

ГОРДЕЕВА ВАЛЕНТИНА АНДРЕЕВНА

**ФИТОМАССА И ТЕМПЫ ЕЕ РАЗЛОЖЕНИЯ
В ТРАВЯНЫХ СООБЩЕСТВАХ
В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ**

03.02.08 – экология (биология)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Нижний Новгород
2018

Работа выполнена на кафедре естественных наук и физико-математического образования Нижнетагильского государственного социально-педагогического института (филиал) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный профессионально-педагогический университет»

Научный руководитель: доктор биологических наук, доцент,
декан факультета естествознания, математики
и информатики Нижнетагильского государственного
социально-педагогического института
(филиал) ФГАОУ ВО «Российский государственный
профессионально-педагогический университет» (г. Нижний Тагил)
Жуйкова Татьяна Валерьевна

Официальные оппоненты: доктор биологических наук, профессор,
профессор кафедры физиологии
и общей биологии ФГБОУ ВО «Башкирский
государственный университет» (г. Уфа)
Ишмуратова Майя Мунировна

доктор биологических наук, старший научный
сотрудник, заведующая лабораторией
популяционной радиобиологии ФГБУН
Институт экологии растений и животных
УрО РАН (г. Екатеринбург)
Позолотина Вера Николаевна

Ведущая организация: ФГБУН Ботанический сад УрО РАН
(г. Екатеринбург)

Защита состоится «___» _____ 2018 г. в _____ часов на заседании
диссертационного совета Д212.166.12 при ННГУ по адресу: 603950 г. Нижний
Новгород, пр. Гагарина, д. 23, корп. 1, ауд. 321.

Е-mail: dis212.166.12@gmail.com; факс (831) 462–30–85.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ННГУ и на сайте ННГУ по
адресу: https://diss.unn.ru/files/2017/796/diss-Gordeeva_-796.pdf, с авторефера-
том в сети Интернет на сайте ВАК России по адресу: <http://vak.ed.gov.ru/dis-list>.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д212.166.12, кандидат
биологических наук



Н. И. Зазнобина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Длительное техногенное загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами и соединениями серы приводит к изменению основных параметров растительных сообществ и оказывает значительное влияние на обязательный компонент наземных биогеоценозов – почвенный микробоценоз. Большая часть работ экотоксикологического характера, выполненных в районах, расположенных вокруг точечных источников эмиссии, посвящена изучению различных параметров лесных экосистем (Мазная, Лянгузова, 2006; Исаева, 2007; Миронычева-Токарева, Паршина, 2008; Калашникова, 2014). В меньшей степени изучены продукционные процессы в травяных сообществах (Хантемирова, 1997; Горчаковский, 1999; Жуйкова, 2009; Гордеева, Жуйкова, 2014). Кроме того, базовыми процессами в экосистемах являются не только синтез фитомассы, но и ее разложение (Hooper et al., 2012). По отдельности оба эти процесса достаточно хорошо изучены (Воробейчик, 1998; Курачев, Батурина, 2005; Андреяшкина, 2014 и др.). Комплексные исследования, отражающие одновременное изучение надземной фитомассы, темпов ее разложения и участия в них почвенной микробиоты в травяных сообществах, формирующихся на фоновых и техногенно преобразованных территориях, с учетом не только токсического, но и других сопутствующих факторов, мало численны. Между тем сбалансированность между объемом синтезированной надземной фитомассы и последующим ее разложением обеспечивает устойчивое функционирование природных биогеоценозов. В связи с чем оценка этих процессов и интенсивности биогенного обмена в фитоценозах техногенно нарушенных территорий имеет большое значение.

Цель исследования – изучить фитомассу и темпы ее разложения в травяных сообществах, формирующихся на залежах и отвалах в градиенте химического загрязнения почв тяжелыми металлами.

В соответствии с целью работы были поставлены следующие **задачи**:

- 1) оценить фитомассу травяных фитоценозов, произрастающих в градиенте химического загрязнения почв тяжелыми металлами, и выявить факторы, ее определяющие;
- 2) оценить темпы разложения растительных остатков в сообществах травянистых растений и выявить факторы, влияющие на данный показатель;
- 3) проанализировать влияние техногенного загрязнения почв на сбалансированность обменных процессов, выраженную через разность между синтезированной и разложившейся фитомассой в травяных сообществах;
- 4) изучить численность основных эколого-трофических и физиологических групп почвенных микроорганизмов и охарактеризовать функциональную структуру микробиоценозов фоновых и техногенно нарушенных территорий;
- 5) оценить участие деструкционного микробиологического комплекса в разложении растительных остатков в травяных фитоценозах.

Научная новизна. Впервые изучены продукционно-деструкционные процессы, включающие оценку фитомассы и темпов ее разложение в сообществах травянистых растений фоновых и техногенно нарушенных территорий Среднего Урала, с учетом комплекса влияющих на эти процессы факторов. Это позво-

лило выявить различия сообществ агроземов и техноземов по величине фитомассы и чувствительности к погодным факторам, а также определить ведущие погодные факторы, оказывающие существенное влияние на фитомассу техноземов.

Установлено влияние структуры и химического состава разлагающегося растительного материала, срока его экспонирования, физико-химических особенностей почв, в том числе и их загрязнения тяжелыми металлами, на скорость разложения растительных остатков в травяных сообществах Притагильской зоны Среднего Урала.

Показано, что сбалансированность биогенного обмена фитомассы в большей степени зависит от физико-химических свойств почв: на техноземах она выше, чем на агроземах. Сочетанное действие высокого загрязнения и молодости сообществ приводит к наибольшему дисбалансу между синтезированной и разложившейся надземной фитомассой.

Впервые в условиях промышленной территории Притагильской зоны Среднего Урала изучена численность основных эколого-трофических и физиологических групп почвенных микроорганизмов при различных уровнях загрязнения почвы тяжелыми металлами. Изучена роль почвенных деструкторов в процессах разложения растительных остатков в травяных сообществах фоновой и техногенно нарушенных территорий.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные результаты вносят существенный вклад в развитие представлений о механизмах функционирования сообществ травянистых растений техногенно загрязненных тяжелыми металлами территорий. Они могут быть использованы для оценки устойчивости экосистем к пессимальным воздействиям различной природы, в том числе техногенной, позволяют проследить реакцию фитоценозов, сформировавшихся в условиях различного загрязнения тяжелыми металлами, на действие погодных факторов. Полученные данные представляют интерес с точки зрения биогеохимической экологии в рамках изучения деформации биогенного обмена, включающего синтез и разложение органического вещества в деградированных в результате антропогенного загрязнения среды биогеоценозах. Результаты исследования могут быть использованы при разработке рекомендаций для эколого-фитоценотического и микробиологического мониторинга и прогнозирования последствий техногенного загрязнения среды тяжелыми металлами для сообществ травянистых растений и почвенной биоты на территории Свердловской области.

Полученные при выполнении диссертационного исследования результаты могут быть рекомендованы к использованию Министерством природных ресурсов Свердловской области для контроля за состоянием природных сообществ, при разработке регламентов и организации системы экологического мониторинга антропогенно нарушенных территорий, при выборе модельных объектов и показателей состояния биоты природных сообществ.

Результаты диссертационного исследования используются при чтении учебных курсов «Экологическая токсикология», «Региональная экология»,

«Микробиология» в ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет» (филиал в г. Нижний Тагил).

Положения, выносимые на защиту:

1. Химическое загрязнение не нарушает общей закономерности, проявляющейся в зависимости фитомассы от сукцессионного возраста травяных сообществ и особенностей почв агроземов и техноземов, но приводит к повышению чувствительности фитоценозов по показателю фитомассы к погодным факторам, в наибольшей мере проявляющейся при сочетанном действии высокого уровня химического загрязнения и сукцессионной молодости сообществ. Надземная и подземная фитомасса сообществ техноземов зависит от суммы осадков за периоды октябрь – ноябрь предыдущего года, январь – май текущего года и гидротермического коэффициента Селянинова за сентябрь.

2. Темпы разложения надземной фитомассы в травяных фитоценозах агроземов ниже, чем техноземов, и определяются на начальных этапах в большей степени структурой и химическим составом разлагающихся растительных остатков, на конечных – свойствами почв, определяющими их принадлежность к группе агроземы и техноземы, уровнем их загрязнения тяжелыми металлами и численностью аэробных и анаэробных целлюлозолитиков, входящих в состав деструкционного звена.

3. Интенсивность биогенного обмена, оцененная по разности между количеством синтезированной и разложившейся за год надземной фитомассы, на техноземах выше, чем на агроземах, что определяется более высокой надземной фитомассой, но низкой скоростью ее разложения на агроземах по сравнению с техноземами.

Соответствие паспорту научной специальности. Результаты проведенного исследования соответствуют области исследования специальности 03.02.08 – экология, конкретно системная экология.

Степень достоверности и апробация результатов. Пятилетние исследования фитомассы сообществ травянистых растений, выполненные в пределах постоянных пробных площадей; длительный (24 месяца) полевой эксперимент по изучению темпов разложения растительных образцов, проведенный на этих же территориях; анализ значительного почвенно-микробиологического материала, который собран с использованием апробированных принципов и методик; комплексный подход к исследуемой проблеме функционирования сообществ травянистых растений и почвенных микробоценозов техногенно нарушенных территорий; применение математико-статистических методов (методов описательной статистики, корреляционного, регрессионного, дисперсионного, дискриминантного, кластерного) для анализа эмпирического материала и интерпретации полученных результатов обеспечивают достоверность изложенных в диссертационной работе положений и выводов.

