

Министерство образования и науки  
Донецкой Народной Республики  
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

*На правах рукописи*

*Фрунзе Оксана Валентиновна*  
*20.05.2020*

**Фрунзе Оксана Валентиновна**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ УРБАНИЗИРОВАННЫХ  
ТЕРРИТОРИЙ ФИТОРЕАБИЛИТАЦИЕЙ ПОЧВ С ПОЛУЧЕНИЕМ  
БИОТОПЛИВА**

05.23.19 – Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Макеевка – 2020

Работа выполнена на кафедре техносферной безопасности Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка.

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Высоцкий Сергей Павлович**  
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»  
заведующий кафедрой «Техносферная безопасность».

**Официальные оппоненты:** **Дрозд Геннадий Яковлевич** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Промышленное, гражданское строительство и архитектура» Института строительства, архитектуры и ЖКХ ГОУ ВПО «Луганский национальный университет имени Владимира Даля»

**Хазипова Вера Владимировна** кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры естественнонаучных дисциплин факультета «Техносферной безопасности» ГОУ ВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР

**Ведущая организация:** ГУ «Научно-исследовательский институт «Реактивэлектрон»

Защита состоится 15 октября 2020 года в 12<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 01.023.03 при ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, зал заседаний ученого совета. Тел. факс: +38 (0623) 22-77-19, e-mail: [d01.023.03@donnasa.ru](mailto:d01.023.03@donnasa.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» по адресу: 286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2 (<http://donnasa.ru>).

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 01.023.03

Башева Татьяна Сергеевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Урбанизация территорий и увеличение количества промышленных предприятий привели к интенсификации загрязнения почв на прилегающих территориях. Антропогенная деятельность и урбанизация биосферы сопровождается рассеиванием значительного количества тяжелых металлов, вовлеченных в миграционные процессы, которые являются высокотоксичными для человека. В вопросах экологической безопасности эта проблема остро стоит в промышленно развитых регионах всего мира, где расположены крупные индустриальные металлургические предприятия, сосредоточены многочисленные автотранспортные магистрали. Загрязнение городских почв тяжелыми металлами рассматривается в вопросах экологической безопасности и требует незамедлительного решения, направленного на восстановление деградированных почв с целью создания чистой и безопасной для живых организмов окружающей среды. Выделяют технологии очистки почв: фиксацию тяжелых металлов с помощью почвенных добавок, складирование на свалках, экстракцию, выщелачивание, однако данные методы требуют значительных капиталовложений. Фиторемедиация рассматривается как эффективная, менее затратная альтернатива общепринятым рекультивационным технологиям восстановления окружающей среды.

Общими механизмами фиторемедиации техногенных почв являются: фитостабилизация, фитоэкстракция, ризодеградация, фитодеградация, фиторассеивание. Механизмы фиторемедиации эффективно используются для удаления из почвы и грунтовых вод как неорганических, так и органических загрязняющих веществ. Идеальные для фиторемедиации почв растения должны характеризоваться способностью накапливать высокие концентрации металлов, быть устойчивыми к высоким концентрациям соли, иметь высокую скорость роста, быстро набирать биомассу, эффективно накапливать металл в надземных частях, обладать высокой теплотой сгорания и простотой уборки урожая для их дальнейшего использования в качестве биоэнергетического сырья.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Исследования теоретического и прикладного характера выполнены в соответствии с государственной научно-исследовательской темой: «Исследование стрессовых реакций хвойных и других видов растений под влиянием биотических и абиотических факторов внешней среды» (номер государственного учета НИОКТР 0117D000246).

**Степень разработанности темы исследования.** Теоретической основой для выполнения исследований в области фиторемедиации почв, повышения экологической безопасности урбанизированных территорий, являются работы Бессоновой В.П., Лихолата Ю.Г., Высоцкого С.П., Гуральчука Ж.З., Ильина В.Б., Zheng S.J., Kramer U., Yamamoto Y., Turner R.G. В работах Бессоновой В.П. рассматривается устойчивость растений в условиях полиметаллического стресса с целью их дальнейшего использования в технологиях восстановления окружающей среды. В большинстве экспериментальных работ Гуральчука Ж.З., Илькуна Н.М. изучается технология фиторемедиации только отдельных тяжелых металлов некоторыми видами растений. Учитывая полиметаллический характер антропогенного загрязнения промышленных регионов Донбасса, возникает потребность исследования технологии комплексной аккумуляции ионов тяжелых металлов в условиях их совместного поступления в почву.

**Цель исследования** – повышение экологической безопасности урбанизированных территорий вокруг промышленных объектов: тепловых электростанций, химических, металлургических и горнодобывающих предприятий, других опасных объектов за счет применения технологии фиторемедиации почв с получением биотоплива.

**Объект исследования** – деградированные почвы урбанизированных территорий, загрязненные ионами тяжелых металлов.

**Предмет исследования** – технология фитореабилитации урбанизированных территорий с выбором наиболее результативных гипераккумуляторов, обладающих наибольшей теплотой сгорания с получением биотоплива.

**Задачи исследования:**

- разработать малозатратную, экономически выгодную и экологически безопасную технологию фиторемедиации деградированных почв, загрязненных тяжелыми металлами, с последующей утилизацией отработанного биоматериала;

- для уменьшения уровня загрязнения почв возле металлургических предприятий произвести отбор устойчивых к полиметаллическому стрессу видов декоративных травянистых растений, по данным индекса толерантности, морфометрическим показателям и скорости роста;

- для получения биоэнергетического сырья в технологии фиторемедиации почв выявить виды декоративных травянистых растений с наибольшей теплотой сгорания в условиях полиметаллического стресса, определить наиболее эффективные энергетические культуры;

- для повышения эффективности фиторемедиации почв возле металлургических предприятий произвести отбор растений-гипераккумуляторов тяжелых металлов по данным фактора переноса и показателям сорбционной способности;

- для фиторемедиации почв с высоким содержанием свинца возле автомобильных дорог исследовать сорбционную эффективность устойчивых к загрязнению растений-гипераккумуляторов тяжелых металлов;

- провести опытно-промышленную апробацию технологии фиторемедиации почв возле металлургических предприятий в условиях полиметаллического стресса, определить экономическую эффективность и стоимостные преимущества технологии;

- для повышения устойчивости видов-гипераккумуляторов тяжелых металлов при выполнении функции фиторемедиации почв изучить биоадаптационные характеристики растений.

**Научная новизна полученных результатов** состоит в следующем:

- для технологии восстановления почв, загрязненных соединениями кобальта, марганца, хрома и свинца в условиях полиметаллического стресса произведен подбор видов растений-гипераккумуляторов: *Ageratum houstonianum* cv. *Bule Lagoon*, *Alyssum maritimum* Lam., *Brassica napus* L., *Cosmos sulphureus* Cav., *Linum usitatissimum* L., *Atriplex hortense* L., *Miscanthus sinensis* L. Экспериментальные объекты обладают высокой сорбционной способностью, устойчивы к высоким концентрациям тяжелых металлов, обладают большой скоростью роста, быстро набирают биомассу, обладают высокой теплотой сгорания, благодаря чему обеспечивают экономически выгодную и экологически безопасную утилизацию;

- установлены культуры с высокой теплотой сгорания в условиях полиметаллического стресса, которые могут быть вовлечены в соответствующие технологические процессы в качестве сырья для получения биотоплива. Теплота сгорания *Brassica napus* L., *Linum usitatissimum* L., *Atriplex hortense* L., *Miscanthus sinensis* L. составляет 16,5-18,0 МДж/кг. Показана связь биопродуктивности растений с их теплотой сгорания;

- экспериментально подтверждена способность изученных видов растений-гипераккумуляторов сорбировать из почвы высокие концентрации тяжелых металлов и аккумулировать их в вегетативных органах. Для *Ageratum houstonianum* cv. *Bule Lagoon*, *Alyssum maritimum* Lam., *Brassica napus* L., *Cosmos sulphureus* Cav. и *Linum usitatissimum* L.

фактор переноса металла превысил 15, что указывает на их высокую сорбционную способность;

- экспериментально доказана эффективность предложенной технологии фиторемедиации загрязненных тяжелыми металлами почв;

- установлено, что загрязнение почвы ионами тяжелых металлов не оказывает негативного влияния на биохимические показатели видов-гипераккумуляторов, что позволяет их рекомендовать для фитовосстановления деградированных почв.

#### **Практическое значение полученных результатов:**

- разработана эффективная технологическая схема фиторемедиации почв, загрязненных ионами кобальта, марганца и хрома, а также разработана экономически выгодная и экологически безопасная технология утилизации отработанного биоматериала, которая может быть рекомендована для внедрения в технологические процессы металлургических предприятий;

- произведен подбор видов растений-гипераккумуляторов кобальта, марганца, хрома, свинца в условиях полиметаллического стресса. Выведены аналитические зависимости степени концентрирования свинца в побегах растений от его концентрации в растворе; доказано, что ширина высева растений должна составлять до 10 м от кромки дороги II типа (не скоростная дорога с интенсивностью движения >6000 ед./сутки). Экспериментально доказана логистическая зависимость распределения концентрации ионов кобальта, марганца и хрома между вегетативными органами растений и содержанием металлов в почве во время контролируемого процесса фиторемедиации в полевых условиях;

- обоснованные научные положения диссертационного исследования внедрены в качестве составляющих мероприятий, которые направлены на повышение экологической безопасности предприятий в сфере услуг автомобильного грузового транспорта ФЛ-П Вороной В.В., ФЛ-П Базиян Л.М., ФЛ-П Зайнутдинова Е.Ю.;

- результаты работы внедрены в учебный процесс ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет» при подготовке бакалавров по направлению 05.03.06 «Экология и природопользование» по программе курсов «Рост и развитие растений в условиях металлопрессинга», «Тяжелые металлы в экосистемах».

