса зарегистрирован при внесении наименьшей из исследованных концентраций таллия (0,5 УДК) – наблюдается стимулирование активности уреазы в бурой лесной почве и в серопесках на 10 сут после загрязнения, активности дегидрогеназ в серопесках на 90 сут при загрязнении нитратом таллия, а также активности каталазы в черноземе обыкновенном на 30 и 90 сут после загрязнения оксидом и нитратом таллия. Статистически недостоверное увеличение активности каталазы зафиксировано в черноземе обыкновенном на 90 сут после загрязнения нитратом таллия в размере трех фоновых концентраций, активности дегидрогеназ – в серопесках на 30 сут инкубации при внесении 1,5 фоновых концентраций нитрата таллия. Полученные данные свидетельствуют о высокой токсичности таллия по сравнению с другими ТМ, для которых стимуляция биологических показателей почвы не редкость даже в значительно более высоких дозах (Колесников и др., 2006; Kabata-Pendias, 2011). Схожие стимулирующие эффекты для таллия были отмечены ранее (Liu et al., 2016; D'Orazio et al., 2020; Xiao et al., 2020). В исследованиях, проведенных по аналогичной методике, наблюдалось стимулирующее действие токсикантов (Hg, Cd, Pb, Cr, Cu, Zn, As и др.) относительно контроля (незагрязненной почвы) при загрязнении чернозема обыкновенного 1 и даже 10 ПДК (Колесников и др., 2000; Тимошенко и др, 2022).

Наибольшая токсичность таллия для чернозема обыкновенного и серопесков проявляется на 10 сут после загрязнения, а для бурой лесной почвы – на 30 сут. Возможно, резкий рост токсичности оксида таллия в бурой лесной почве на 30 сут связан с его растворением в кислой почве к этому сроку. Через 90 сут, в большинстве случаев, наблюдалось восстановление биологических

свойств почв, однако значений в контрольной незагрязненной почве достигнуто не было ни одним из исследованных биологических показателей. Эти результаты подтверждают вывод о высокой токсичности таллия, поскольку в экспериментах с другими ТМ, такими как Pb, Hg, Cd, Cu, Zn и др., многие биологические показатели на 90 сут восстанавливали значения до контрольных (в незагрязненной почве) и даже превышали их (Колесников и др., 2002, 2006, 2011).

Таблица 4

Изменение свойств чернозема обыкновенного после загрязнения таллием

Соединение	Срок моделирования, сут	Концентрация Тl, мг/кг						НСР _{0.05}
		1 фон (контроль)	1,5 фона	3 фона	9 фонов	30 фонов	90 фонов	
			0,5 УДК	1 УДК	3 УДК	10 УДК	30 УДК	
		0,47	0,71	1,41	4,23	14,1	42,3	
Общая численность бактерий, млрд/г								
Тl ₂ O ₃	10	2,1	2,0	1,9	1,4	1,3	1,0	0,1
	30	1,9	1,5	1,5	1,1	1,0	0,9	0,1
	90	1,8	1,5	1,4	1,2	0,9	0,6	0,1
Тl(NO ₃) ₃	10	2,1	1,0	0,9	0,9	0,8	0,6	0,1
	30	1,9	0,9	0,6	0,7	0,8	0,6	0,1
	90	1,8	1,2	0,8	0,6	0,7	0,5	0,1
Активность каталазы, мл кислорода/г почв, за 1 мин								
Тl ₂ O ₃	10	6,9	5,8	4,2	4,0	3,8	3,2	0,3
	30	12,1	12,9	12,0	10,6	10,4	9,6	0,8
	90	11,3	12,6	11,3	10,8	10,5	10,3	0,8
Тl(NO ₃) ₃	10	6,9	4,9	4,4	4,0	2,6	1,7	0,3
	30	12,1	13,1	11,0	9,1	7,7	3,8	0,7
	90	11,3	12,3	11,8	11,3	9,4	5,0	0,7
Активность дегидрогеназ, мг 2.3.5-трифенилтетразолия хлористого / 10 г почвы за 24 ч								
Тl ₂ O ₃	10	25,5	20,6	20,1	19,7	19,0	17,6	1,4
	30	35,6	37,3	36,4	34,6	34,6	34,2	2,5
	90	30,8	31,0	30,1	29,7	29,3	27,4	2,1
Тl(NO ₃) ₃	10	25,5	21,8	19,3	18,5	17,7	15,5	1,4
	30	35,6	32,9	31,7	28,1	27,1	26,6	2,2
	90	30,8	29,7	29,1	28,9	28,6	28,0	2,1
Активность пероксидазы, мг 1,4 бензохинона в 1 г почвы за 30 мин								
Тl ₂ O ₃	10	1,37	1,47	1,34	1,21	1,24	1,17	0,09
Тl(NO ₃) ₃		1,37	1,17	1,11	0,81	0,65	0,17	0,06
Активность полифенолоксидазы, мг 1, 4 бензохинона в 1 г почвы								
Тl ₂ O ₃	10	1,39	1,35	1,28	1,17	1,15	1,04	1,39
Тl(NO ₃) ₃		1,39	1,35	1,04	0,70	0,34	0,22	1,39
Активность аскорбатоксидазы, мг ДГАК в 1 г почвы за 1 час.								
Тl ₂ O ₃	10	6,5	7,2	7,1	6,9	6,4	6,0	0,5
Тl(NO ₃) ₃		6,5	6,2	6,4	6,4	6,6	6,7	0,5
Активность ферриредуктазы, мг Fe ₂ O ₃ в 100 г за 48 часов								
Тl ₂ O ₃	10	2,13	1,75	1,33	1,08	0,92	0,85	0,1
Тl(NO ₃) ₃		2,13	2,14	2,06	1,97	0,46	0,17	0,11