Материалы диссертационного исследования были представлены на международных, всероссийских и региональных научно-практических конференциях: «Антропогенная трансформация природной среды» (Пермь, 2010), «Принципы и способы сохранения биоразнообразия» (Йошкар-Ола, 2010), «Почвы Сибири: прошлое, настоящее, будущее» (Новосибирск, 2010), «Биологический монито-

ринг природно-техногенных систем» (Киров, 2010, 2011), «Экология: от южных гор до северных морей» (Екатеринбург, 2010), «Экология: сквозь время и расстояние» (Екатеринбург, 2011), «Экология: традиции и инновации» (Екатеринбург, 2012), «Современные проблемы популяционной экологии, геоботаники, систематики и флористики» (Кострома, 2011), «Биологическое разнообразие растительного мира Урала и сопредельных территорий» (Екатеринбург, 2012), «Биологические системы: устойчивость, механизмы и принципы функционирования» (Нижний Тагил 2010, 2012, 2017), «Тобольск научный – 2014» (Тобольск, 2014), «Биогеохимия техногенеза и современные проблемы геохимической экологии» (Барнаул, 2015).

Работа выполнена в рамках проектов Минобрнауки РФ (гос. задание № 1.1.08, госконтракты № 5.5329.2011, № 16.518.11.7069), Правительства Свердловской области и РФФИ (проект № 13-04-96056-р_урал_а), Программы Президиума УрО РАН (проект № 12-И-4-2051).

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в постановке задач исследования, выполнении всех его этапов. В течение 5 лет изучал фитомассу травяных сообществ, в этих же фитоценозах проводил полевые эксперименты по изучению актуальной скорости разложения растительных остатков и изучение почвенного микробиологического комплекса, включая деструкционное звено. Ею выполнена камеральная обработка и статистический анализ полевого и экспериментального материала, обсуждение и теоретическое осмысление полученных результатов. Все выносимые на защиту результаты и положения получены лично автором или при его непосредственном участии.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 28 работ, из них 6 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, в том числе 6 – в изданиях, включенных в базы Scopus и/или Web of Science.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, выводов, списка литературы. Работа изложена на 227 странице, основной текст диссертации содержит 30 таблиц и 29 рисунков. Список литературы включает 391 источник, в том числе 108 – на иностранных языках.

Благодарности. Выражаю глубокую благодарность и признательность научному руководителю д-ру биол. наук, проф. кафедры естественных наук и физико-математического образования Т. В. Жуйковой за помощь на всех этапах работы, совместное обсуждение материала, ценные замечания и советы. Искренне благодарю д-ра биол. наук, проф. В. С. Безеля и канд. биол. наук Э. В. Мелинг за помощь при обсуждении и интерпретации результатов, д-ра биол. наук, акад. РАН И. Б. Ившину, канд. биол. наук Л. В. Костину, канд. биол. наук Т. Н. Каменских (Институт экологии и генетики микроорганизмов, г. Пермь) за организацию и методическую помощь в проведении микробиологических исследований, канд. биол. наук, ст. научн. сотр. ИЭРиЖ УрО РАН С. Ю. Кайгородову – за помощь при проведении почвенных исследований, д-ра биол. наук, проф. ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет» А. Р. Ишбирдина за помощь в составлении синтаксономических характеристик, канд. с.-х. наук, ст. научн. сотр. ИЭРиЖ УрО РАН И. Е. Бергмана за помощь при анализе данных по зависимости фитомассы от погодных условий.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Обзор литературы

В главе на основе данных отечественной и зарубежной литературы раскрыто понятие биологической продуктивности фитоценозов (Суховольский, Иванова, 2013; Chapin, Eviner, 2003), описаны методы ее изучения (Шалыт, 1960; Морозова, 1990; Косых, 2008; Дронин, Тельнова, Калущкова, 2014; Prochu global ... , 2008; Greenness in semi-arid ... , 2012). Охарактеризованы факторы, влияющие на величину прироста фитомассы: погодные факторы (Лисецкий, 2012; Мелинг, Жуйкова, 2013; 2015; Суховольский, Иванова, 2013; Chapin, Eviner, 2003), антропогенное загрязнение (Жуйкова, 2009; Андреяшкина, 2012; Горчакова, 2014; Состояние травянистой растительности ... , 2013; Оценка степени техногенного загрязнения ... , 2015; Prasad et al., 2001; Pietrini et al., 2003; Kosobrukhov et al., 2004; Khudsar et al., 2004) и др. Рассмотрены темпы разложения растительных остатков (Gartner, Cardon, 2004; Rates of litter decomposition ... , 2008 и др.) и факторы, их определяющие (Паршина, 2007; 2009; Головацкая, Никонова, 2013 и др.). Проанализирован состав почвенной микробиоты, участвующей в разложении (Булахов, Пахомов, Рева, 2005; Узбек, 2006; Семёнова, Ильбулова, Суюндуков, 2011 и др.).

Глава 2. Физико-географическая и экологическая характеристика участков исследования

2.1–2.3 Физико-географическая и экологическая характеристика Свердловской области и Притагильской зоны. Район исследования расположен на территории г. Нижнего Тагила (58° с. ш., 60° в. д.), таежная географическая зона, подзона южной тайги, Средний Урал (Свердловская область). В данных разделах приведена краткая характеристика географического положения, рельефа, почв, климата и растительности (Прокаев, 1963; Агроклиматические ресурсы..., 1978) исследуемой территории. Для района характерна техногенная трансформация природных комплексов как результат трехсотлетней деятельности горнодобывающей и металлургической промышленности, выраженная в изменении физико-химических параметров почв, в том числе депонированием в них тяжелых металлов и растительных сообществ.

2.4 Характеристика пробных площадей. *Характеристика техногенной нагрузки на исследуемых участках.* Зоны техногенной трансформации выделены на основе концентраций тяжелых металлов в почвах и расчетного индекса токсической нагрузки (Безель, Жуйкова, Позолотина, 1998). Концентрации подвижных форм ионов металлов в почвах достигают: для Cu^{2+} – 288, Pb^{2+} – 23, Cd^{2+} – 2, Zn^{2+} – 343 мкг/г. Содержание Cd^{2+} , Cu^{2+} и Zn^{2+} в почве на загрязненных территориях многократно превышает фоновые уровни: в буферной зоне – в 10, 8, 13 раз; в импактной – в 78, 10 и 29 раз, соответственно. Названия зон используются в соответствии с номенклатурой ЮНЕП (Global..., 1973). В пределах зон выделены участки: фоновый (Ф: $Z = 1.0$ отн. ед.), буферные (Б-1: $Z = 3.3$ и Б-2: $Z = 6.2$ отн. ед.) и импактные (И-1: $Z = 22.8$ и И-2: $Z = 30.0$ отн. ед.).

Кроме уровней токсической нагрузки, рассматриваемый градиент сопряжен с комплексом физико-химических параметров почв, позволяющих отно-

силь их к двум группам: агроземы (Ф, Б-1) и техноземы (Б-2, И-1, И-2). Агроземы расположены на залежных землях (возраст более 25 лет), характеризуются средней насыщенностью основаниями ($V = 76 \%$), низкой и средней обеспеченностью подвижными соединениями фосфора и калия. Содержание легкогидролизуемого азота в агроземах среднее и низкое. Техноземы расположены в техногенных ландшафтах (на промышленных отвалах возрастом более 45 лет). Это молодые почвы, формируемые по буроземному и литоземному типу. Насыщенность почв основаниями высокая – до 99 %, в обменном комплексе преобладает кальций. Обеспеченность обменными формами фосфора и калия высокая и очень высокая, обеспеченность азотом при слаборазвитой дернине низкая, при наличии дернины – высокая.

Синтаксономическая характеристика исследуемых фитоценозов. Фито-масса изучена в травяных сообществах, формирующихся на залежах и техногенных субстратах. Ф – безранговое сообщество *Deschampsia caespitosa-Festuca pratensis* [Arrhenatheretalia]. Б-1 – безранговое сообщество *Alchemilla vulgaris-Festuca pratensis* [Arrhenatheretalia/Carici macrourae-Crepidetalia sibiricae]. Б-2 – безранговое сообщество *Carum carvi-Festuca pratensis* [Arrhenatheretalia]. И-1 – безранговое сообщество *Tussilago farfara-Calamagrostis arundinacea* [Dauco-Melilotion/Agropyron repentis]. И-2 – безранговое сообщество *Latyrus pratensis-Calamagrostis arundinacea* [Dauco-Melilotion/Agropyron repentis].

Сообщества участков фоновой и буферной зон относятся к классу *Molinio-Arrhenatheretea* и соответствуют гликофитному варианту лугового типа растительности; импактных – переходные между классами *Artemisietea vulgaris* (рудеральные сообщества дву-, многолетников) и *Agropyretea repentis* (рудеральные сообщества с преобладанием многолетних злаков, представляющие предшествующую лугам стадию восстановительной сукцессии (злаковые сообщества).

Сообщества агроземов различны по видовому богатству (Ф – 50 видов, Б-1 – 55 видов) и по количеству видов предшествующих стадий: в Ф – встречаются 4 вида (*Cirsium setosum* (Willd.), Bess., *Vicia hirsute* (L.) S.F. Gray, *Artemisia vulgaris* L., *Linaria vulgaris* Mill.), в Б-1 – один вид (*Cirsium setosum* (Willd.), Bess.). На участке Ф отмечается только начало задерновывания пахотного горизонта Р, на Б-1 сформирована связная дернина (горизонт АУ – 1–4 см) (Особенности почв..., 2015). Все сказанное свидетельствует о том, что сообщество участка Ф сукцессионно моложе сообщества участка Б-1.