**Методология и методы исследования.** При исследовании технологии фитореабилитации загрязненных почв опыты проводили по схеме полного трехфакторного трехуровневого эксперимента. Методы исследований разделены на две группы:

- лабораторные методы хроматографии, спектрофотометрии, колориметрии и атомно-абсорбционного анализа, а также морфофизиологический для определения биометрических показателей проростков;

- полевой метод исследования фиторемедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами возле металлургического предприятия; полевой метод исследования фиторемедиации почв вдоль автомобильных дорог.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- повышение экологической безопасности деградированных и загрязненных почв, вследствие применения технологии фитореабилитации;

- подбор энергетически эффективных видов-гипераккумуляторов тяжелых металлов, которые обладают устойчивостью к загрязнению и высокими показателями биопродуктивности, с целью их вовлечения в технологические процессы в качестве сырья для биотоплива;

- результаты комплексной оценки сорбционной способности культур, произрастающих в почве с высоким содержанием тяжелых металлов, с целью их использования в технологии восстановления почв.

**Личный вклад соискателя.** Определена цель и поставлены задачи исследования совместно с научным руководителем; проведен обзор публикаций по современному состоянию мер для поиска экономически эффективных и экологически чистых технологий восстановления деградированных почв, повышения их экологической безопасности; проведены экспериментальные исследования, статистически обработаны, интерпретированы и обобщены полученные результаты, сформулированы выводы.

**Апробация результатов.** Основные положения диссертационной работы рассмотрены и одобрены на: I Научно-практической конференции «Рослини та урбанізація» (Днепропетровск, 2007 г.); II Научно-практической конференции «Рослини та урбанізація» (Днепропетровск, 2011 г.); Международной конференции «От заповедования до сбалансированного природопользования» (Донецк, 2013 г.); Научной конференции Донецкого национального университета по итогам научно-исследовательской работы за период 2011-2012 гг. (Донецк, 2013 г.); III Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальные и прикладные исследования в биологии» (Донецк, 2014 г.); IX Международной научной конференции аспирантов и студентов «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов» (Донецк, 2015 г.); I Международной научной конференции «Донецкие чтения 2016. Образование, наука и вызовы современности» (Донецк, 2016 г.); II Научной конференции студентов и молодых ученых с международным участием «Актуальные проблемы наук о Земле» (Ростов-на-Дону, 2016 г.); III Международной научной конференции «Донецкие чтения 2018: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности» (Донецк, 2018 г.); IV Международной научной конференции «Донецкие чтения 2019: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности» (Донецк, 2019 г.); VIII Международной научно-практической конференции «Среда, окружающая человека: природная, техногенная, социальная» (Брянск, 2019 г.).

**Публикации.** Основные научные результаты диссертации опубликованы автором самостоятельно и в соавторстве в шести научных изданиях, в том числе три работы в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН Украины, шесть работ в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН ДНР, тринадцать работ в сборниках трудов международных и региональных научно-практических конференций и в других изданиях.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, семи разделов, выводов и рекомендаций, списка использованных источников из 242 наименований. Содержит 181 страницу, в том числе 147 страниц основного текста, 29 страниц списка использованной литературы, 5 страниц приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель и задачи диссертационного исследования, показана связь с научными программами, темами, приведены научная новизна, практическое значение полученных результатов, положения, выносимые на защиту.

**В первом разделе** проанализированы негативные аспекты влияния загрязнения почвы тяжелыми металлами на экологическую безопасность урбанизированных территорий, рассмотрено современное состояние и пути усовершенствования методов восстановления деградированных почв.

Урбанизация территорий и увеличение количества металлургических предприятий, автомагистралей привели к интенсификации загрязнения почв на прилегающих территориях. Основные виды загрязнений зависят от типа производств, размещенных на близлежащих территориях.

Термин «фиторемедиация» применяют к группе технологий, которые используют растения для уменьшения, извлечения, сорбции или деактивации токсинов окружающей среды, в первую очередь антропогенного происхождения, с целью восстановления загрязненных участков до состояния их пригодности для частного или общественного использования. Механизмы фиторемедиации эффективно используют для удаления из почвы и грунтовых вод как неорганических, так и органических загрязняющих веществ. Предполагается, что центры детоксикации тяжелых металлов находятся в листьях у растений-аккумуляторов и в корнях – у растений-исключателей. Некоторые растения по отношению к тяжелым металлам можно охарактеризовать как гипераккумуляторы. Около 500 видов растений являются гипераккумуляторами. Среди них выделяют значительное количество злаков.

**Во втором разделе** разработана схема проведения эксперимента, описаны объекты и методы исследований. В качестве загрязнителей использовались сульфат марганца, сульфат хрома и сульфат кобальта. Концентрации марганца составляли 0-3 г/кг, хрома – 0-6 мг/кг, кобальта – 0-10 мг/кг.

Активность фотосинтеза проростков определяли по изменению количества накопленного углерода органических веществ при мокром озолении растительных тканей в смеси бихромата калия и серной кислоты. Активность супероксиддисмутазы определяли по модифицированному методу Giannopolitis C.N. и Ries S.K. Определение метионина проводили по методике Саливана-Мак-Карти. Определение пролина проводили, используя методику Бейтса. Содержание марганца, кобальта и хрома в растительном и почвенном материале определяли по методу атомно-адсорбционной спектроскопии по В. Прайсу на атомно-адсорбционном спектрофотометре «Сатурн-3». Полученные данные обрабатывали статистически по методу Даннета.

**В третьем разделе** произведен отбор видов декоративных травянистых растений, устойчивых к загрязнению почвы ионами тяжелых металлов по данным индекса толерантности и показателям биопродуктивности растений, с целью их дальнейшего использования в технологии фитореабилитации деградированных почв.

По индексу толерантности выделили группу растений, устойчивых к полиметаллическому стрессу: *Ageratum houstonianum* cv. *Bule Lagoon*, *Alyssum maritimum* Lam., *Brassica napus* L., *Cosmos sulphureus* Cav., *Linum usitatissimum* L., *Atriplex hortense* L., *Miscanthus sinensis* L., *Lolium perenne* L., *Bromus arvensis* L.

Относительно устойчивые (толерантные): *Echinacea purpurea* L., *Agrostemma githago* L., *Silene coeli rosa*, *Phacelia tanacetifolia* L., *Zinnia agnustifolia* H., *Tagetes erectus* L., *Agrostis vulgaris* With., *Poa pratensis* L.

Чувствительные: *Salvia splendens* L., *Petunia Hybrida Grandiflora*, *Calendula officinalis* L., *Dahlia variabilis* Desf., *Festuca rubra* L.

**В четвертом разделе** приводятся результаты экспериментальных данных теплоты сгорания растений в условиях полиметаллического стресса, изменению площади листовой пластины и фотосинтетической активности. Выявлены наиболее эффективные энергетические культуры, с целью их вовлечения в технологические процессы в качестве биотоплива.

Теплота сгорания у разных видов растений неодинакова и колеблется от 10 до 23 МДж/кг. Так, у *Miscanthus sinensis* L., *Lolium perenne* L., *Bromus arvensis* L. Данный показатель растений, произрастающих на незагрязненной почве, составил 16,5-18,0 МДж/кг. В условиях загрязнения почвы ионами кобальта в концентрации 1 ПДК было отмечено увеличение теплоты сгорания растений на 3-5% в сравнении с контролем. Наибольшая теплота сгорания была зафиксирована у проростков *Miscanthus sinensis* L., что указывает на высокую энергетическую ценность (рисунок 1).

У проростков *Festuca rubra* L., *Agrostis vulgaris* With. и *Poa pratensis* L. в условиях незагрязненной почвы теплота сгорания колебалась в пределах 11-15,3 МДж/кг. При внесении в почву кобальта в концентрации 1 ПДК теплота сгорания проростков *Agrostis vulgaris* With. и *Poa pratensis* L. оставалась на прежнем уровне, а у *Festuca rubra* L. даже незначительное загрязнение почвы приводило к снижению данного показателя на 10%, в сравнении с контролем. Дальнейшее увеличение концентрации кобальта до 2 ПДК снижало теплоту сгорания *Festuca rubra* L., *Agrostis vulgaris* With. и *Poa pratensis* L. на 10-15% в сравнении с контролем.

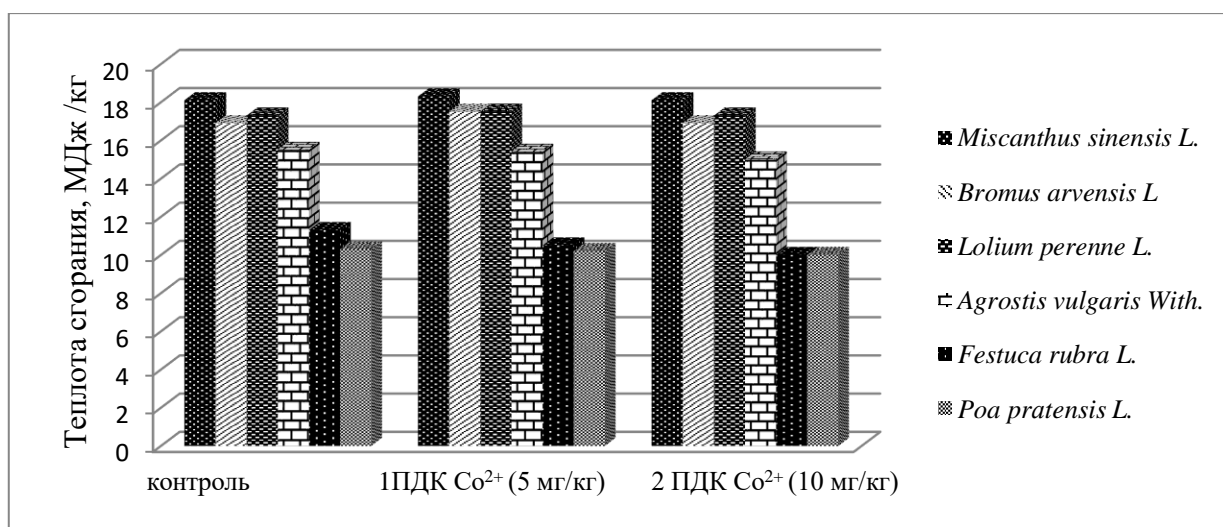


Рисунок 1 – Изменение теплоты сгорания злаков в условиях загрязнения почвы ионами кобальта

У проростков *Agrostis vulgaris* With. при внесении в почву 1 ПДК марганца теплота сгорания проростков возросла на 3%, при дальнейшем увеличении концентрации загрязнителя, данный показатель снизился на 12%. Наибольшая теплота сгорания была зафиксирована у проростков *Miscanthus sinensis* L. и *Bromus arvensis* L. (рисунок 2).