Окончание таблицы 4

Соединение	Срок моделирования, сут	Концентрация Tl, мг/кг						НСР _{0,05}
		1 фон (контроль)	1,5 фона	3 фона	9 фонов	30 фонов	90 фонов	
			0,5 УДК	1 УДК	3 УДК	10 УДК	30 УДК	
		0,47	0,71	1,41	4,23	14,1	42,3	
Активность инвертазы, мг глюкозы в 1 г почвы за 24 часа								
Tl ₂ O ₃	10	35,0	30,3	29,8	29,1	28,0	27,4	2,1
Tl(NO ₃) ₃		35,0	35,3	34,0	33,6	27,4	13,9	2,1
Активность уреазы, мг NH ₃ в г почвы за 24 часа								
Tl ₂ O ₃	10	3,1	3,3	3,2	3,2	3,2	2,8	0,2
Tl(NO ₃) ₃		3,1	3,2	3,0	3,0	2,9	2,8	0,2
Активность фосфатазы, мкг п-нитрофенола в 1 грамме почвы за 1 час								
Tl ₂ O ₃	10	0,29	0,28	0,26	0,25	0,23	0,23	0,02
Tl(NO ₃) ₃		0,29	0,22	0,15	0,13	0,12	0,05	0,01
Активность протеазы, мг глицина в 1 г почвы за 24 часа								
Tl ₂ O ₃	10	186,0	190,2	123,5	121,8	111,8	90,2	10
Tl(NO ₃) ₃		186,0	173,5	166,8	166,8	115,2	105,2	11
Длина корней пшеницы, %								
Tl ₂ O ₃	10	100	86	73	75	55	37	10
	30	100	78	78	44	25	6	7
	90	100	103	105	92	89	76	13
Tl(NO ₃) ₃	10	100	90	90	37	28	16	8
	30	100	55	44	39	34	11	6
	90	100	93	46	21	14	6	6
Длина побегов пшеницы, %								
Tl ₂ O ₃	10	100	83	70	74	53	42	9
	30	100	75	60	57	23	8	7
	90	100	104	95	83	72	39	11
Tl(NO ₃) ₃	10	100	79	76	39	20	10	7
	30	100	55	53	48	42	23	7
	90	100	76	39	31	21	15	6

Анализ микробиологической активности чернозема обыкновенного при загрязнении таллием (табл. 5) показал, что снижение базального дыхания (V_{basal}) происходило при внесении 3–30 УДК оксида таллия и всех концентраций нитрата. Углерод микробной биомассы ($C_{\text{мик}}$) снижался с ростом концентрации таллия. Отношение $C_{\text{мик}}/C_{\text{орг}}$ снижалось с увеличением концентрации таллия в почве, что свидетельствует о токсичности элемента.