На техноземах изучены одно луговое и два злаковых сообщества с доминированием *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth., сукцессионное развитие которых идет в направлении формирования лугового сообщества. Процесс перехода от злаковой стадии к луговой сопровождается повышением видового богатства, ослаблением роли *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth. как доминанта. Это позволяет рассматривать уровень его проективного покрытия как показатель сукцессионного возраста сообществ на злаковой стадии (Динамика травяных сообществ..., 2017). Количество видов в сообществе участка И-1 – 42, а И-2 – 32 (Особенности почв..., 2015). Проективное покрытие доминанта в сообществе участка И-1 – слабое, изменяется за анализируемый период от 17 до 20 %. В сообществе участка И-2 – умеренное, колеблется в пределах 24–38 %. С учетом приведенных по-

казателей можно выстроить сообщества техноземов в градиенте сукцессионного возраста следующим образом: И-2, И-1, Б-2.

Глава 3. Материал и методы исследования

Методологический аспект работы – комплексное изучение продукционно-деструкционных процессов в травяных сообществах фоновых и техногенно нарушенных территорий Притагильской зоны Среднего Урала и выявление влияющих на них факторов. Исследования почвенных микробоценозов фоновых и техногенно нарушенных территорий и оценка участия деструкционного звена в разложении растительных остатков.

3.1 Методы определения физико-химических показателей почвы. На каждом участке все физико-химические показатели оценивали в пяти точках (5 биологических повторностей $\times$ 5 участков исследования, $N_{\text{общ.}} = 25$). Определение *структурного состава почвы* проводили путем ее просеивания через колонку сит с последующим вычислением процента каждой фракции (Практикум..., 1991). Определение *подвижных форм калия* проводили по методу Я. В. Пейве, *подвижных форм фосфора* – по методу А. Т. Кирсанова. *Гранулометрический состав* почвы определяли методом отмучивания. Используя шкалу Н. А. Качинского, определяли разновидность почвы по гранулометрическому составу. *Кислотность почвы* (рН вод.) исследовали потенциометрическим методом, использован иономер ORION 720 (Практикум..., 1991). Исследования выполнены в экологической лаборатории НТГСПИ (ф) РГППУ (г. Нижний Тагил).

Описание и диагностика агрогенно-преобразованных естественных почв выполнены на основе изучения их морфологического строения и в соответствии с методическими рекомендациями (Шишов, Тонконогов, Лебедева, Герасимова, 2004). Диагностика молодых почв отвалов выполнена с учетом результатов исследований почв и грунтов отвалов горнодобывающей промышленности Урала (Махонина, 2003; Забалуев, Бабенко, Тарика и др., 2007). Исследования проведены совместно с сотрудниками лаборатории экотоксикологии популяций и сообществ Института экологии растений и животных УрО РАН (г. Екатеринбург).

3.2 Определение содержания тяжелых металлов в почве. Пробы с глубины 0–10 см ($N_{\text{общ.}} = 50 : 5$ участков $\times$ 10 проб). Анализ выполнен по РД 52.18.191-89 в соответствии с аттестованными методами в лаборатории ИЭРиЖ УрО РАН (Аттестат № РОСС RU. 0001.515630). В кислотных вытяжках измеряли содержание Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии на спектрометре AAS Vario 6 фирмы Analytik Jena AG. Выполнено 300 элемент-анализов ($N_{\text{общ.}} = 300 : 50$ проб почвы $\times$ 6 элементов).

3.3 Определение надземной и подземной фитомассы травянистых растений. В качестве меры первичной продукции травяных сообществ была использована величина фитомассы, собранная в период ее максимального развития (Титлянова, 1979; Букварева, Алещенко, 2013). В вегетационные сезоны 2006, 2009–2012 гг. методом случайной выборки в исследуемых фитоценозах закладывали по 10 учетных площадок размером 25×25 см, расположенных на расстоянии друг от друга > 3 метров. Отбор проб проводили методом монолитов с 25 см глубины (Шалыт, 1960; Харитонов, Бойков, 1999 и др.). В пределах каждой учет-

ной площадки растения разбирали по видам. Определяли воздушно-сухую надземную и подземную фитомассу всех видов в пределах учетных площадок. Фитомасса определена: в 2006 г. – 87 видов, в 2009 г. – 86, в 2010 г. – 91, в 2011 г. – 81, в 2012 г. – 101 вид растений. Всего выполнено ($N_{\text{общ.}}$) 1370 взвешиваний для надземной фитомассы и 1285 для подземной.

В качестве влияющих на фитомассу погодных факторов рассмотрены: среднемесячные и активные ($> 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) температуры воздуха, сумма осадков по месяцам и за периоды с активными температурами (мм), гидротермический коэффициент Т. Г. Селянинова (ГТК) (Романова, Куракова, Ермакова, 1993; The Encyclopedia..., 2005). Факторы анализировали за май, июнь, июль и вегетационный сезон. Использованы данные автоматизированного мониторинга состояния атмосферного воздуха и осадков в г. Нижний Тагил (пост № 2 – пос. Сухоложский, Дзержинский район; пост № 4 – Техпоселок, Тагилстроевский район).

3.4 Определение скорости разложения растительных остатков выполнено аппликационным методом (Экологическая токсикология..., 2001; Воробейчик, Пищулин, 2011). *Потенциальная скорость разложения* изучена на растительных остатках бобовых, злаков, разнотравья. Почва для эксперимента отобрана из тех же местообитаний, в которых была собрана фитомасса. Чашки Петри выдерживали в термостате при $t = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ и влажности 60 % в течение одного месяца. После экспонирования содержимое пакетов высушивали при $t = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$. Скорость разложения растительного материала оценивали по убыли массы навески, выраженной в процентах ($N_{\text{общ.}} = 45 : 3$ агроботанические (абг) группы $\times$ 3 аналитические повторности (ан. п.) $\times$ 5 участков; одна биологическая повторность (б. п.) – среднее из трех ан. п. для каждой абг группы в пределах одного участка).

Актуальная скорость разложения изучена в тех же сообществах, в которых была проанализирована продуктивность. Экспонируемый материал – воздушно-сухая фитомасса бобовых, злаков, разнотравья. Сроки экспонирования: 2, 4, 6, 12, 14, 18 и 24 мес., с 5–8 мая 2010 г. по 5–9 мая 2012 г. ($N_{\text{общ.}} = 1050$ образцов: 210 пакетов $\times$ 5 участков).

3.5 Микробиологические исследования. Отбор проб для микробиологического анализа проводили в непосредственной близости и одновременно с изъятием экспонируемых в полевых условиях растительных образцов в мае 2011 и 2012 гг. Количество биологических повторностей ежегодно – по три пробы почвы около экспонируемого образца каждой агроботанической группы в пределах каждого исследуемого участка ($N_{\text{общ.}} = 90$ отобранных проб). Каждая проба почвы проанализирована в 3–5-кратной аналитической повторности. Десорбцию микроорганизмов с поверхности почвенных частиц осуществляли ультразвуковой обработкой почвенной суспензии (1 : 10) в течение 2–5 мин. низкочастотным диспергатором Soniprep 150 (MSE) (Sanyo, Япония).

Учет *общей численности микроорганизмов* в почвенных образцах проводили прямым люминесцентным методом по Д. Г. Звягинцеву и П. А. Кожевину с использованием флюорохромного красителя акридина оранжевого (Инструментальные методы ... , 1982). Подсчет микроорганизмов выполнен под люми-

несцентным микроскопом Micros MC 400FP (Австрия). Просматривалось не менее 30 полей зрения для каждой из 3 б. п. (1 б. п. – средняя проба почвы из-под трех образцов каждой абг, $n = 3$); $N_{\text{общ.}} = 900$ полей зрения (30 полей зрения $\times$ 3 б. п. $\times$ 5 участков исследования $\times$ 2 года наблюдения).

Выявление и учет микроорганизмов из почв осуществляли методом посева почвенной суспензии на элективные культуральные среды (Практикум по биологии почв, 2002). Культивирование микроорганизмов проводили при $t = 28\text{--}30^\circ\text{C}$ в течение 7–21 сут. Подсчет наиболее вероятного числа микроорганизмов определяли по статистической таблице Мак-Креди.

Вычисляли *коэффициенты олиготрофности и сукцессии* (Семенова, Ильбулова, Суюндуков, 2011; Севрякова, 2012).

Микробиологические исследования проведены на базе лаборатории алканотрофных микроорганизмов Института экологии и генетики микроорганизмов, УрО РАН (г. Пермь).

3.6 Статистический анализ результатов выполнен с вычислением среднего арифметического (M) и его ошибки (m). Нормальность выборочных распределений проверяли с помощью W -теста Шапиро – Уилка, а также через отношение асимметрии (As) к ошибке асимметрии (S_{As}) и через отношение эксцесса (Ex) к ошибке эксцесса (S_{Ex}). Нулевая гипотеза отвергалась, если

$$t_{As} = \frac{As}{S_{As}} > 3 \quad \text{и} \quad t_{Ex} = \frac{Ex}{S_{Ex}} > 3. \quad \text{Принятие нулевой гипотезы служило допущением}$$

к использованию параметрических критериев. Различия между выборками и процент объясненной дисперсии оценивали одно-, двух- и трехфакторным дисперсионным анализом с вычислением F -критерия и непараметрическим U –критерием Уилкоксона (Манна – Уитни). Групповые сравнения по признакам проведены S -методом Шеффе (*методом линейных контрастов*) (Гласс, Стенли, 1976). Для выделения ведущих климатических факторов, влияющих на надземную и подземную фитомассы, был использован метод главных компонент. Определение сочетанного влияния факторов (участок $\times$ погодный фактор) проводили методом общих регрессионных моделей (GRM). Сопряженность между признаками оценивали через коэффициент ранговой корреляции Спирмена (r_s), а также с помощью регрессионного анализа (R^2), в том числе множественного регрессионного анализа (пошаговая модель). Статистический анализ выполнен в ПСП Statistica v. 10.0 (Stat Soft, Inc., 2012).