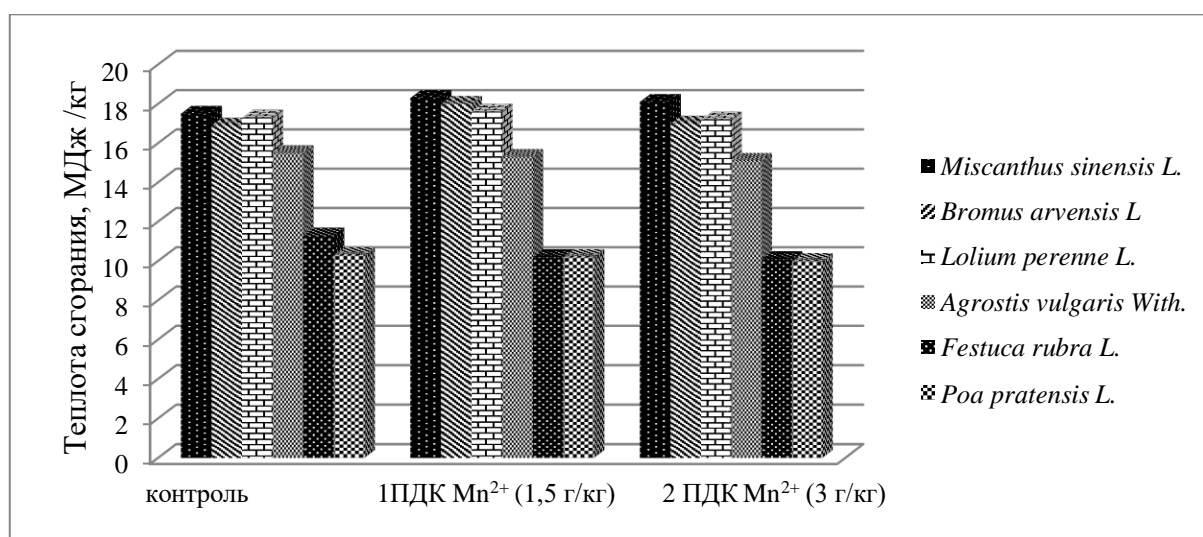


Рисунок 2 – Изменение теплоты сгорания злаков в условиях загрязнения почвы ионами марганца

При внесении в почву хрома в концентрации 1 ПДК у проростков *Miscanthus sinensis* L., *Lolium perenne* L., *Bromus arvensis* L. было отмечено увеличение теплоты сгорания



растений на 1-5% в сравнении с контролем (рисунок 3). При увеличении концентрации хрома в почве до 2 ПДК показатель теплоты сгорания растений оставался на уровне контроля. Наибольшая теплота сгорания была зафиксирована у проростков *Miscanthus sinensis* L. и *Bromus arvensis* L. Исследования показали, что внесение в почву 1 ПДК кобальта, марганца и хрома не оказывает негативного влияния на интенсивность фотосинтеза у устойчивых к загрязнению проростков. Даже при комплексном загрязнении почвы тяжелыми металлами не было зафиксировано снижения интенсивности фотосинтеза.

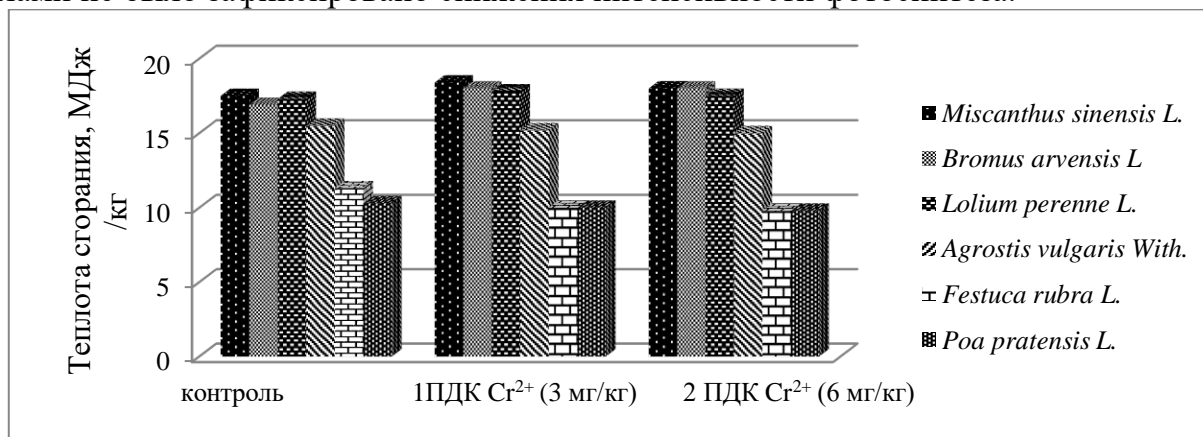


Рисунок 3 – Изменение теплоты сгорания злаков в условиях загрязнения почвы ионами хрома

На основании полученных экспериментальных данных выделены наиболее перспективные в качестве биотоплива культуры: *Brassica napus* L., *Linum usitatissimum* L., *Atriplex hortense* L., *Miscanthus sinensis* L., *Bromus arvensis* L. (таблица 1).

Таблица 1 – Выход энергии растений в производстве

Вид растения	Средняя урожайность растения, т/га	Теплота сгорания, МДж/кг	Выход энергии, МДж/га
<i>Miscanthus sinensis</i> L.	15	18	270000
<i>Brassica napus</i> L.	3,5	17	59500
<i>Linum usitatissimum</i> L.	1,8	15	27000
<i>Bromus arvensis</i> L.	1,5	14,5	21750

Многие культуры рассматриваются как эффективный возобновляемый энергетический ресурс, с высокой урожайностью. Средняя урожайность *Miscanthus sinensis* L. – 15-20 т/га, *Brassica napus* L. – 3-3,5 т/га, у *Linum usitatissimum* L. – 1,5-2 т/га, у *Atriplex hortense* L., *Bromus arvensis* L. урожайность варьирует от 1 до 1,5 т/га.

**В пятом разделе** выполнена оценка сорбционной способности растений, определен фактор переноса тяжелых металлов в системе почва-растение с целью выявления растений-гипераккумуляторов. В вариантах внесения в почву ионов кобальта в концентрации 1 ПДК наблюдалось повышение содержания металла в вегетативных органах *Ageratum houstonianum* cv. *Bule Lagoon*, *Alyssum maritimum* Lam., *Brassica napus* L., *Cosmos sulphureus* Cav., *Linum usitatissimum* L., *Atriplex hortense* L. в 2-6 раз. При увеличении концентрации поллютанта до 2 ПДК концентрация ионов кобальта в органах растений увеличилась в 6-10 раз (рисунок 4).

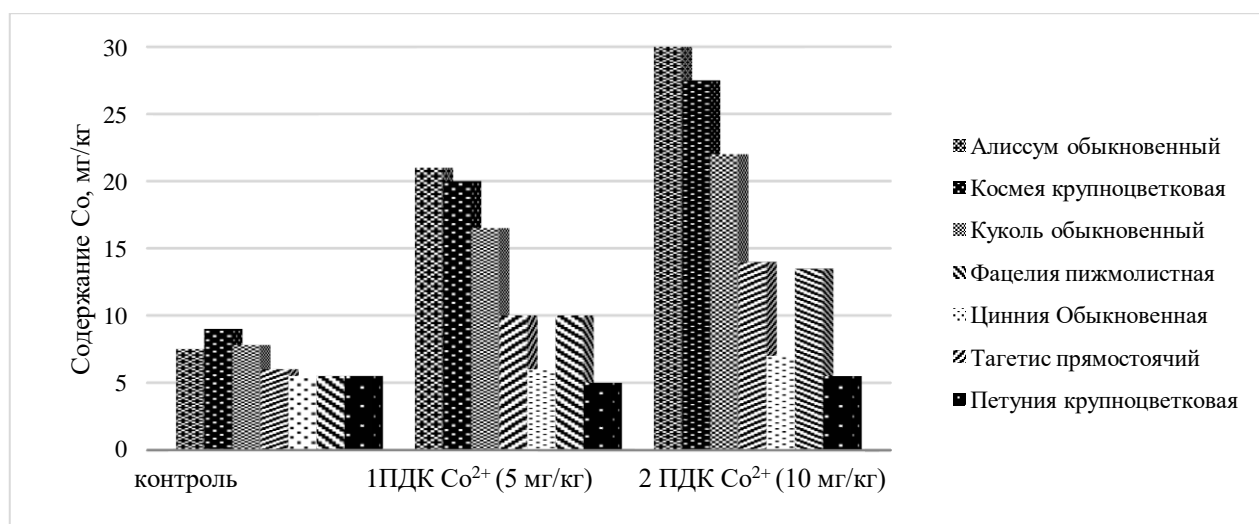


Рисунок 4 – Сорбция  $\text{Co}^{2+}$  декоративными травянистыми растениями

При внесении в почву марганца концентрации 1 ПДК наблюдалось повышение содержания данного металла в вегетативных органах *Ageratum houstonianum* cv. *Bule Lagoon*, *Alyssum maritimum* Lam., *Brassica napus* L., *Cosmos sulphureus* Cav., *Linum usitatissimum* L., *Atriplex hortense* L. в 4-6 раз по сравнению с растениями, выращенными на незагрязненной почве. При дальнейшем увеличении концентрации поллютанта до 2 ПДК также увеличивалась концентрация ионов марганца в вегетативных органах растений в 6-10 раз (рисунок 5).