Таблица 5

Показатели микробиологической активности чернозема обыкновенного при загрязнении таллием

		V _{basal}	C _{мик}	C _{мик} /C _{орг}	QR	qCO ₂
Контроль		0,23	307	0,48	0,04	0,58
Tl ₂ O ₃	0,5 УДК	0,27	301	0,35	0,06	0,73
	1 УДК	0,27	271	0,35	0,05	0,69
	3 УДК	0,19	124	0,32	0,04	0,59
	10 УДК	0,15	53	0,35	0,05	0,64
	30 УДК	0,01	3	0,25	0,04	0,55
Tl(NO ₃) ₃	0,5 УДК	0,21	283	0,53	0,04	0,55
	1 УДК	0,19	204	0,59	0,04	0,51
	3 УДК	0,18	119	0,47	0,04	0,58
	10 УДК	0,09	64	0,24	0,10	1,34
	30 УДК	0,01	3	0,15	0,19	2,34

Общая численность бактерий (53), длина корня пшеницы (59) и активность каталазы (56) проявили себя более чувствительными показателями к загрязнению чернозема обыкновенного таллием. Среди ферментов из класса гидролаз наибольшей чувствительностью к загрязнению соединениями таллия обладает активность фосфатазы (67) (Евстегнеева и др., 2023), из класса оксидоредуктаз – активность каталазы (56). Наименьшая чувствительность отмечена для уреазы (98) и аскорбатоксидазы (102).

Для всех исследованных биологических показателей в большинстве случаев наблюдалась тесная корреляция с содержанием в почве таллия ($r > -0.7$). Наблюдалась закономерность, отмеченная ранее для других ТМ (Колесников и др., 2006): общая численность бактерий показала себя наиболее чувствительным биологическим показателем, при этом корреляция общей численности бактерий с содержанием таллия была несколько ниже, чем у других биологических показателей.

По результатам исследования общей численности бактерий, активности каталазы и дегидрогеназ, длины корней и побегов пшеницы были рассчитаны ИПБС почв Юга России при загрязнении таллием (рис. 2).

Уже 0,5 УДК (1,5 фоновые концентрации) таллия вызвали значительное снижение значения ИПБС, больше, чем на 10%, а некоторые показатели снизились более чем на 25% по сравнению с контролем.

Причины негативного воздействия таллия на биологические свойства почв те же, что и у других ТМ – снижение проницаемости биологических мембран, ингибирование ферментов и, как следствие, нарушение обмена веществ (Судьина и др., 2019; Mazur et al., 2016; Sharma, Agrawal, 2005). Токсичность таллия связывают с его свойством замещать калий в метаболических процессах. Сходство биохимического и геохимического поведения таллия и калия объясняется близкими размерами их атомных радиусов (Liu et al., 2019c).