Глава 4. Фитомасса сообществ травянистых растений фоновой и техногенно нарушенных территорий и факторы, ее определяющие

4.1 Характеристика надземной и подземной фитомассы исследуемых сообществ приведена Таблице 1. В большинстве случаев анализируемое распределение данного показателя не отличалось от нормального ($p > 0.05$). Средние многолетние данные показали, что в целом на агроземах фитомасса выше, чем на техноземах. Однако различия между надземной фитомассой сообществ агроземов и техноземов статистически не значимы (S -метод: $F_{\text{надземная}} = 1,8$; $df = 4$; 235; $p > 0.05$), между подземной – значимы ($F_{\text{подземная}} = 5.53$; $df = 4$; 235; $p < 0.001$).

В градиенте загрязнения почвы исследуемые показатели снижаются на агроземах, на техноземах надземная фитомасса повышается, а подземная имеет лишь тенденцию к повышению. Независимо от уровня загрязнения в градиенте сукцессионного возраста (старение) наблюдается снижение надземной и подземной фитомассы травяного яруса сообществ. Следовательно, ведущим фактором, определяющим наблюдаемое изменение фитомассы, является градиент сукцессионного возраста травяных сообществ. При этом химическое загрязнение модифицирует изменение фитомассы в этом градиенте, что проявляется в снижении ее средних значений на загрязненных тяжелыми металлами территориях по сравнению с фоновой. Однако по отдельным вегетационным сезонам характер изменения фитомассы в градиенте загрязнения отклоняется от тренда, описанного выше, по средним значениям. В ходе двухфакторного дисперсионного анализа установлено статистически значимое влияние на фитомассу условий вегетации (надземная: $F = 4.68$; $df = 3$; 216 ; $p = 0.003$; подземная: $F = 7.06$; $df = 3$; 216 ; $p = 0.002$) и токсической нагрузки (надземная: $F = 4.30$; $df = 3$; 216 ; $p = 0.006$; подземная: $F = 15.37$; $df = 3$; 216 ; $p < 0.001$). Из двух анализируемых факторов смена условий вегетации в большей степени влияет на надземную фитомассу, а токсическая нагрузка – на подземную.

Таблица 1 – Фитомасса сообществ фоновой и техногенно нарушенных территорий в разные вегетационные сезоны ($M \pm m$)

Вегетационный сезон	Участки (токсическая нагрузка, отн. ед.)				
	Агрозе́мы		Технозе́мы		
	Фон	Буфер-1	Буфер-2	Импакт-1	Импакт-2
Надземная фитомасса, г/м ²					
2006	280.0 ± 46.3	360.2 ± 83.0	235.6 ± 34.5	176.4 ± 60.7	–
2009	215.0 ± 30.4	226.2 ± 27.9	196.1 ± 34.3	336.0 ± 92.4	371.4 ± 54.8
2010	310.8 ± 35.5	204.5 ± 15.3	279.6 ± 32.3	193.4 ± 29.6	334.1 ± 49.3
2011	252.7 ± 56.8	249.7 ± 56.5	113.7 ± 23.1	112.9 ± 19.0	115.7 ± 17.2
2012	277.0 ± 23.0	206.7 ± 46.8	198.3 ± 42.6	333.1 ± 44.7	206.7 ± 49.9
Среднее по годам	267.1 ± 15.9	249.4 ± 28.8	204.7 ± 27.3	230.4 ± 44.6	257.0 ± 58.8
Подземная фитомасса, г/м ²					
2006	385.9 ± 41.9	401.9 ± 82.5	366.7 ± 62.2	237.7 ± 27.8	–
2009	364.3 ± 45.2	350.1 ± 56.6	219.3 ± 56.6	221.6 ± 50.3	351.0 ± 51.9
2010	310.6 ± 44.9	284.5 ± 59.4	173.0 ± 32.8	90.8 ± 9.5	458.0 ± 50.5
2011	285.9 ± 51.5	334.4 ± 66.7	108.5 ± 22.7	78.4 ± 12.6	85.1 ± 12.5
2012	270.8 ± 46.2	204.4 ± 45.5	123.4 ± 19.7	187.5 ± 23.2	199.0 ± 49.2
Среднее по годам	321.7 ± 22.6	315.0 ± 33.4	198.2 ± 46.4	163.2 ± 33.2	273.2 ± 82.2

Примечание: M – среднее арифметическое, отражающее пространственную изменчивость; m – ошибка среднего арифметического; среднее по годам – среднее значение за 2006, 2009–2012 гг. с ошибкой, отражающей межгодовую изменчивость.

4.2 Зависимость фитомассы сообществ травянистых растений, произрастающих в градиенте химического загрязнения почв тяжелыми металлами, от погодных факторов. Для оценки межгодовой изменчивости фитомассы различных сообществ вычислены средние квадраты расстояния Махаланобиса (SMD). Анализ проведен отдельно для каждого исследуемого сообщества, группирующая переменная – год наблюдения (Рисунок 1). С ростом химического загрязнения чувствительность травяных сообществ к погодным факторам по показателю фитомассы повышается и становится максимальной в сообществе участка И-2, причем в большей степени этот эффект выражен у подземной сферы. Такое различие, видимо, обусловлено прямым контактом с почвой подземной сферы растений, испытывающей максимальное токсическое воздействие.

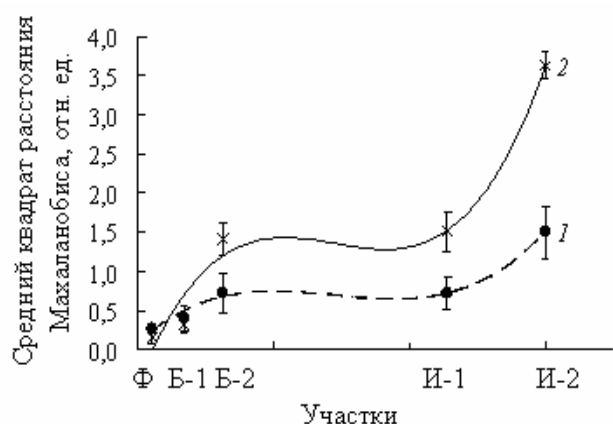


Рисунок 1 – Средние квадраты расстояний Махаланобиса, характеризующие реакцию надземной (1) и подземной (2) фитомассы на погодные условия вегетационного сезона

Представляло интерес выявить погодные факторы, которые играют ведущую роль в формировании надземной и подземной фитомассы исследуемых сообществ. В качестве таковых рассмотрены среднемесячные температуры воздуха, сумма осадков по месяцам (мм), гидротермический коэффициент Т. Г. Селянинова (ГТК). Действующие факторы анализировали начиная с августа предыдущего года и заканчивая июлем текущего года. Установлено, что максимальные факторные нагрузки связаны с суммой осадков октября – ноября, января – мая, объясняющих до 39 % дисперсии и ГТК за сентябрь (12,5 % дисперсии). Следует ожидать, что связь фитомассы с погодными факторами нелинейная (Одум, 1975), поэтому перед регрессионным анализом использовали линеаризующее преобразование (логарифмирование обеих частей модели):

$$\ln P = a_0 + a_1 \cdot \ln S_1 + a_2 \cdot \ln S_2 + a_3 \cdot \ln \text{ГТК}, \quad (1)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3 – параметры модели;
 S_1 – суммы осадков октябрь – ноябрь;
 S_2 – сумма осадков январь – май;
 ГТК – гидротермический коэффициент Селянинова за сентябрь.

Для сообществ агроземов (Ф и Б-1), константы регрессионных моделей статистически не значимы. Для сообществ техноземов (Б-2, И-1, И-2) выделенные погодные параметры могут оказывать значимое влияние как на надземную, так и на подземную фитомассу (Таблица 2). Зависимость надземной фитомассы

от количества осадков по периодам может быть как положительной, так и отрицательной. Связь подземной фитомассы с зимне-весенними осадками на всех участках положительная, с осенними – отрицательная для сообществ агроземов и положительная для сообществ техноземов.

Таблица 2 – Характеристика уравнения (1) для надземной и подземной фитомассы

Участок	Константа и независимая переменная				R^2	p
	a_0	$a_1 \ln S_1$	$a_2 \ln S_2$	$a_3 \ln \Gamma TK$		
надземная фитомасса						
Ф	3.31	1.08	−0.48	−0.25	0.06	0.39
Б-1	2.23	−0.49	1.00	−0.11	0.05	0.47
Б-2	0.71	1.82	−0.66	−0.73	0.26	<0.003
И-1	1.00	3.17	−1.82	−0.55	0.23	<0.007
И-2	−8.41	−1.56	3.99	−0.76	0.30	<0.004
Подземная фитомасса						
Ф	3.17	−0.44	0.84	−0.15	0.11	0.15
Б-1	6.66	−1.49	1.00	−0.06	0.11	0.15
Б-2	−7.12	0.36	2.05	−0.69	0.38	<0.001
И-1	−7.65	0.59	1.98	−0.20	0.40	<0.001
И-2	−2.65	1.37	0.39	−1.37	0.45	<0.001

Примечание: полужирным выделены статистически значимые константы ($p < 0.05$).

Для объяснения наблюдаемых фактов рассмотрены соотношение надземной фитомассы и видовой насыщенности, структура доминирования и участие агроботанических групп в исследуемом показателе.