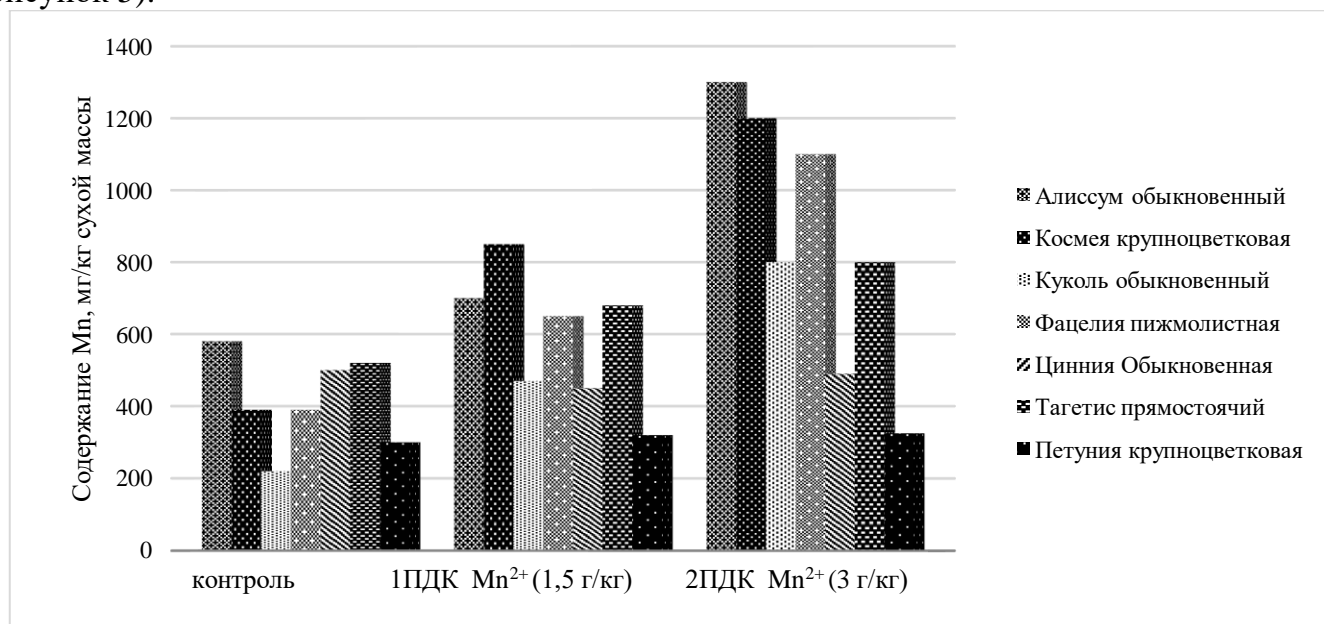


Рисунок 5 – Сорбция  $\text{Mn}^{2+}$  декоративными травянистыми растениями

У проростков *Echinacea purpurea* L., *Agrostemma githago* L., *Silene coeli rosa*, *Phacelia tanacetifolia* L., *Phacelia tanacetifolia* L., *Zinnia aqnostifolla* H., *Tagetes erectus* L. при внесении в почву 1 ПДК Mn также наблюдали способность сорбировать ионы марганца в 2-3 раза, в сравнении с контролем.

При внесении в почву ионов марганца в концентрации 1 и 2 ПДК практически не прослеживалось достоверного увеличения металла в вегетативных органах растений. Подобная закономерность отмечена и при внесении в почву ионов хрома (рисунок 6).

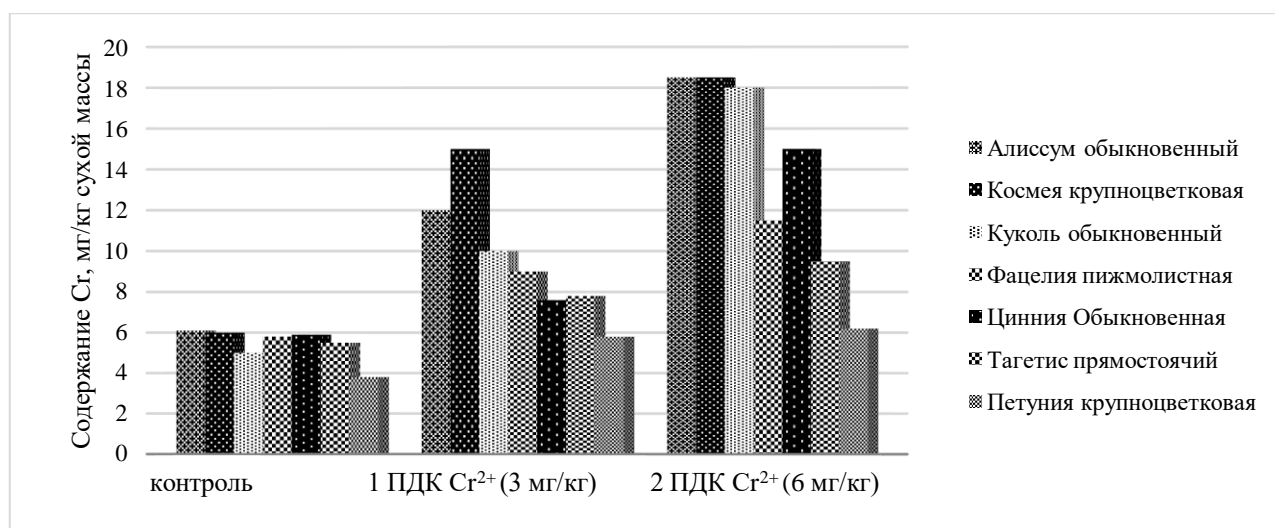


Рисунок 6 – Сорбция Cr<sup>2+</sup> декоративными травянистыми растениями

Исследования показали, что у *Ageratum houstonianum* cv. *Bule Lagoon*, *Alyssum maritimum* Lam., *Brassica napus* L., *Cosmos sulphureus* Cav. и *Linum usitatissimum* L. фактор переноса металла превысил 15 для Co, Mn и Cr, что говорит о высокой сорбционной способности данных видов растений (таблица 2).

Таблица 2 – Фактор переноса Co, Mn, Cr некоторых видов травянистых растений

№ п/п	Вид растения	Семейство	Фактор переноса		
			Co	Mn	Cr
1.	<i>Ageratum houstonianum</i> cv. <i>Bule Lagoon</i>	Asteraceae	15,1	15,2	15,2
2.	<i>Alyssum maritimum</i> Lam.	Brassicaceae	15,1	15,5	15,1
3.	<i>Brassica napus</i> L.	Brassicaceae	14,0	14,2	14,0
4.	<i>Cosmos sulphureus</i> Cav.	Asteraceae	14,8	14,0	14,0
5.	<i>Linum usitatissimum</i> L.	Linaceae	13,8	13,0	13,0
6.	<i>Atriplex hortense</i> L.	Amaranthaceae	6,6	6,8	6,5
7.	<i>Echinacea purpurea</i> L.	Asteraceae	5,5	5,5	5,6
8.	<i>Agrostemma githago</i> L.	Caryophyllaceae	5,3	5,5	5,5
9.	<i>Silene coeli rosa</i>	Caryophyllaceae	5,3	4,5	4,5
10.	<i>Phacelia tanacetifolia</i> L.	Boraginaceae	4,3	4,2	4,2
11.	<i>Zinnia aqnostifolla</i> H.	Asteraceae	3,2	3,2	3,2
12.	<i>Tagetes erectus</i> L.	Asteraceae	2,2	2,1	2,1
13.	<i>Salvia splendens</i> L.	Lamiaceae	1,1	1,0	1,0
14.	<i>Petunia Hybrida Grandiflora</i>	Solanaceae	1,0	1,0	1,0
15.	<i>Calendula officinalis</i> L.	Asteraceae	1,0	1,0	1,0
16.	<i>Dahlia variabilis</i> Desf.	Asteraceae	1,0	1,0	1,0

У *Atriplex hortense* L., *Echinacea purpurea* L., *Agrostemma githago* L., *Silene coeli rosa*, *Phacelia tanacetifolia* L., *Zinnia aqnostifolla* H., *Tagetes erectus* L. фактор переноса металла колебался от 6,5 до 3,2, что также показывает значительную способность данных видов растений к накоплению ионов Co, Mn и Cr. Наименьшую способность накапливать ионы тяжелых металлов показали проростки *Salvia splendens* L., *Petunia Hybrida Grandiflora*, *Calendula officinalis* L., *Dahlia variabilis* Desf., фактор переноса металла которых не превысил 1,0.

**В шестом разделе** приводятся результаты полевого исследования фитореабилитации почв с высоким содержанием свинца возле автомобильной дороги II типа (не скоростная дорога с интенсивностью движения >6000 ед./сутки) с использованием поглощения свинца клещевинной (*Ricinus communis*). Степень сорбции свинца в семенах клещевины описывается уравнением Вагелера – Ленгмюра. На рисунке 7 показана линеаризированная зависимость содержания свинца в побегах растения от содержания свинца в растворе. Аналитическое выражение зависимости имеет вид:

$$[Pb_p] = \frac{1,20 \cdot [Pb_{zn}]}{0,22 + [Pb_{zn}]}, \quad (1)$$

где  $[Pb_p]$  – содержание свинца в побегах клещевины, мг/кг;  
 $[Pb_{zn}]$  – содержание свинца в гидропоническом растворе, мкмоль/дм<sup>3</sup>

Изучение распределения ионов свинца в органах растения показало, что семена и корни обладают большей аккумулярующей способностью по сравнению с побегами. На рисунке 8 представлена аналитическая зависимость преобразованной концентрации свинца в плодах и корнях растения клещевины в зависимости от концентрации в гидропоническом растворе. Зависимость имеет вид: - для плодов растения:

$$\ln\left(\frac{C_m}{C} - 1\right) = 1,63 - 2,34 \cdot C_{гп}, \quad (2)$$

где  $C_m$  – концентрация свинца в растительном материале, мг/кг;  
 $C$  – общая концентрация свинца, мг/кг;  
 $C_{гп}$  – концентрация свинца в гидропоническом растворе, мкмоль/дм<sup>3</sup>;  
 - для корней растения:

$$\ln\left(\frac{C_m}{C} - 1\right) = 2,17 - 2,17 \cdot 10^{-2} \cdot C_{zn} \quad (3)$$