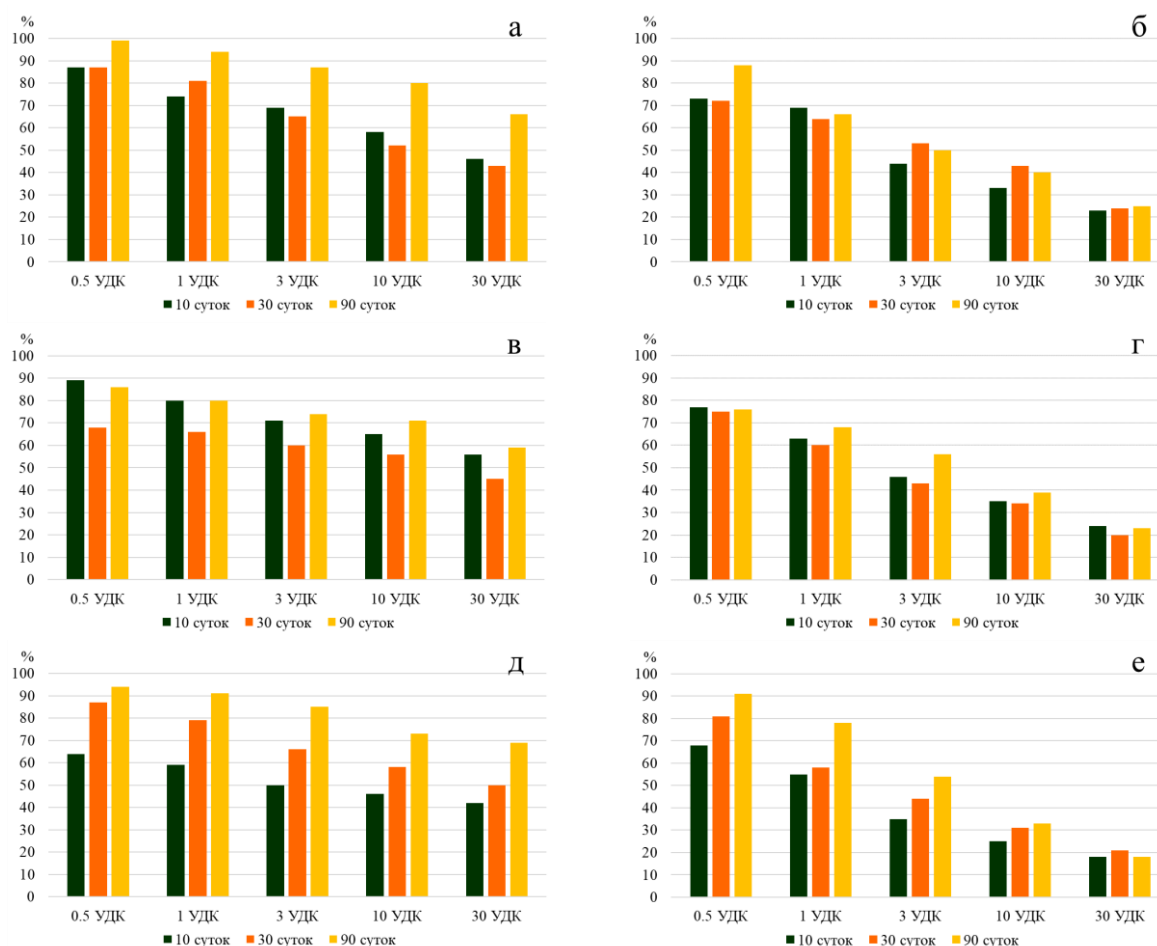


Рис. 2. Изменение интегрального показателя биологического состояния почв при загрязнении таллием в черноземе обыкновенном (а – оксид таллия, б – нитрат таллия), в бурой лесной почве (в – оксид таллия, г – нитрат таллия), в серопесках (д – оксид таллия, е – нитрат таллия), % от контроля

ГЛАВА 5. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ К ЗАГРЯЗНЕНИЮ ТЕЛЛУРОМ И ТАЛЛИЕМ ПОЧВ ЮГА РОССИИ

По уравнениям регрессии были определены концентрации теллура и таллия в почве, вызывающие снижение ИПБС на 10% от контроля (незагрязненной почвы) (табл. 6, 7).

Таблица 6

Критические значения содержания теллура и таллия в исследуемых почвах

		Почва		
Соединение	Срок	Чернозем обыкновенный	Бурая лесная почва	Серопески
Теллур, мг/кг				
TeO ₂	10 сут	0,67	0,65	0,57
	30 сут	0,61	0,57	0,62
	90 сут	1,32	0,71	0,74
Te ₂ O ₃ (OH)NO ₃	10 сут	0,59	0,55	0,56
	30 сут	0,58	0,57	0,55
	90 сут	0,77	0,59	0,63

Таблица 7

Критические значения содержания таллия и теллура в исследуемых почвах

Таллий, мг/кг				
Tl ₂ O ₃	10 сут	0,65	0,61	0,16
	30 сут	0,73	0,43	0,19
	90 сут	2,15	0,57	0,46
Tl(NO ₃) ₃	10 сут	0,51	0,41	0,15
	30 сут	0,49	0,41	0,15
	90 сут	0,62	0,49	0,24

Наибольшее токсическое действие теллур проявил в форме нитрата на 30 сут после загрязнения в черноземе обыкновенном и в серопесках, и на 10 сут в бурой лесной почве. Таллий наиболее сильно ингибировал показатели в форме нитрата на 10 сут после загрязнения в бурой лесной почве и в серопесках, и на 30 сут в черноземе обыкновенном. Эти концентрации предложено считать критически значимыми для функционирования почвы. Таким образом, предложены следующие экологически безопасные концентрации теллура и таллия в почвах: 0,58 и 0,49 мг/кг в черноземе обыкновенном карбонатном, 0,55 и 0,41 мг/кг в бурой лесной слабонасыщенной почве, 0,55 и 0,15 мг/кг в серопесках.