4.3 Зависимость величины надземной фитомассы от видового богатства и насыщенности в исследуемых сообществах. На агроземах с ростом химического загрязнения отмечено снижение видовой насыщенности с 20.53 до 17.98 видов/м², на техноземах – с 18.2 до 8.9 шт./м². Последнее сопровождается в среднем 20 % повышением надземной фитомассы (Особенности почв..., 2015). Возможно, высокое содержания тяжелых металлов в почве выступает в качестве стрессора и определяет низкий уровень видовой насыщенности сообществ, а повышенное содержание в ней сильнонасыщенных оснований и высокая обеспеченность подвижными формами фосфора и калия (Характеристика антропогенно деградированных почв..., 2013) способствуют увеличению фитомассы злаковых фитоценозов, формирующихся на техноземах импактной зоны.

Наибольшее число видов встречается в сообществах участков Ф и Б-1 (50 и 55 видов, соответственно). Средний уровень видового богатства характерен для сообществ участков Б-2 и И-1 (47 и 42 вида, соответственно). Наименьшим числом видов характеризуется сообщество участка И-2 (32 вида). Такое распределение сообществ техноземов по видовому богатству соответствует уровню их межгодовой изменчивости фитомассы (Рисунок 1).

4.4 Структура доминирования сообществ по надземной фитомассе.

Структура доминирования рассматриваемых сообществ изменчива по вегетационным сезонам. Изменения проявляются как в смене доминантов и (или) содоминантов, так и в доли их участия в общей фитомассе. Последнее подтверждают коэффициенты вариации (C_v): для сообщества агроземов степень варьирования доли доминанта выше ($C_v = 20\text{--}21\%$), чем для фитоценозов техноземов ($C_v = 12\text{--}19\%$). Это свидетельствует о лабильности видовой структуры, которая в большей мере выражена в сообществах агроземов и в меньшей – в фитоценозах техноземов, и объясняет высокую устойчивость сообществ агроземов, характеризующихся меньшими межгодовыми колебаниями надземной фитомассы ($C_v = 9\text{--}15\%$) по сравнению с фитоценозами техноземов ($C_v = 34\text{--}46\%$).

4.5 Участие агроботанических групп в фитомассе исследуемых сообществ травянистых растений. Соотношение «разнотравье – бобовые – злаки» изменяется в градиенте химического загрязнения почв (%): надземная фитомасса от 46.8 : 21.3 : 31.9 на фоновом участке до 17.7 : 19.1 : 63.2 на И-2; подземная – от 45 : 23 : 32 до 21 : 17 : 62, соответственно.

В годы с незначительной суммой осадков в январе – мае (131–138 мм) фитомасса злаков почти на всех участках превышала таковую бобовых. Наиболее выражен данный эффект был на фоновом участке. При этом она в 2–3 раза возрастала в градиенте загрязнения почв, достигая максимальных значений на участке И-2. Именно за счет злаков в эти годы (2009–2010 гг.) наблюдалось повышение надземной и подземной фитомассы на загрязненных участках.

Во влажные годы (сумма осадков в январе – мае – 175–207 мм) наибольшая фитомасса бобовых была на фоновом участке. В остальные периоды исследования на этом участке показатель был в 3.1–7.5 раз ниже. В эти вегетационные сезоны фитомасса бобовых на большинстве участков была выше, чем злаков. Таким образом, годы с недостаточным увлажнением были благоприятными для злаков, а влажные – для бобовых. Наиболее выражен данный эффект на участке фоновой зоны, на котором формируется сменно доминантное сообщество.

Таким образом, фитомасса как интегральная функция сообществ зависит от целого комплекса факторов: их сукцессионного возраста, почвенных и погодных условий. Техногенная трансформация почвы, связанная с содержанием в ней тяжелых металлов и, как следствие, с формированием в этих условиях видового состава сообществ, отличного от фоновых территорий, повышает чувствительность последних к колебанию погодных факторов по показателю фитомассы как в надземной, так и в подземной сфере.

Глава 5. Разложение растительных остатков в травяных сообществах фоновых и техногенно нарушенных местообитаний

5.1 Потенциальная скорость разложения растительных остатков на почве с разным уровнем химического загрязнения. Влияние качественного состава разлагающегося материала на скорость его разложения оценивали в серии экспериментов. По скорости разложения растительных остатков агроботанические группы выстраиваются в следующий ряд: разнотравье $\geq$ бобовые $>$

злаки. Различия в исследуемом показателе статистически значимы ($F = 6.51$; $df = 2; 26$; $p = 0.006$).

5.2 Актуальная скорость разложения растительных остатков на фоновой и техногенно нарушенных территориях. На техноземах деструкционные процессы идут быстрее, чем на агроземах (Рисунок 2). Зависимость количества разложившихся растительных остатков от уровня токсической нагрузки аппроксимируется уравнениями линейной регрессии (R^2 от 0,1 до 0,62; $p < 0.001$).

Сравнение темпов разложения растительных остатков трех агроботанических групп, экспонируемых в сходных условиях, позволило выстроить их в следующий ряд: разнотравье > бобовые $\geq$ злаки. Сравнение средних значений t -тестом для независимых неравночисленных переменных показывает, что различия между парами «разнотравье» и «бобовые + злаки» во всех случаях статистически значимы ($t = 14.94\text{--}33.09$; df от 20 до 58; $p < 0.001$).

В ходе двухфакторного («группа почв» и «агроботаническая группа») ковариационного анализа с «нагрузкой» в качестве ковариаты различий в количестве разложившихся растительных остатков на разных по уровню загрязнения участках в разные сроки экспонирования установлено, что вклад фактора «группа почв», скоррелированного с химическим загрязнением, в темпы разложения растительных остатков с увеличением продолжительности их экспонирования (2, 4, 6, 12, 14, 18 и 24 месяцев) возрастает от 3.55 % после первых двух месяцев до 35.04 % к концу второго года экспонирования. При этом вклад фактора «агроботаническая группа» уменьшается от первого к 24-му месяцу в 7.7 раз.

Количество разложившихся растительных остатков, % от исходной массы

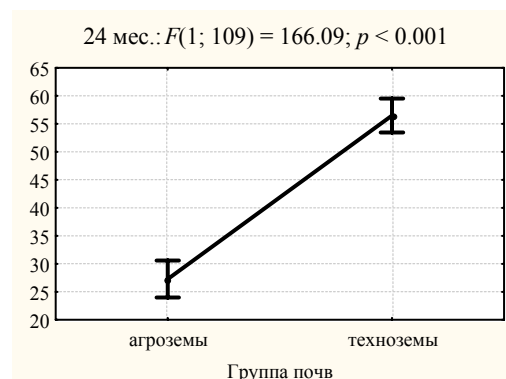
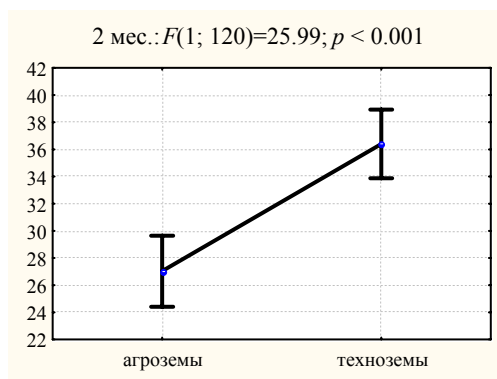


Рисунок 2 – Результаты однофакторного дисперсионного анализа различий в количестве разложившихся растительных остатков на агроземах и техноземах за 2 и 24 мес. экспонирования

Таким образом, количество разлагающихся растительных остатков (процент от исходной массы/период) зависит от физико-химических свойств почв и химического состава разлагающегося материала.

Соотношение продукционно-деструкционных процессов. Чем меньше разность между синтезированной и разложившейся фитомассами, тем интенсивней биогенный обмен и сбалансированней обменные процессы. Установлено, что сбалансированность биогенных процессов на техноземах выше, чем на агроземах (Рисунок 3).

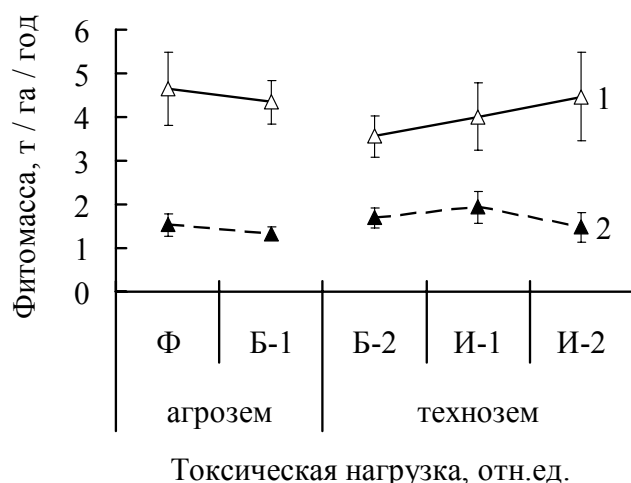


Рисунок 3 – Общая синтезированная (1) и разложившаяся (2) за год надземная фитомасса на почвах разных групп

В пределах агроземов и техноземов наблюдается повышение данного показателя в градиенте сукцессионного возраста. Наиболее интенсивно эти процессы протекают на участке с Б-2, где развивается луговое сообщество, в отличие от участков И-1 и И-2 (злаковые сообщества). Однако эти фитоценозы отличаются по уровню сбалансированности биогенного обмена. Большой дисбаланс между синтезированной и разложившейся фитомассой наблюдается в биогеоценозе участка И-2, что и определяется более высоким уровнем химического загрязнения почв этого участка и сукцессионной молодостью сообщества. Следовательно, в условиях загрязнения происходит формирование биогеоценоза с низкими уровнями видового разнообразия фитоценоза, коэффициента сукцессии микробиоценоза и сбалансированности обменных процессов.