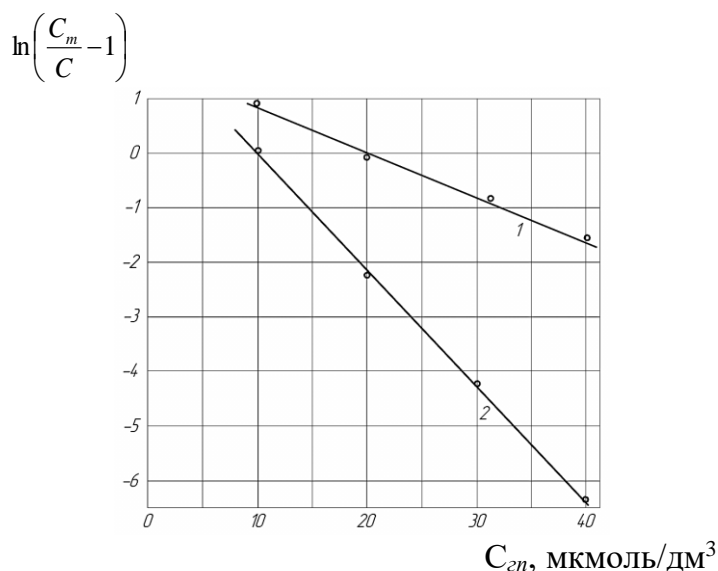
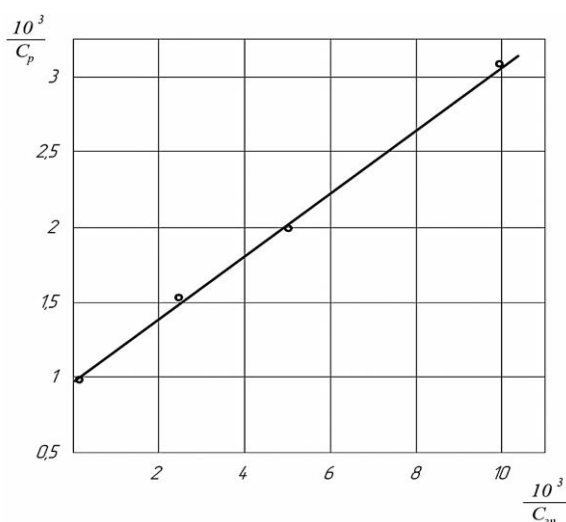


Рисунок 7 – Зависимость степени сорбции свинца побегами растений от его концентрации в гидропоническом растворе

Рисунок 8 – Зависимость накопления свинца в семенах (1) и корнях (2) клещевины от концентрации свинца в гидропоническом растворе

Распределение соединений свинца в почве вблизи от автомобильных магистралей подчиняется экспоненциальной зависимости обратно пропорциональной расстоянию от кромки дороги (рисунок 9). Экспериментальная зависимость описывается следующими уравнениями:

$$\ln D = 34 \frac{1}{L} + 1,1, \quad (4)$$

$$D = 3 \exp\left(\frac{34}{L}\right), \quad (5)$$

где  $D$  – концентрация свинца на расстоянии от кромки дороги, мг/кг;  
 $L$  – расстояние от кромки дороги, м.

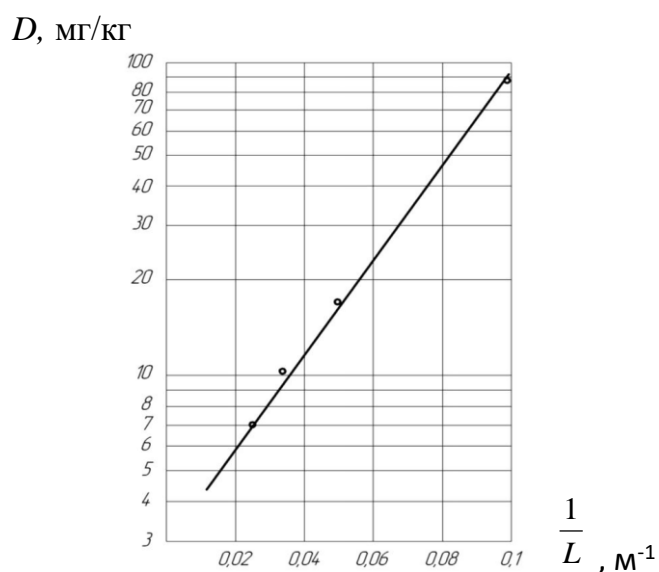


Рисунок 9 – Зависимость концентрации свинца в почве от расстояния от кромки дороги

Ширина высева клещевины должна составлять до 10 м от кромки автомобильной дороги II типа (не скоростная дорога с интенсивностью движения >6000 ед./сутки).

Полевой эксперимент проводили в зоне влияния металлургического завода ТЗНТС г. Тореза Донецкой области. Параметры почвы и концентрацию ионов кобальта, марганца и хрома в почве и сухой массе растений определяли в течение четырех вегетационных периодов. На территории преобладают малогумусные черноземы, с низкой влажностью и низким значением рН (таблица 3).

Таблица 3 – Биохимическая характеристика почвы опытного участка

№ п/п	Параметр	М±m
1	Влажность [%]	17,96±1,32
2	рН в Н <sub>2</sub> О	5,15-5,25
3	рН в 1М КСl	4,64-4,79
4	Гуминовые кислоты [%]	0,89±0,01
5	С всего [г/кг]	11,38±1,12
6	Р доступно [мг/кг]	23,96±0,78
7	Р всего [мг/кг]	75,33±5,22
8	Со [мг/кг]	14,47±0,27
9	Мn [г/кг]	5,740±2,00
10	Cr [мг/кг]	10,25± 0,12

Анализ содержания ионов тяжелых металлов в почве опытного участка показал высокий уровень ионов кобальта, превышающий ПДК в несколько раз. В течение полевого эксперимента были зафиксированы достоверные изменения концентрации кобальта, в почве опытного участка в течение всех четырех вегетационных периодов (рисунок 10).

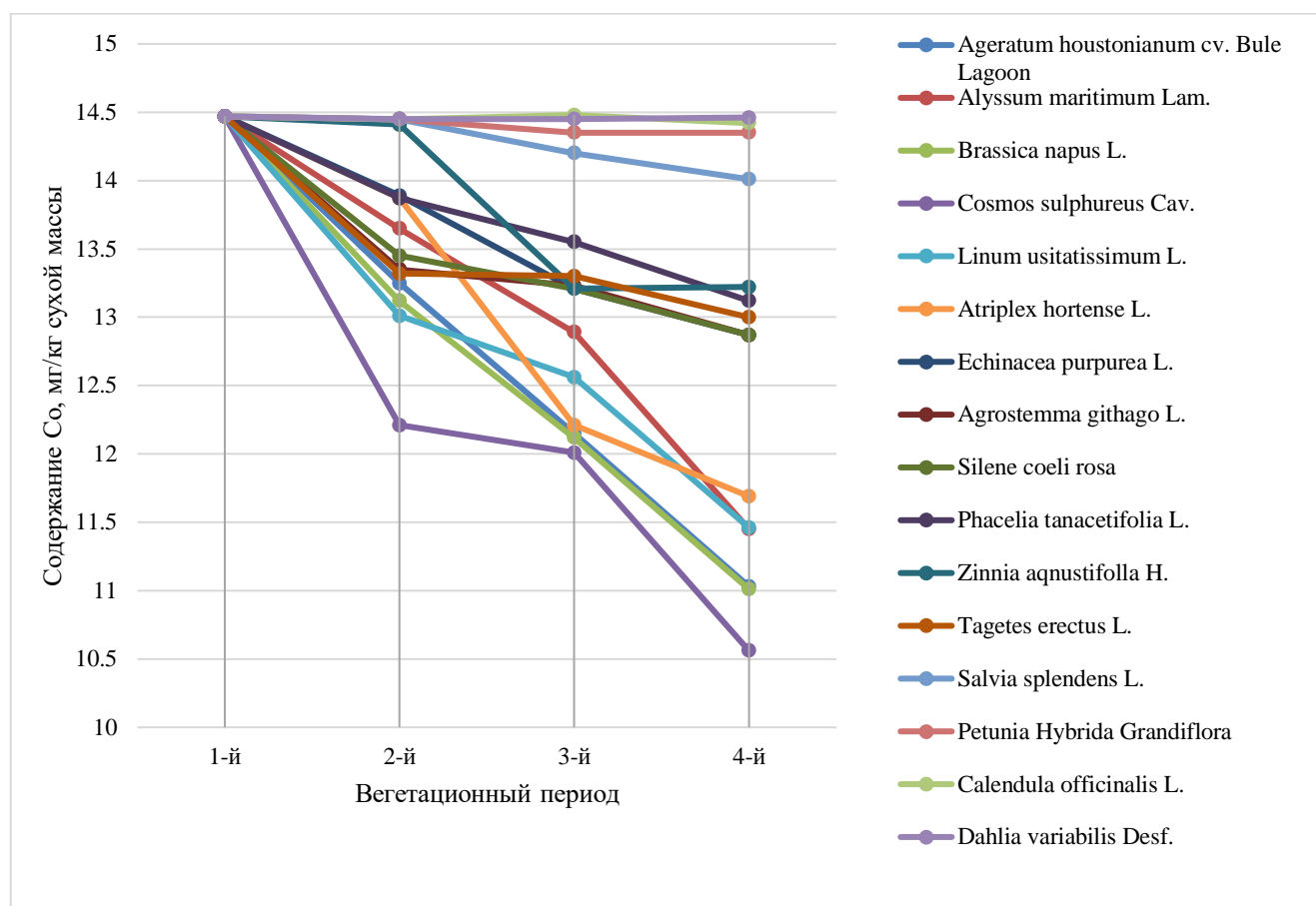


Рисунок 10 – Изменение концентрации  $Co^{2+}$  в почве, подверженной фиторемедиации с помощью декоративных травянистых растений

Так, при выращивании устойчивых к загрязнению проростков *Ageratum houstonianum* cv. *Bule Lagoon*, *Alyssum maritimum* Lam., *Brassica napus* L., *Cosmos sulphureus* Cav., *Linum usitatissimum* L., *Atriplex hortense* L. на 2-й вегетационный период наблюдалось снижение в почве опытного участка ионов кобальта на 10,1-30,6%, в конце 3-го – на 35,9-47%, в сравнении с первичными данными начала опыта. На 4-й вегетационный период концентрация в почве ионов кобальта снизилась на 49,2-57%.

При выращивании на опытном участке толерантных к загрязнению проростков *Echinacea purpurea* L., *Agrostemma githago* L., *Silene coeli rosa*, *Phacelia tanacetifolia* L., *Zinnia aqnostifolla* H., *Tagetes erectus* L., на 2-й вегетационный период было отмечено снижение ионов кобальта на 6,4-17,9%, на 3-й – на 26,4-33,7%, а на 4-й – на 30,3-31,8%, в сравнении с данными 1-го вегетационного периода.