Большую устойчивость к загрязнению теллуром и таллием проявил чернозем обыкновенный. Это объясняется свойствами чернозема обыкновенного (тяжелым гранулометрическим составом, слабощелочной реакцией среды (рН 7,8) и более высоким содержанием гумуса, относительно серопесков), которые способствуют малой подвижности загрязняющих веществ по сравнению с другими исследованными почвами. Бурая лесная почва проявила меньшую устойчивость к загрязнению теллуром и таллием по сравнению с черноземом обыкновенным, несмотря на тяжелый гранулометрический состав и примерно одинаковое содержание гумуса (4,8 %), это связано с кислой реакцией среды (рН 5,8). Меньшая устойчивость серопесков вызвана низким содержанием гумуса (3,1%) и легким гранулометрическим составом. Почвы с более низким рН снижают стабильность элементов, делая соединение более подверженным к дальнейшей миграции в почвенной толще (Grösslová, 2015). Ранее также отмечалась зависимость снижения уровня биологических показателей от подвижности тяжелых металлов в почве и большая устойчивость к загрязнению более гумусированных почв (Минкина, 2006; Терехова, 2021; Kolesnikov et al, 2021b).

В предыдущих исследованиях, проведенных на кафедре экологии были определены критические значения содержания в почве тяжелых металлов, вызывающие снижение ИПБС на 10 % (Колесников и др., 2008, 2009а, 2009б, 2011б.). В таблице 8 проведено сравнение критических значений для Те и Тl с другими ТМ.

Таблица 8

**Критические значения содержания тяжелых металлов
в черноземе обыкновенном**

№	Элемент	Фоновая концентрация, мг/кг	Критическое значение*, мг/кг	Критическое значение, фоновые концентрации
1.	Te	0,5	0,58	1,16
2.	Tl	0,47	0,49	1,04
3.	As	10,2	30	2,9
4.	Ba	434	972	2,2
5.	Cd	0,17	1,5	8,8
6.	Co	13,9	44,6	3,2
7.	Cr	126	140	1,1
8.	Cu	29,4	130	4,4
9.	Ga	12,1	38,1	3,1
10.	Mn	847	1600	1,9
11.	Nb	12	44,5	4,7
12.	Ni	44,1	130	2,9
13.	Pb	22,2	130	5,9
14.	Sb	0,9	6,7	7,4
15.	Sc	10,9	36,9	2,9
16.	Se	2,07	5,4	2,6
17.	Sn	1,73	12	6,9
18.	Sr	118	450	3,8
19.	V	82,8	300	3,6
20.	W	1,45	12	8,3
21.	Y	26	166,8	6,4
22.	Yb	2,92	11,8	4,0
23.	Zn	80,5	200	2,5

Примечание: *для Te и Tl — Evstegneeva et al., 2024, остальные элементы — Колесников и др., 2008, 2009а, 2009б, 2011б.

Как видно из таблицы, нарушение этих важнейших функций при загрязнении почв другими тяжелыми металлами (As, Ba, Cd, Co, Cu, Ga, Mn, Nb, Ni, Pb, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, V, W, Y, Yb, Zn) происходит при бóльших концентрациях в почве (Колесников и др., 2008, 2009а, 2009б, 2010, 2011а, 2011б, 2013). Экотоксичность теллура и таллия проявляется при содержании в почве уже 1,16–1,04 фона, то есть значительно в меньших концентрациях, чем других тяжелых металлов.

ВЫВОДЫ

1. Полученные результаты свидетельствуют о высокой экотоксичности теллура и таллия. Снижение значений интегрального показателя биологического состояния почв на 10% и более отмечены уже при превышении фона теллура и таллия в 1,1–1,5 раза, что свидетельствует о нарушении важнейших экологических функций почвы.