Глава 6. Характеристика микробиоценозов фоновой и техногенно нарушенных территорий и участие почвенной микробиоты в процессах разложения растительных остатков

6.1 Реакция почвенной микробиоты на химическое загрязнение. Установленные выше различия в скорости разложения растительных остатков и сбалансированности обменных процессов на фоновой и техногенно нарушенных территориях могут быть обусловлены особенностями их почвенного микробиологического комплекса, включающего деструкционное звено. Общая численность почвенных микроорганизмов на загрязненных территориях выше, чем на фоновой (Рисунок 4а). Сезонно-динамические наблюдения выявили увеличение общей численности в более теплый и влажный год сравнению с холодным и сухим: Ф – в 1.8 раз, Б-1 – в 1.4 раза, Б-2 – в 1.2 раза, И-1 – в 1.5 раза и И-2 – в 2.2 раз (критерий Крускала – Уоллиса (H): $H(1; N = 30) = 20.25; p < 0.001$).

Увеличение общей численности микроорганизмов в градиенте загрязнения почвы после первого года экспонирования образцов связано с увеличением численности олиготрофов, денитрифицирующих бактерий, азотфиксаторов, сульфатовосстанавливающих бактерий, аэробных целлюлозолитов; после второго года – за счет углеводородокисляющих бактерий, денитрификаторов, нитрифи-

каторов (II фазы), азотфиксирующих бактерий, сульфатредукторов, железовосстанавливающих бактерий, а также анаэробных и аэробных целлюлозолитиков.

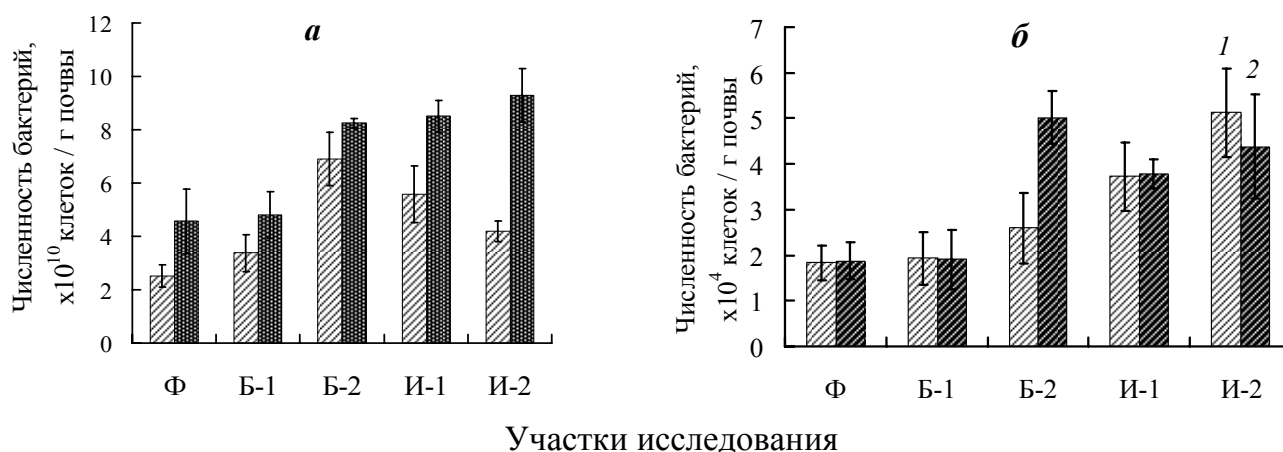


Рисунок 4 – Численность общая (а) и аэробных целлюлозоразрушающих микроорганизмов (б) на исследуемых участках (годы: 1 – холодный и сухой; 2 – теплый и влажный)

Важную роль в процессе разложения растительных остатков играют анаэробные и аэробные целлюлозолитические бактерии, численность которых положительно коррелирует с уровнем загрязнения почвы ТМ (аэробы: $R_s = 0.65$ – 0.74 ; анаэробы: мезофиллы – $R_s = 0.79$; термофилы – $R_s = 0.60$; $N = 15$; $p < 0.05$ – 0.001) (Рисунок 4б).

6.2 Характеристика интегральных показателей функциональной структуры сообщества почвенных микроорганизмов. Различие в интегральных показателях функциональной структуры сообществ почвенной микробиоты K_O и K_C (Таблица 3) в годы наблюдений (K_O : $F(1; 29) = 34.40$; K_C : $F(1; 29) = 66.76$; $p < 0.001$) свидетельствует о том, что наряду с активно функционирующими группами в почвах содержится запас микроорганизмов, которые могут проявить свою активность и увеличивать число генераций в зависимости от условий вегетационного сезона и изменения химического состава растительных остатков в ходе их разложения. Микробный пул обеспечивает поддержание гомеостатического состояния почвы, то есть постоянство характерных для нее химических и биологических параметров.

Если принять, что коэффициент олиготрофности отражает активное протекание процессов глубокой минерализации органики и связывания азота в микробной биомассе почвы (Свистова, 2005), то согласно данным Таблицы 3 наиболее активно эти процессы идут на второй год экспонирования образцов и уменьшаются в градиенте загрязнения на техноземах независимо от года наблюдения. Это свидетельствует о возможном ингибирующем влиянии тяжелых металлов на процессы глубокой минерализации растительных остатков. В первый год экспонирования образцов коэффициенты олиготрофности, наоборот, выше на техноземах, чем на агроземах. Полученные данные согласуются с материалами по актуальной скорости разложения растительных остатков.

Различие почв проявляется и в уровне развития микробного сообщества, отражением которого является коэффициент сукцессии. Высокие значения K_C на буферных участках, вероятно, отражают более поздние стадии развития микробных сообществ.

Таблица 3– Коэффициенты (K_o) и (K_c) в почвах в градиенте загрязнения тяжелыми металлами

Показатель	Год наблюдения	Участки исследования				
		агрозе́мы		технозе́мы		
		Ф	Б-1	Б-2	И-1	И-2
Коэффициент олиготрофности ($K_o \times 10^6$)	первый	0.001	0.41	1.72	1.07	1.11
	второй	114.8	82.0	59.4	68.7	28.3
Коэффициент сукцессии ($K_c \times 10^9$)	первый	4.8	6800.0	10781.3	6404.5	4468.1
	второй	23 269.2	51 200.0	78 214.3	45 200.0	13 555.6

Среднее значение характерно для микробного сообщества участка И-1. Низкие значения данного коэффициента, отражающие более ранние этапы сукцессии микробоценоза, наблюдаются на участках Ф и И-2. Это согласуется со степенью сформированности почвенных горизонтов (отсутствие АУ) и с данными о сукцессионных стадиях развития травяных фитоценозов, произрастающих на этих территориях, которые были представлены в пп. 2.4.

6.3 Участие деструкционного микробиологического комплекса в разложении растительных остатков. Зависимость количества разложившихся растительных остатков от общей численности микроорганизмов и численности анаэробных целлюлозолитиков (термофилы, мезофиллы) в большей мере выражена после двух лет экспонирования растительных остатков (Рисунок 5).

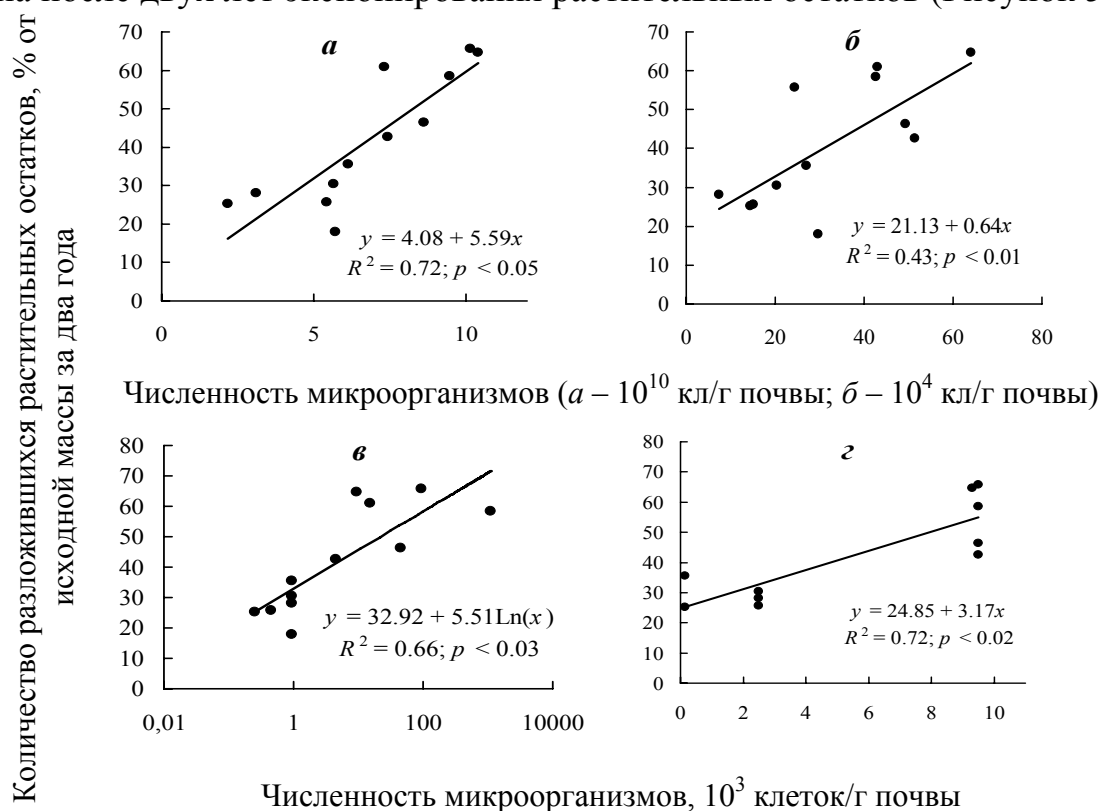


Рисунок 5 – Зависимость количества разложившихся растительных остатков от общей численности микроорганизмов (а), аэробных (б), анаэробных мезофиллов (в) и термофилов (г) после второго года экспонирования

В этот период наблюдается сукцессия микробоценозов, свидетельствующая о стадийности в разложении растительных тканей. Следовательно, процесс разложения приобретает биологический характер на более поздних этапах

Выявленная высокая общая численность и численность целлюлозоразрушающих микроорганизмов на техноземах определяет высокие темпы разложения растительных остатков и большую по сравнению с агроземами сбалансированность обменных процессов. Высокие уровни химического загрязнения почвы тяжелыми металлами на техноземах, усугубляемые неблагоприятными погодными условиями, приводят к снижению общей численности и численности целлюлозолитиков и увеличению дисбаланса между объемом синтезированной и разлагающейся фитомассы.