Другая тенденция наблюдалась при выращивании на опытном участке чувствительных к загрязнению почвы проростков *Salvia splendens* L., *Petunia Hybrida Grandiflora*, *Calendula officinalis* L., *Dahlia variabilis* Desf. На 2-й, 3-й и 4-й вегетационные периоды практически не было отмечено изменения концентрации ионов кобальта в почве.

Анализ почвы опытного участка на содержание тяжелых металлов показал высокий уровень ионов марганца, превышающий ПДК в несколько раз. При выращивании устойчивых к загрязнению проростков *Ageratum houstonianum* cv. *Bule Lagoon*, *Alyssum maritimum* Lam.,

*Brassica napus* L., *Cosmos sulphureus* Cav., *Linum usitatissimum* L., *Atriplex hortense* L. на 2-й вегетационный период наблюдалось достоверное снижение в почве опытного участка ионов марганца на 14,7-29,1% (рисунок 11). В конце 3-го вегетационного периода концентрация марганца в почве уменьшилась на 30,5-45%, на 4-й – на 49,6-60,7%.

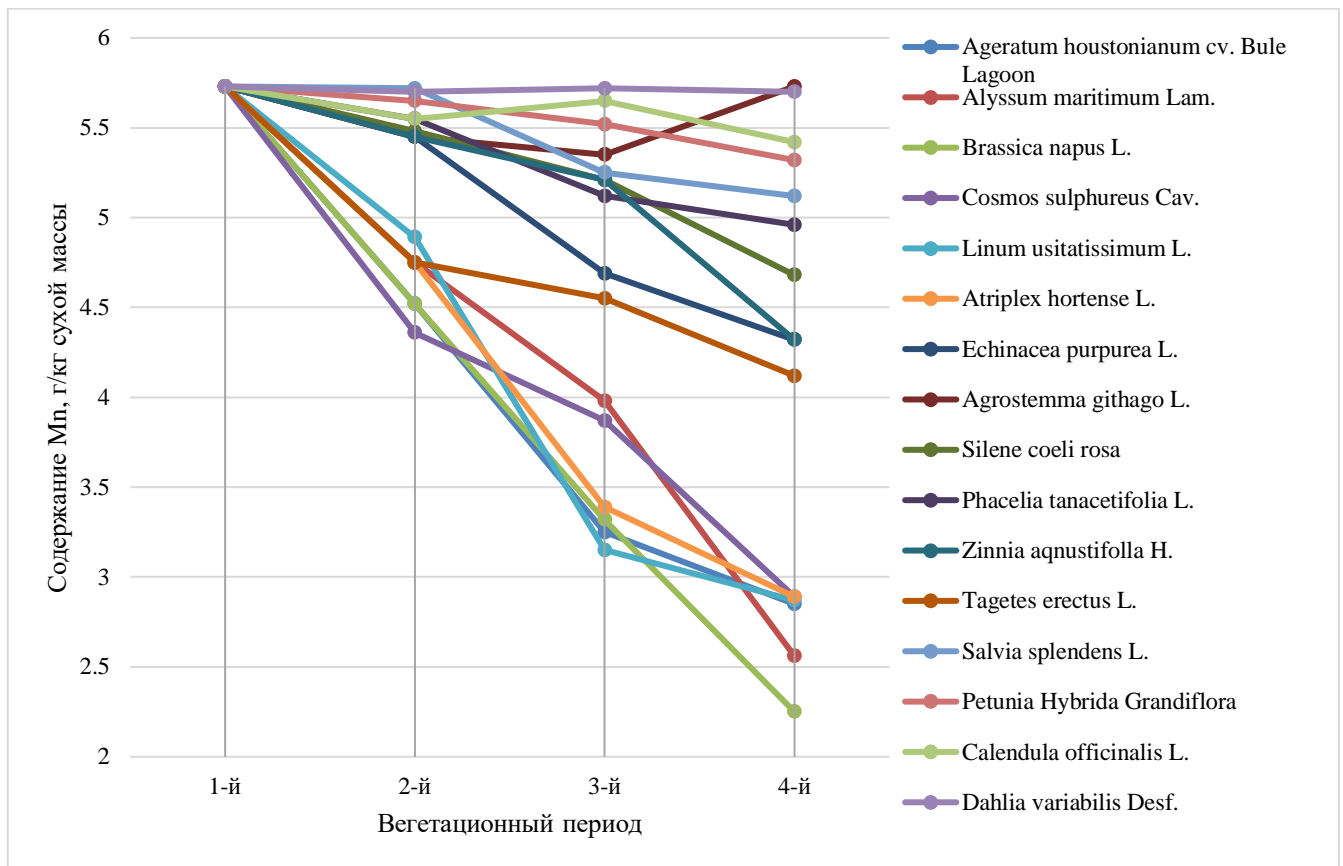


Рисунок 11 – Изменение концентрации  $Mn^{2+}$  в почве, подверженной фиторемедиации с помощью декоративных травянистых растений

При выращивании на опытном участке толерантных к загрязнению проростков *Echinacea purpurea* L., *Agrostemma githago* L., *Silene coeli rosa*, *Phacelia tanacetifolia* L., *Zinnia aqunustifolla* H., *Tagetes erectus* L. на 2-й вегетационный период было отмечено незначительное снижение ионов марганца на 15,1-17,1%, на 3-й – на 17,6-21%, а на 4-й – на 21,4-28% в сравнении с данными 1-го вегетационного периода. При выращивании на опытном участке чувствительных к загрязнению почвы проростков *Salvia splendens* L., *Petunia Hybrida Grandiflora*, *Calendula officinalis* L., *Dahlia variabilis* Desf. не было отмечено изменения концентрации ионов марганца в почве.

При выращивании устойчивых к загрязнению проростков *Ageratum houstonianum* cv. *Bule Lagoon*, *Alyssum maritimum* Lam., *Brassica napus* L., *Cosmos sulphureus* Cav., *Linum usitatissimum* L., *Atriplex hortense* L. на 2-й вегетационный период наблюдалось достоверное снижение в почве опытного участка ионов хрома на 10,3-15,8%, в конце третьего – на 16,5-27%, на четвертый – на 43,6-58,7%.

Технология фитовосстановления почв должна включать сбор биомассы после определенного вегетационного периода, ее подсушивание (торрефикацию) и сжигание (рисунок 12). В процессе сбора биомассы используют сенные прессы, тюковочные машины и транспортировщики. Тюковочные машины формируют большие тюки, которые имеют размеры 125x240 см и весят немного больше полутоны. Когда тюки ухвачены краном,

встроенная компьютерная система взвешивает груз и определяет содержание влаги в биоматериале, после чего тюки помещаются на конвейер и идут в камеру сжигания. Содержание воды в биоматериале не должно превышать 20% иначе возрастает риск возникновения коррозии оборудования и образования конденсата. Зольность биоматериала составляет 2-10%, средний показатель – 4%.



Рисунок 12 – Технологическая схема фиторемедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами с получением биотоплива

Для сжигания биомассы используют энергетическую установку Funep производства Дании. Биомасса сжигается на колосниковой решетке, установленной в нижней части котла – это наиболее распространенная технология утилизации биоматериала. Решетка устанавливается под небольшим наклоном и вибрирует, тем самым продвигая топливо к отверстию для сброса золы. Тюки из хранилища проходят через измельчители, транспортируются с помощью шнека на решетку в печном отделении. Небольшая доля пепла – зольная пыль – улавливается электрофильтрами до выхода газов через дымовую трубу.

Для улавливания золы из продуктов сжигания – дымовых газов все энергетические установки по сжиганию биомассы должны быть оснащены отработанными в мировой и отечественной практике очистки газовых выбросов, электрофильтрами.

Преимуществом сжигания биотоплива является то, что в продуктах сгорания практически нет диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ), в отличие от обычных электростанций, где 1/3 часть выбросов приходится на серу. Учитывая то, что продукты сжигания содержат значительное количество соединений металлов, это обеспечивает снижение удельного сопротивления



дымовых газов и, соответственно, увеличение эффективности процессов очистки газов от загрязнителей

Определены стоимостные преимущества технологии фитореабилитации почв, загрязненных ионами тяжелых металлов (таблица 4).

Таблица 4 – Стоимостные преимущества технологии фитореабилитации почв, загрязненных ионами тяжелых металлов

Технология очистки	Стоимость (доллар/м <sup>3</sup> )	Дополнительные факторы, увеличивающие расходы	Проблемы безопасности
Фиксация с помощью почвенных добавок	90-200	Снятие почвенного слоя, транспортировка, долгосрочный мониторинг	Вероятность выщелачивания
Складирование на свалках	100-400	Долгосрочный мониторинг	Вероятность выщелачивания
Экстракция, выщелачивание	250-500	Образование дополнительных отходов	Утилизация концентратов
Фитореабилитация	15-40	-	Утилизация биомассы

Технология фитореабилитации в 6-11 раз дешевле химических и механических технологий очистки почв, не требует дополнительных факторов, которые увеличивают расходы, не несет проблемы безопасности, а дает возможность получения дополнительного экономического эффекта: рекуперация из биоматериала ценных цветных металлов, получение метана при сбраживании в метантенках, получение электро- и теплоэнергии.

**В седьмом разделе** с целью повышения устойчивости растений-гипераккумуляторов, которые используются в технологии фиторемедиации урбанизированных территорий, в условиях полиметаллического стресса, исследованы их биоадаптационные характеристики: активность антиоксидантной системы, содержание стрессовых аминокислот. У устойчивых к загрязнению проростков *Ageratum houstonianum* cv. *Bule Lagoon*, *Alyssum maritimum* Lam., *Brassica napus* L., *Cosmos sulphureus* Cav., *Linum usitatissimum* L., *Atriplex hortense* L., *Miscanthus sinensis* L., *Lolium perenne* L., *Bromus arvensis* L. отмечено увеличение активности всех антиоксидантных ферментов и повышение содержания стрессовых аминокислот во всех вариантах загрязнения почвы, что указывает на высокую адаптационную способность растений и возможность их использования в технологии фиторемедиации загрязненных почв. У толерантных к загрязнению *Echinacea purpurea* L., *Agrostemma githago* L., *Silene coeli rosa*, *Phacelia tanacetifolia* L., *Zinnia aqnostifolia* H., *Tagetes erectus* L., *Agrostis vulgaris* With., *Poa pratensis* L. также прослеживается увеличение показателей антиоксидантных ферментов и стрессовых аминокислот при отдельном внесении загрязнителей, в условиях же полиметаллического стресса отмечено достоверное уменьшение как активности ферментов, так и количества аминокислот. У чувствительных к загрязнению почвы *Salvia splendens* L., *Petunia Hybrida Grandiflora*, *Calendula officinalis* L., *Dahlia variabilis* Desf., *Festuca rubra* L. во всех вариантах загрязнения отмечено снижение активности всех антиоксидантных ферментов и уменьшение содержания стрессовых аминокислот, что говорит об ослаблении защитных систем растений и невозможности их применения в технологии фиторемедиации почв.