2. В результате загрязнения соединениями теллура и таллия (оксидом и нитратом) биологические показатели состояния исследованных почв (чернозема обыкновенного карбонатного, бурой лесной слабонасыщенной почвы и серопесков) снижались. Эффект гормезиса был зарегистрирован только для отдельных биологических показателей при внесении наименьшей из исследованных концентраций теллура и таллия. Это также свидетельствует о высокой токсичности данных поллютантов.

3. Теллур и таллий проявили бóльшую токсичность в форме нитратов, чем в форме оксидов, что, по-видимому, связано с разной растворимостью данных соединений, обуславливающих разную подвижность поллютантов в почве.

4. Динамика изменения биологических показателей состояния почвы после загрязнения теллуrom и таллием сильно зависит от типа почвы. В большинстве случаев экотоксичность теллура и таллия в черноземе и серопесках была более выражена через 10 сут после контаминации, в бурой лесной почве — через 30 сут. Улучшение биологических свойств чернозема и бурой лесной почвы наблюдалось на 90 сут, а серопесков — уже на 30-е сут после загрязнения. Однако биологические показатели ни в одной почве не достигли значений в незагрязненной (контрольной) почве.

5. Экотоксичность таллия значительно различалась в почвах с контрастными свойствами: в наибольшей степени экотоксичность проявилась в серопесках (легких почвах), в меньшей степени — в бурых лесных почвах (кислых), в наименьшей степени — в черноземах обыкновенных (слабощелочных почвах). В то же время теллур проявил схожую степень экотоксичности в исследованных почвах. Возможно, это связано с тем, что теллур является анионообразующим элементом, подвижность которого проявляется не только в кислых, но и в слабощелочных почвах.

6. В большинстве случаев микробиологические показатели и показатели интенсивности выделения углекислого газа (общая численность бактерий, скорость микробного дыхания, углерод микробной биомассы) и показатели фитотоксичности (длина корней и побегов пшеницы) проявили высокую чувствительностью к загрязнению почв теллуrom и таллием, но не всегда хорошо коррелировали с концентрацией поллютанта в почве.

7. Показатели ферментативной активности (активность каталазы, дегидрогеназ, пероксидазы, полифенолоксидазы, ферриредуктазы, инвертазы, уреазы, фосфатазы, протеазы), как правило, были менее чувствительны, но отличались более тесной корреляцией с концентрацией металлов в почве.

Оксидоредуктазы были более чувствительны и информативны, чем гидролазы. Активность аскорбатоксидазы при загрязнении не изменялась.

8. Концентрации теллура и таллия, вызывающие нарушение экосистемных функций почв, составляют соответственно 0,58 и 0,49 мг/кг в черноземе обыкновенном карбонатном, 0,55 и 0,41 мг/кг в бурой лесной слабоненасыщенной почве, 0,55 и 0,15 мг/кг в серопесках.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По теме диссертационной работы опубликованы 24 научные работы.

Статьи, опубликованные в журналах, входящих в базы данных международных индексов научного цитирования Scopus и/или Web of Science