Выводы

1. Величина фитомассы травяных фитоценозов, формирующихся на агроземах в среднем за период исследования выше (надземная: 249–267; подземная: 315–322 г/м²), чем на техноземах (надземная: 205–257; подземная: 163–273 г/м²), и снижается в обоих случаях в градиенте сукцессионного возраста. Химическое загрязнение приводит к уменьшению фитомассы, в большей степени выраженному для подземной сферы (надземная: от 267 до 257 г/м²; подземная: от 322 до 273 г/м², Ф и И-2, соответственно).

2. Погодные условия вегетации модифицируют проявление зависимости фитомассы от сукцессионного возраста и физико-химических свойств почвы. В отдельные годы величина фитомассы отклоняется от среднего тренда. Методом главных компонент показано, что для условий Среднего Урала ведущими погодными факторами, определяющими фитомассу, являются ГТК сентября, сумма осадков октября – ноября и января – мая. Сообщества агроземов, обладающие высоким видовым богатством и лабильной видовой структурой, характеризуются низкой чувствительностью к указанным погодным факторам по показателю фитомассы по сравнению с техноземами.

3. Темпы деструкции растительных остатков зависят от физико-химических свойств почв и структуры разлагаемого материала, вклад которых в деструкционные процессы различен в зависимости от сроков разложения. На начальных этапах значительна роль структуры разлагаемого материала, на конечных – фактора «группа почв», скоррелированного с химическим загрязнением (доля влияния первого фактора изменяется за период 2–24 мес. от 36,45 до 4,76 %, второго – от 3,55 до 35,04 %). На всех этапах экспонирования темпы разложения на техноземах выше, чем на агроземах.

4. Количество разложившегося вещества зависит от общей численности микроорганизмов ($R^2 = 0.72$; $p < 0.05$), численности аэробных ($R^2 = 0.43$; $p < 0.01$) и анаэробных целлюлозолитиков (термофилы ($R^2 = 0.66$; $p < 0.03$), мезофиллы ($R^2 = 0.72$; $p < 0.02$)). Наиболее выражена данная зависимость во второй год разложения растительных остатков.

5. Общая численность бактерий в почвах агроземов не превышает 5.0×10^{10} , на техноземах 9.3×10^{10} клеток/г почвы и зависит от условий вегетационного сезона. На фоновом участке высокая общая численность достигается

за счет олиготрофных и азотфиксирующих бактерий; на максимально загрязненном – за счет гетеротрофных, олиготрофных, азотфиксирующих, нитрифицирующих, железовосстанавливающих микроорганизмов. Численность аэробных и анаэробных целлюлозолитиков зависит от уровня загрязнения почв ТМ (аэробы: $r_s = 0.65–0.74$; анаэробы: мезофиллы – $r_s = 0.79$; термофилы – $r_s = 0.60$; $N = 15$; $p < 0.05–0.001$).

6. Разность между годовой синтезированной и разложившейся надземной фитомассой на агроземах выше (Ф – 3.12, Б-1 – 2.83 т/га), чем на техноземах (Б-2 – 1.86, И-1 – 2.07, И-2 – 3.00 т/га/год). В пределах агроземов и техноземов наблюдается повышение уровня сбалансированности обменных процессов в градиенте сукцессионного возраста. Максимальный уровень токсической нагрузки на техноземах приводит к наибольшему дисбалансу между синтезированной и разложившейся фитомассой.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованные ВАК МОиН РФ

1. Химические элементы в процессе минерализации растительных остатков при загрязнении почвы тяжелыми металлами / Т. В. Жуйкова, В. С. Безель, **В. А. Жуйкова (Гордеева)**, О. В. Чанкина, К. П. Куценогий // Сибирский экологический журн. – 2013. – № 2. – С. 270–282 [Chemical Elements in the Mineralization of Plant Residues under Soil Pollution with Heavy Metals / T. V. Zhuikova, V. S. Bezel', **V. A. Zhuikova (Gordeeva)**, O. V. Chankina, K. P. Kutsenogii // Contemporary Problems of Ecology. – 2013. – Vol. 6, № 2. – P. 213–222].

2. Почвенный микробиоценоз как показатель стабильности луговых сообществ при химическом загрязнении среды тяжелыми металлами / И. Б. Ившина, Л. В. Костина, Т. Н. Каменских, **В. А. Жуйкова (Гордеева)**, Т. В. Жуйкова, В. С. Безель // Экология. – 2014. – № 2. – С. 83–90 [Soil Microbiocenosis as an Indicator of Stability of Meadow Communities in the Environment Polluted with Heavy Metals / I. B. Ivshina, L. V. Kostina, T. N. Kamenskikh, **V. A. Zhuikova (Gordeeva)**, T. V. Zhuikova, V. S. Bezel' // Russian Journal of Ecology. – 2014. – Vol. 45, № 2. – P. 83–89].

3. Безель, В. С. Геохимия травянистых фитоценозов: биогенные циклы химических элементов при загрязнении природной среды тяжелыми металлами / В. С. Безель, Т. В. Жуйкова, **В. А. Гордеева** // Геохимия. – 2015. – № 3. – С. 1–13 [Bezel V. S., Zhuikova T. V., Gordeeva V. A. Geochemistry of Grass Biocenoses: Biogenic Cycles of Chemical Elements at Contamination of the Environment with Heavy Metals // Geochemistry International. – 2015. – Vol. 53, № 3. – P. 241–252].

4. Особенности почв и травянистых растительных сообществ в условиях техногенеза на Среднем Урале / Т. В. Жуйкова, Э. В. Мелинг, С. Ю. Кайгородова, В. С. Безель, **В. А. Гордеева** // Экология. – 2015. – № 3. – С. 163–172 [Specific Features of Soils and Herbaceous Plant Communities in Industrially Polluted Areas of the Middle Urals / T. V. Zhuikova, E. V. Meling, S. Yu. Kaigorodova, V. S. Bezel', **V. A. Gordeeva** // Russian Journal of Ecology. – 2015. – Vol. 46, № 3. – P. 213–221].

5. Надземная биомасса и скорость деструкции растительных остатков в травянистых сообществах при загрязнении почвы тяжелыми металлами / В. С. Безель, Т. В. Жуйкова, **В. А. Гордеева**, Э. В. Мелинг, А. Б. Трубянов, Н. В. Глотов // Экология. – 2016. – № 4. – С. 264–269 [Aboveground Phytomass and Rate of Plant Debris Decomposition in Herbaceous Communities Exposed to Soil Pollution with Heavy Metals /

V. S. Bezel', T. V. Zhuikova, V. A. Gordeeva, E. V. Meling, A. B. Trubyanov, N. V. Glotov // Russian Journal of Ecology. – 2016. – Vol. 47, № 4. – P. 343–348].

6. Структурно-функциональное состояние почвенной микробиоты при химическом загрязнении среды / Т. В. Жуйкова, **В. А. Гордеева**, В. С. Безель, Л. В. Костина, И. Б. Ившина // Поволжский экологический журнал. – 2016. – № 2. С. 186–198 [The Structural and Functional State of Soil Microbiota in a Chemically Polluted Environment / T. V. Zhuikova, V. A. Gordeeva, V. S. Bezel', L. V. Kostina, I. B. Ivshina // Biology Bulletin. – 2017. – Vol. 44, № 10. – P. 36–44].

Публикации в других изданиях

7. Жуйкова, Т. В. Изучение скорости деструкции растительных образцов в условиях химического загрязнения / Т. В. Жуйкова, **В. А. Жуйкова (Гордеева)**, А. А. Жеребцов // Биологические системы: устойчивость, принципы и механизмы функционирования : сб. матер. III Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Н. Тагил, 1–5 мар. 2010 г.) : в 2 ч. – Н. Тагил : НТГСПА, 2010. – Ч. 1. – С. 230–237.

8. **Жуйкова, В. А. (Гордеева)** Изучение надземной фитомассы луговых сообществ при сочетанном действии химического загрязнения и погоднo-климатических факторов / В. А. Жуйкова, Т. В. Жуйкова, Э. В. Мелинг // Антропогенная трансформация природной среды : матер. междунар. конф. (Пермь, 18–21 окт. 2010 г.). – Пермь : Изд-во Перм. гос. ун-та, 2010. – Т. 1. – Ч. 1. – С. 287–293.

9. Жуйкова, Т. В. Первичная продуктивность природных и техногенно нарушенных луговых сообществ при сочетанном действии химического загрязнения и погоднo-климатических факторов / Т. В. Жуйкова, **В. А. Жуйкова (Гордеева)**, Э. В. Мелинг // Принципы и способы сохранения биоразнообразия : матер. IV Всерос. науч. конф. с междунар. участ. (Йошкар-Ола, 22–26 сент. 2010 г.). – Йошкар-Ола : Изд-во Марийск. гос. ун-та, 2010. – С. 118–121.