## ВЫВОДЫ

1. Разработан способ, позволяющий повысить уровень экологической безопасности урбанизированных территорий вокруг опасных для окружающей среды промышленных объектов за счет применения технологии фитореабилитации почв с получением биотоплива.

2. Для уменьшения уровня загрязнения почв возле металлургических предприятий по данным индекса толерантности, комплекса морфометрических показателей и скорости роста выделены виды, устойчивые к полиметаллическому стрессу: *Ageratum houstonianum* cv. *Bule Lagoon*, *Alyssum maritimum* Lam., *Brassica napus* L., *Cosmos sulphureus* Cav., *Linum usitatissimum* L., *Atriplex hortense* L., *Miscanthus sinensis* L., *Lolium perenne* L., *Bromus arvensis* L. Относительно устойчивы (толерантные): *Echinacea purpurea* L., *Agrostemma githago* L., *Silene coeli rosa*, *Phacelia tanacetifolia* L., *Zinnia agnustifolia* H., *Tagetes erectus* L., *Agrostis vulgaris* With., *Poa pratensis* L. Чувствительные: *Salvia splendens* L., *Petunia Hybrida Grandiflora*, *Calendula officinalis* L., *Dahlia variabilis* Desf., *Festuca rubra* L.

3. В технологии фитореабилитации почв, с целью получения биоэнергетического сырья установлена наибольшая теплота сгорания в условиях полиметаллического стресса у устойчивых проростков *Ageratum houstonianum* cv. *Bule Lagoon*, *Alyssum maritimum* Lam., *Brassica napus* L., *Cosmos sulphureus* Cav., *Linum usitatissimum* L., *Atriplex hortense* L., *Miscanthus sinensis* L., *Lolium perenne* L., *Bromus arvensis* L. 16,5-18,0 МДж/кг, которые так же отличаются высокой биопродуктивностью: *Miscanthus sinensis* L. – 15-20 т/га, *Brassica napus* L. – 3-3,5 т/га, у *Linum usitatissimum* L. – 1,5-2 т/га, у *Atriplex hortense* L., *Bromus arvensis* L. биопродуктивность варьирует от 1 до 1,5 т/га. Наименьшая теплота сгорания отмечена у чувствительных *Salvia splendens* L., *Petunia Hybrida Grandiflora*, *Calendula officinalis* L., *Dahlia variabilis* Desf., *Festuca rubra* L.

4. Выделены устойчивые к загрязнению почв растения-гипераккумуляторы тяжелых металлов *Ageratum houstonianum* cv. *Bule Lagoon*, *Alyssum maritimum* Lam., *Brassica napus* L., *Cosmos sulphureus* Cav., *Linum usitatissimum* L., *Atriplex hortense* L., *Miscanthus sinensis* L., *Lolium perenne* L., *Bromus arvensis* L. у которых зафиксирован самый высокий фактор переноса металла в пределах 15, что говорит об их высокой сорбционной способности. У толерантных *Echinacea purpurea* L., *Agrostemma githago* L., *Silene coeli rosa*, *Phacelia tanacetifolia* L., *Zinnia agnustifolia* H., *Tagetes erectus* L., *Agrostis vulgaris* With., *Poa pratensis* L. фактор переноса металла снизился до 6,5. Наименьшая способность накапливать ионы тяжелых металлов отмечена у чувствительных к загрязнению проростков *Salvia splendens* L., *Petunia Hybrida Grandiflora*, *Calendula officinalis* L., *Dahlia variabilis* Desf., *Festuca rubra* L.

5. Реабилитация территорий, прилегающих к автомобильным дорогам, может быть реализована за счет высевания клещевины, которая обладает гипераккумулятивной способностью к соединениям свинца. Зависимость концентрации свинца в побегах клещевины от концентрации в растворе при гидропоническом выращивании клещевины подчиняется закону Вагелера–Ленгмюра. Распределение концентрации свинца между семенами и корнями растения, и концентрацией свинца в растворе описывается логистической зависимостью. Выведены аналитические зависимости степени концентрирования свинца в семенах и побегах клещевины в зависимости от концентрации в растворе при гидропоническом выращивании клещевины. Территорию выращивания фитосорбентов целесообразно ограничить расстоянием по 10 м от кромки автотрассы.

6. При опытно-промышленной апробации технологии фиторемедиации почв возле металлургических предприятий в условиях полиметаллического стресса подтверждена высокая сорбционная способность видов-гипераккумуляторов *Ageratum houstonianum* cv. *Bule Lagoon*, *Alyssum maritimum* Lam., *Brassica napus* L., *Cosmos sulphureus* Cav., *Linum*

*usitatissimum* L., *Atriplex hortense* L., *Miscanthus sinensis* L., *Lolium perenne* L., *Bromus arvensis* L., которые можно использовать в технологии восстановления деградированных почв. Распределение концентрации ионов тяжелых металлов между вегетативными органами растений и их концентрацией в растворе описывается логистической зависимостью. Технология фитореабилитации в 6-11 раз дешевле химических и механических технологий очистки почв, не несет проблемы безопасности, и дает возможность получения дополнительного экономического эффекта.

7. У устойчивых к загрязнению растений отмечена стабильная тенденция к увеличению биоадаптационных характеристик: активности антиоксидантных ферментов, количества аминокислот, что указывает на их высокую адаптационную способность и возможность использования в технологии фиторемедиации загрязненных почв. У чувствительных к действию поллютантов видов в условиях полиметаллического стресса активность антиоксидантных ферментов и содержание аминокислот уменьшается, что говорит о невозможности их применения в технологии фиторемедиации почв.

## ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

- публикации в специализированных изданиях, рекомендованных МОН ДНР:

1. Высоцкий, С.П. Фитореабилитация близлежащих к автомобильным трассам территорий [Текст] / С.П. Высоцкий, **О.В. Фрунзе** // Вестник Автомобильно-дорожного института Донецкого национального технического университета: международный научно-технический журнал / Автомобильно-дорожный институт ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет». – Горловка: 2019. – Вып. № 2(29). – С. 59-65. *(Определены границы зоны распространения загрязнителей по степени сорбции свинца в побегах, семенах и корнях клещевины)*

2. Высоцкий, С.П. Фиторемедиация загрязненных тяжелыми металлами почв с помощью злаков [Текст] / С.П. Высоцкий, **О.В. Фрунзе** // Вестник Академии гражданской защиты: научный журнал. – Донецк: ГОУВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, 2019. – Вып. 3 (19) – С. 117 – 123. *(Определен фактор переноса ионов Co, Mn, Cr для злаков; выявлены виды-гиперакумуляторы тяжелых металлов)*

3. Высоцкий, С.П. Восстановление почв, загрязненных тяжелыми металлами, методом фиторемедиации [Текст] / С.П. Высоцкий, **О.В. Фрунзе** // Вестник Автомобильно-дорожного института Донецкого национального технического университета: международный научно-технический журнал / Автомобильно-дорожный институт ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет». – Горловка: 2019. – Вып. № 3(30). – С. 35-43. *(Определен фактор переноса ионов Co, Mn, Cr для декоративных травянистых растений; выявлены виды-гиперакумуляторы тяжелых металлов)*

4. Высоцкий, С.П. Технология фиторемедиации загрязненных тяжелыми металлами почв с помощью декоративных травянистых растений [Текст] / С.П. Высоцкий, **О.В. Фрунзе** // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры / ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». – Макеевка: 2019. – Вып. №5(139). – С. 105-113. *(Установлена эффективность технологии фиторемедиации почв в условиях полиметаллического стресса)*

5. **Фрунзе, О.В.** Изменение площади листовой пластины некоторых видов декоративных травянистых растений в условиях загрязнения почвы ионами кобальта и марганца [Текст] / **О.В. Фрунзе**, С.В. Киселев // Научно-практический журнал Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона / ГОУВПО «Донецкий национальный

университет». – Донецк: 2017. – Вып. № 3-4. – С. 79-84 (*Выявлена зависимость изменения площади листовой пластины от концентрации ионов тяжелых металлов в почве*)

6. **Фрунзе, О.В.** Содержание кобальта и марганца в проростках декоративных травянистых растений в условиях контролируемого загрязнения [Текст] / **О.В. Фрунзе**, М.Н. Конопленко // Научно-практический журнал Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона / ГОУВПО «Донецкий национальный университет». – Донецк: 2018. – Вып. № 3-4. С. 132-136 (*Установлена зависимость накопления тяжелых металлов вегетативными органами растений от концентрации металла в почве*)

- публикации в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН Украины:

1. **Хромих, О.В.** Вплив забруднення ґрунту кобальтом та марганцем на фотосинтетичну активність квітково-декоративних рослин / **О.В. Хромих** // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. – Луганськ: видавництво ЛНАУ, 2008. – № 82. – С. 189-195 (*Получена зависимость интенсивности фотосинтеза от концентрации ионов тяжелых металлов в почве*)

2. **Хромих, О.В.** Вплив забруднення ґрунту кобальтом та марганцем на ростові показники деяких видів квітково-декоративних рослин [Текст] / **О.В. Хромих** // Науково-практичний журнал Проблеми екології та охорони природи техногенного регіону / Донецький національний університет. – Донецьк: 2011. – Вип. № 1(11). – С. 275-290 (*Выявлена закономерность устойчивости растений от индекса толерантности*)

3. **Хромих, О.В.** Зміни вмісту хлорофілів трав'янистих декоративних рослин за умов забруднення ґрунту сполуками кобальту та марганцю [Текст] / **О.В. Хромих** // Вісник Дніпропетровського державного аграрно-економічного університету / Дніпропетровський державний аграрно-економічний університет. – Дніпропетровськ: 2014. – Вип. № 1(33). – С. 15-22. (*Выявлены закономерности изменения фотосинтетического аппарата растений в условиях полиметаллического стресса*)

- публикации в других изданиях:

1. **Хромих, О.В.** Вплив іонів кобальту та марганцю на деякі морфометричні показники газонних трав [Текст] / **О.В. Хромих** // Молодь та поступ біології: III Міжнародна наукова конференція студентів та аспірантів (23-27 квітня 2007 року, м. Львів). – Львів, 2007. – С. 445.