1. Assessment of ecotoxicity of tellurium in soils of contrasting properties / S. Kolesnikov, **N. Evstegneeva**, T. Minnikova, A. Timoshenko, N. Tsepina, K. Kazeev // *Emerging Contaminants*. – 2024 – Vol. 10, № 3. P. 100334. – DOI 10.1016/j.emcon.2024.100334 (Q1)
2. Estimation of the Enzymatic Activity of Haplic Chernozem under Contamination with Oxides and Nitrates of Ag, Bi, Te and Tl / T. Minnikova, S. Kolesnikov, **N. Evstegneeva**, A. Timoshenko, N. Tsepina // *Agronomy*. – 2022. – Vol. 12, № 9. – P. 2183. – DOI 10.3390/agronomy12092183 (Q1)
3. Assessment of Thallium Ecotoxicity by Biological Properties of Soils / **N. A. Evstegneeva**, S. I. Kolesnikov, A. N. Timoshenko, T. V. Minnikova, N. I. Tsepina, K. Sh. Kazeev // *Eurasian Soil Science*. – 2024. – Vol. 57, № 3. – P. 482-492. – DOI 10.1134/S1064229323602998 (Q2)
4. Assessment of Enzymatic Activity of Haplic Chernozem Contaminated with Ag, Bi, Te, and Tl / T.V. Minnikova, S.I. Kolesnikov, **N.A. Evstegneeva**, A.N. Timoshenko, N.I. Tsepina, K.Sh. Kazeev // *Eurasian Soil Science*. – 2024. – Vol. 57, № 3. – P. 395-408. DOI 10.1134/S1064229323603037 (Q2)
5. Оценка экотоксичности тяжелых металлов, металлоидов и неметаллов, содержащихся в отходах предприятий горной промышленности / **Н. А. Евстегнеева**, С. И. Колесников, Т. В. Минникова, А. Н. Тимошенко // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2023. – № 5–1. – С. 73-85. – DOI 10.25018/0236_1493_2023_51_0_73 (Q2)
6. Assessment of the Health of Soils Contaminated with Ag, Bi, Tl, and Te by the Intensity of Microbiological Activity / T. Minnikova, S. Kolesnikov, D. Khoroshaev, N. Tsepina, **N. Evstegneeva**, A. Timoshenko // *Life*. – 2023. – Vol. 13, № 7. – P. 1592. – DOI 10.3390/life13071592 (Q2)
7. Assessment of the Ecotoxicity of Ag, Bi, Te and Tl According to the Biological Indicators of Haplic Chernozem / S. Kolesnikov, T. Minnikova, N. Tsepina, **N. Evstegneeva**, A. Timoshenko // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12, № 24. – P. 12854. – DOI 10.3390/app122412854 (Q2)
8. Assessment of the Ecotoxicity of Pollution by Potentially Toxic Elements by Biological Indicators of Haplic Chernozem of Southern Russia (Rostov region) / S.

Kolesnikov, T. Minnikova, K. Kazeev, Y. Akimenko, **N. Evstegneeva** // Water, Air, & Soil Pollution. – 2022. – Vol. 23, № 1. – P. 18. – DOI 10.1007/s11270-021-05496-3 (Q2)

**Другие публикации, входящие в базы данных международных индексов
научного цитирования Scopus и/или Web of Science**

9. An Assessment of the Ecological State of Cambisols Contaminated by Tellurium Compounds / T. Minnikova, S. Kolesnikov, N. Tsepina, D. Khoroshaev, N. Evstegneeva, A. Timoshenko // The chemistry of elements: rubidium, tellurium, ruthenium and gadolinium / editor Larry L. Saenz. – New York : Nova Science Publishers, 2023. – P. 223-242. – (Series: Chemistry Research and Applications). – ISBN 979-8-89113-025-8

**Статьи, опубликованные в журналах, входящих в Перечень рецензируемых
научных изданий ЮФУ и ВАК**

10. Сравнительная оценка токсичности химических элементов по численности бактерий в серопесках / **Н. А. Евстегнеева**, С. И. Колесников, Т. В. Минникова, А. Н. Тимошенко, Н. И. Цепина, К. Ш. Казеев // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2022. – № 3 (215). – С. 120-128. – DOI 10.18522/1026-2237-2022-3-120-128.

11. Влияние загрязнения таллием на активность ферментов циклов углерода, азота и фосфора в почвах разной буферности / **Н. А. Евстегнеева**, С. И. Колесников, Т. В. Минникова, А. Н. Тимошенко, Н.И. Цепина, К.Ш. Казеев // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2023. – № 4 (220). – С. 156-163. – DOI 10.18522/1026-2237-2023-4-156-163

12. Влияние загрязнения чернозема обыкновенного Ag, Bi, Te, Tl на прорастание и интенсивность начального роста озимой пшеницы / А. Н. Тимошенко, С. И. Колесников, **Н. А. Евстегнеева**, Т. В. Минникова, Н. И. Цепина, К. Ш. Казеев // Агрохимический вестник. – 2022. – № 6. – С. 83-89. – DOI 10.24412/1029-2551-2022-6-016.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ИПБС – интегральный показатель биологического состояния

НСР – наименьшая существенная разность

ПДК – предельно допустимая концентрация

ТМ – тяжелые металлы

сут – сутки

УДК – условно допустимая концентрация