10. **Жуйкова, В. А. (Гордеева)** О скорости разложения растительного опада луговых сообществ техногенно нарушенных территорий / В. А. Жуйкова, Т. В. Жуйкова // Биологический мониторинг природно-техногенных систем : сб матер. всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. : в 2 ч. – Ч. 2. (Киров, 1–2 дек. 2010 г.). Киров : Изд-во Вятск. гос. гуманит. ун-та, 2010. – С. 32–36.

11. Продуктивность растительных сообществ фоновых и техногенно нарушенных территорий / Т. В. Жуйкова, **В. А. Жуйкова (Гордеева)**, К. С. Волохина, И. С. Волохин // Экология от южных гор до северных морей : матер. конф. молодых ученых (Екатеринбург, 19–23 апр. 2010 г.). – Екатеринбург : Гощицкий, 2010. – С. 63–67.

12. **Жуйкова, В. А. (Гордеева)** Синтез и распад надземной фитомассы фоновых и техногенно нарушенных территорий / В. А. Жуйкова // I Ковалевские молодежные чтения «Почвы Сибири: прошлое, настоящее и будущее» : сб. матер. всерос. науч. конф. с междунар. участ. (Новосибирск, 30 нояб. – 3 дек. 2010 г.). – Новосибирск : Изд-во «Окарина», 2011. – С. 90–92.

13. Две стороны продукционного процесса в луговых сообществах техногенно нарушенных территорий / **В. А. Жуйкова (Гордеева)**, К. С. Волохина, И. С. Волохин, Т. В. Жуйкова // Экология: сквозь время и расстояние : матер. конф. молодых ученых (Екатеринбург, 11–15 апр. 2011 г.). – Екатеринбург : Гощицкий, 2011. – С. 73–81.

14. **Жуйкова, В. А. (Гордеева)** Продуктивность луговых сообществ фоновых и техногенно нарушенных территорий / В. А. Жуйкова // Матер. всерос. конкурса науч.-исслед. работ студентов и аспирантов в области биол. наук в рамках всерос. фестиваля науки : сб. матер. всерос. конкурса науч.-исслед. работ : в 2 ч. – Ч. 2. – Ульяновск : УлГУ, 2011. – С. 38–45.

15. **Жуйкова, В. А. (Гордеева)** Разложение растительных остатков в луговых сообществах фоновых и техногенно нарушенных территорий / В. А. Жуйкова, Т. В. Жуйкова // Современные проблемы популяционной экологии, геоботаники, систематики и флористики : матер. междунар. науч. конф., посвящ. 110-летию А. А. Уранова (Кострома, 31 окт. – 3 нояб. 2011 г.) : в 2 т. – Т. 1. – Кострома : КГУ им. Н. А. Некрасова, 2011. – С. 324–329.

16. **Жуйкова, В. А. (Гордеева)** Почвенное дыхание как интегральный показатель биологической активности почв / В. А. Жуйкова, Т. В. Жуйкова // Биологический мониторинг природно-техногенных систем : сб. матер. всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. (Киров, 29–30 ноября 2011 г.) : в 2 ч. – Ч. 2. – Киров : ООО «Лобань», 2011. – С. 32–36.

17. Участие почвенной микробиоты в процессах минерализации органического вещества при химическом загрязнении природных экосистем / **В. А. Жуйкова (Гордеева)**, Т. В. Жуйкова, В. С. Безель, Л. В. Костина, И. Б. Ившина // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. – 2012. – № 1 (18). – С. 108–117.

18. Участие почвенной микробиоты в процессах минерализации органического вещества при химическом загрязнении среды / Т. В. Жуйкова, **В. А. Жуйкова (Гордеева)**, В. С. Безель, И. Б. Ившина, Л. В. Костина // Биологическое разнообразие растительного мира Урала и сопредельных территорий: матер. Всерос. конф с междунар. участ. (Екатеринбург, 28 мая – 1 июня 2012 г.). – Екатеринбург : Голицынский, 2012. – С. 269–271.

19. Показатели численности микробиоты в условиях загрязнения почв тяжелыми металлами / Т. В. Жуйкова, **В. А. Жуйкова (Гордеева)**, В. С. Безель, Л. В. Костина // Биологические системы: устойчивость, механизмы и принципы функционирования: материалы IV Всерос. научн.-практ. конф. с междунар. участ. (Нижний Тагил, 26–29 мар. 2012 г.). – Ч. 1. – Нижний Тагил : НТГСПА, 2012. – С. 162–169.

20. Участие почвенной микробиоты в процессах разложения растительных остатков при загрязнении среды тяжелыми металлами / **В. А. Жуйкова (Гордеева)**, Т. В. Жуйкова, В. С. Безель, Л. В. Костина, И. Б. Ившина // Матер. Всерос. конкурса науч.-исслед. работ студентов и аспирантов в области биол. наук : сб. матер. всерос. конкурса науч.-исслед. работ. – Ч. 2. – Ульяновск : УлГУ, 2012. – С. 35–45.

21. Shifts in bacterial community structures along xenobiotic contamination gradients in soils of cold and temperate climates [Computer file] / I. Ivshina, V. Besel, T. Zhuykova, **V. Zhuykova (Gordeeva)**, L. Kostina, T. Kamenskih, A. Krivoruchko, M. Kuyukina, L. Ogurtsova, A. Soromotin, T. Moiseenko // Abstract book of 14th International Symposium on Microbial Ecology, Copenhagen, Denmark, 19–24 August 2012. PS16 – Soil microbiology and heterogeneity. – Computerdata (2 pages of pdf file). – Copenhagen, 2012. – 1 USB Flash Drive. – P. 31–32.

22. Роль природных и антропогенных факторов в формировании биогенных циклов химических элементов / В. С. Безель, Т. В. Жуйкова, С. В. Мухачева, **В. А. Жуйкова (Гордеева)** // Биогеохимия и биохимия микроэлементов в условиях техногенеза биосферы : матер. VIII Междунар. Биогеохимической школы, посвящ. 150-летию со дня рожд. акад. В. И. Вернадского (Гродно, 11–14 сент. 2013 г.). – М. : ГЕОХИ РАН, 2013. – С. 19–23.

23. Жуйкова, Т. В. Роль антропогенной трансформации почвенного покрова в формировании видового состава и продуктивности травянистых сообществ / Т. В. Жуйкова, Э. В. Мелинг, **В. А. Гордеева** // Тобольск научный – 2013 : матер. X

Всерос. науч.-практ. конф. с междунар.участ. (Тобольск, 25–26 окт. 2013 г.). – Тобольск : Тобольск. тип. филиал ОАО «Тюменский издат. дом», 2013. – С. 101–104.

24. Разнообразие и численность бактерий цикла азота в почвах техногенно нарушенных территорий / В. А. Гордеева, Т. В. Жуйкова, И. Б. Ившина, Л. В. Костина, В. С. Безель // Принципы и способы сохранения биоразнообразия : матер. V Междунар. науч. конф. (Йошкар-Ола, 9–13 дек. 2013 г.) : в 2 ч. – Йошкар-Ола : Марийск. гос. ун-т, 2013. – С. 110–114.

25. **Гордеева, В. А.** Продуктивность травянистых сообществ в условиях сочетанного действия химического загрязнения и погодноклиматических факторов / В. А. Гордеева, Т. В. Жуйкова // Тобольск научный – 2014 : матер. X Всерос. (с междунар. участ.) науч.-практ. конф. (Тобольск, 7–8 нояб. 2014 г.). – Тобольск : Тобольская тип. филиал ОАО «Тюменский издат. дом», 2014. – С. 58–61.

26. Сивкова, М. К. Ферментативная активность почв, загрязненными тяжелыми металлами / М. К. Сивкова, **В. А. Гордеева**, Т. В. Жуйкова // Актуальные проблемы и перспективы развития естественнонаучного образования : сб. материалов IV Всерос. науч.-практ. конф. (Нижний Тагил, 25–26 мар. 2015 г.). – Нижний Тагил : НТГСПИ, 2015. – С. 124–129.

27. Жуйкова, Т. В. Влияние токсической нагрузки и условий вегетации на фитомассу травяных сообществ / Т. В. Жуйкова, Э. В. Мелинг, **В. А. Гордеева** // Актуальные вопросы экологии и природопользования : сб. трудов Всерос. научно-практич. конф., посвящ. памяти член-корр. АН РБ, доктора биологических наук, профессора Миркина Бориса Михайловича : в 2 ч. – Ч. 1. – Уфа : РИЦ БашГУ, 2017. – С. 266–270.

28. Динамика травяных сообществ на отвалах горно-металлургической промышленности Нижнего Тагила / Э. В. Мелинг, Т. В. Жуйкова, Е. В. Голоушкина, **В. А. Гордеева** // Биологические системы: устойчивость, принципы и механизмы функционирования : сб. статей V Всерос. науч.-практ. конф. (Нижний Тагил, 1–4 мар. 2017 г.). – Нижний Тагил: Нижнетагильский гос. соц.-пед. ин-т (филиал) ФГАОУ ВО «Российский гос. проф.-пед. ун-т», 2017. – С. 237–246.

Подписано в печать 10.01.2018

Формат 60x84/16. Гарнитура Times.

Печать офсетная (на ризографе). Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 1.0. Тираж 100 экз. Заказ № 119.

Редакционно-издательский отдел НТГСПИ (ф) РГППУ.

Адрес: 622031, г. Нижний Тагил, ул. Красногвардейская, 57.