2. **Хромих, О.В.** Вплив забруднення ґрунту кобальтом та марганцем на інтенсивність фотосинтезу деяких видів газонних трав [Текст] / **О.В. Хромих** // Рослини та урбанізація: Матеріали Першої науково-практичної конференції «Рослини та урбанізація» (Дніпропетровськ, 21-23 листопад 2007 р.). – Дніпропетровськ: ООО ТПГ «Куница», 2007. – 260 с.

3. **Хромих, О.В.** Активність пероксидази проростків деяких видів газонних трав за умов забруднення ґрунту кобальтом та марганцем [Текст] / **О.В. Хромих** // Фундаментальні та прикладні дослідження в біології: матеріали I міжнародної наукової конференції студентів, аспірантів та молодих учених (23-26 лютого 2009 р., м. Донецьк) / Донецький національний університет. – Донецьк: Вид-во «Вебер», 2009. – С. 325-326

4. **Хромих, О.В.** Вплив забруднення ґрунту сполуками кобальту та марганцю на антиоксидантну систему проростків деяких видів квіткових декоративних рослин [Текст] / **О.В. Хромих** // Рослини та урбанізація: Матеріали другої міжнародної науково-практичної конференції «Рослини та урбанізація» (Дніпропетровськ, 29-30 листопада 2011 р.). – Дніпропетровськ: ТОВ ТВГ «Куница», 2011. – С. 77-80

5. **Хромых, О.В.** Негативное влияние ионов кобальта и марганца на площадь листовой пластины проростков цветковых декоративных растений [Текст] / **О.В. Хромых**, Г.В. Постникова // Донецкие чтения 2016 Образование, наука и вызовы современности: Материалы I Международной научной конференции (Донецк, 16-18 мая 2016 г.). – Том 1.

Физико-математические, технические науки и экология / под общей редакцией проф. С.В. Беспаловой. – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. – С. 288-290

6. **Хромих, О.В.** Вплив забруднення ґрунту кобальтом та марганцем на фотосинтетичну активність квітково-декоративних рослин [Текст] / **О.В. Хромих** // Матеріали наукової конференції Донецького національного університету за підсумками науково-дослідної роботи за період 2011-2012 рр. (у 2 томах). Т.1 / Донецьк: ДонНУ, 2013. – С. 235-236

7. **Хромих, О.В.** Модифікації пігментного компоненту хлоропластів вивчених видів декоративних трав'янистих рослин в умовах металевого навантаження [Текст] / **О.В. Хромих** // Фундаментальні та прикладні дослідження в біології: Матеріали III Міжнародної наукової конференції студентів, аспірантів та молодих учених (24-27 лютого 2014 р., м. Донецьк). – Донецьк: Вид-во «Ноулідж» (Донецьке відділення), 2014. – С. 183

8. Постникова, Г.В. Изменения содержания пролина и триптофана у проростков декоративных травянистых растений в условиях действия кобальта и марганца [Текст] / Г.В. Постникова, О.В. Жушман, **О.В. Хромых** // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: сборник докладов IX Международной научной конференции аспирантов и студентов / ДонНТУ, ДонНУ. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2015. – С. 260-262

9. **Хромых, О.В.** Изучение влияния ионов кобальта и марганца на площадь листовой пластины проростков цветковых декоративных растений [Текст] / **О.В. Хромых** // Актуальные проблемы наук о Земле: сборник трудов II научной конференции студентов и молодых ученых с международным участием / Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. – С. 483-484.

10. **Фрунзе, О.В.** Изменение площади листовой поверхности у проростков некоторых видов декоративных травянистых растений в условиях загрязнения почвы ионами кобальта и марганца [Текст] / **О.В. Фрунзе**, Н.К. Фифилова, М.Н. Гасанова // Донецкие чтения 2018: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы III Международной научной конференции (Донецк, 25 октября 2018 г.). – Том 2: Химико-биологические науки / под общей редакцией проф. С.В. Беспаловой. – Донецк: Изд-во ДонНУ, 2018. – С. 283-286.

11. Колесникова, А.А. Фиторемедиация почв, загрязненных ионами кобальта, марганца и хрома [Текст] / А.А. Колесникова, А.П. Качмар, **О.В. Фрунзе** // Донецкие чтения 2019: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы IV Международной научной конференции (Донецк, 31 октября 2019 г.). – Том 2: Химико-биологические науки / под общей редакцией проф. С.В. Беспаловой. – Донецк: Изд-во ДонНУ, 2019. – С. 347-349.

12. Сафонов, А.И. Фиторемедиационный эффект по данным экологического мониторинга в Донбассе [Текст] / А.И. Сафонов, **О.В. Фрунзе** // Среда, окружающая человека: природная, техногенная, социальная. Материалы VIII Международной научно-практической конференции (Брянск, 25–27 апреля 2019 г.). – Брянск: Изд-во БГИТУ, 2019. – С. 159-162.

13. Высоцкий, С.П. Изменение теплотворной способности газонных трав в условиях загрязнения почвы ионами тяжелых металлов / С.П. Высоцкий, **О.В. Фрунзе** // Вестник Луганского национального университета им. В. Даля. Возрождение, экология, ресурсосбережение и энергоэффективность инженерной инфраструктуры урбанизированных территорий Донбасса: традиции и инновации. – 2019. – №10 (28). – С. 143-148.

## АННОТАЦИЯ

Фрунзе Оксана Валентиновна. **Повышение экологической безопасности урбанизированных территорий фитореабилитацией почв с получением биотоплива.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.19 – Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства. – Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». – Макеевка, 2019 г.

Диссертация посвящена повышению экологической безопасности урбанизированных территорий фитореабилитацией почв с получением биотоплива.

Предложена рациональная технологическая схема фитореабилитации почв, загрязненных тяжелыми металлами, с получением биотоплива. В работе выделены растения, устойчивые к полиметаллическому стрессу, которые обладают высокими морфометрическими показателями и скоростью роста. С целью получения биотоплива установлена наибольшая теплота сгорания растений в условиях металлопрессинга. Экспериментально доказана зависимость теплоты сгорания растений от активности фотосинтеза и площади листовой пластинки. Выделены устойчивые к загрязнению растения-гипераккумуляторы тяжелых металлов, у которых зафиксирован самый высокий фактор переноса металла. Выведена зависимость концентрации свинца в побегах растений от концентрации металла в растворе, которая подчиняется закону Вагелера-Ленгмюра. Выведены аналитические зависимости степени концентрирования свинца в побегах растений от его концентрации в растворе. Экспериментально доказана логистическая зависимость распределения концентрации ионов кобальта, марганца и хрома между вегетативными органами растений и содержанием металлов в почве во время контролируемого процесса фиторемедиации в полевых условиях.

У устойчивых к загрязнению видов растений-гипераккумуляторов экспериментально доказана тенденция к увеличению биоадаптационных характеристик: активности антиоксидантных ферментов, количества стрессовых аминокислот в условиях полиметаллического стресса.

Результаты диссертационного исследования приняты предприятиями в сфере услуг автомобильного грузового транспорта ФЛ-П Вороной В.В., ФЛ-П Базиян Л.М., ФЛ-П Зайнутдинова Е.Ю. в качестве составляющих мероприятий, которые направлены на повышение экологической безопасности урбанизированных территорий. Основные научные разработки автора используются в учебном процессе ГОУ ВПО «ДонНУ» при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Экология и природопользование».

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, урбанизированные территории, тяжелые металлы, фитореабилитация, биотопливо, сорбционная способность, растения-гипераккумуляторы.

## ANNOTATION

Frunze Oksana Valentinovna. **Improving the environmental safety of urban areas by phytorehabilitation of soils with the production of biofuels.** – Manuscript.

The thesis for the Candidat of Sciences (Ph.D.) in engineering 05.23.19 – Environmental safety of construction and urban economy. -State Educational Institution of Higher Professional Education "Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture." – Makeyevka, 2019.

This thesis focused on improving the environmental safety of urban areas by phytorehabilitation of soils with the production of biofuels. In the thesis, plants resistant to polymetallic stress, which have high morphometric indicators and growth rate, have been identified. In order to obtain biofuels, the highest calorific value of plants was established under metal pressing. The dependence of the calorific value of plants on the activity of photosynthesis and the area of the leaf blade has been experimentally proved.

Pollution-resistant heavy metal plants-hyperaccumulators, which have the highest metal transfer factor, have been identified. The dependence of the concentration of lead in the plant shoots on the concentration of metal in the solution, which obeys the Wageler-Langmuir law, is derived. Analytical dependences of the degree of concentration of lead in plant shoots on its concentration in solution are derived. The logistic dependence of the distribution of the concentration of cobalt, manganese and chromium ions between the vegetative organs of plants and the metal content in the soil during the controlled process of phytoremediation in the field has been experimentally proved.

In pollution-resistant species of plants-hyperaccumulators, a tendency to increase bioadaptation characteristics has been experimentally proved: the activity of antioxidant enzymes, the amount of stress amino acids under conditions of polymetallic stress.

A rational technological scheme of phytorehabilitation of soils contaminated with heavy metals to produce biofuel is proposed.

The results of the dissertation research were adopted by the enterprises in the field of road freight transport services Entrepreneur V.V. Voronoi, Entrepreneur Baziyan L.M., Entrepreneur Zainutdinova E.Y. as components of measures that are aimed at improving the environmental safety of urban territories.

The main scientific developments of the author are used in the educational process of the State Educational Institution of Higher Professional Education "DonNU" in the vocational training of bachelors and masters in the training course of "Ecology and Nature Management".

**Keywords:** environmental safety, urban areas, heavy metals, phytorehabilitation, biofuels, sorption ability, plants-hyperaccumulators.