

БУТЫРИН МИХАИЛ ВИКТОРОВИЧ

**ОСОБЕННОСТИ ФИТОЭКСТРАКЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И
МЫШЬЯКА РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ РАСТЕНИЙ И ИХ
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ТЕХНОЛОГИЯХ РЕМЕДИАЦИИ
ЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ ПРЕДБАЙКАЛЬЯ**

03.02.08 – экология (биология)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Тюмень - 2017

Работа выполнена на кафедре агроэкологии, агрохимии, физиологии и защиты растений Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского».

Научный руководитель: доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры агроэкологии, агрохимии, физиологии и защиты растений ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского»
Хуснидинов Шарифзян Кадинович

Официальные оппоненты: **Плеханова Ирина Овакимовна**
доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник кафедры земельных ресурсов и оценки почв факультета почвоведения ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Захарова Елена Викторовна
кандидат биологических наук, доцент кафедры техносферной безопасности ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Защита состоится «28» февраля 2018 г. в 13.30. на заседании диссертационного совета Д 999.114.02 при ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Республики, 7
Телефон/факс: 8(3452) 29-01-52, e-mail: dissгаusz@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного аграрного университета Северного Зауралья и на сайте университета <http://www.tsaa.ru>.

Автореферат разослан «15» декабря 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор с.-х. наук

Турсумбекова Галина Шалкаровна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследований. Большинство городов Иркутской области (Ангарск, Братск, Зима, Иркутск, Усолье – Сибирское, Шелехов, Черемхово, Свирск) внесены в список городов России с наибольшим уровнем загрязнения атмосферного воздуха различными токсическими веществами, что составляет 16 % от общего количества городов РФ.

По оценкам специалистов значительная часть пахотных земель Иркутской области (свыше 200 тыс. га), примыкающих к этим городам, подвержена техногенному загрязнению. Производимая в этих условиях растениеводческая продукция часто не соответствует санитарно-гигиеническим нормам содержания вредных для здоровья человека и животных токсических веществ (Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Иркутской области в 2015 году, 2015).

Для детоксикации тяжелых металлов (ТМ) и ремедиации плодородия загрязненных почв в настоящее время разработаны и рекомендуются разнообразные технологические приемы, среди которых наиболее доступным агроэкологически и экономически эффективным признана фитоэкстракция ТМ и мышьяка из загрязненной почвы, основанная на возделывании специальных растений-аккумуляторов.

Однако указанные эколого-биологические свойства растений и использование их потенциала в технологиях фиторемедиации и получения экологически безопасной продукции в зональных условиях остаются слабо изученными.

Степень разработанности темы исследований. Фиторемедиация – один из способов эффективной очистки загрязненных тяжелыми металлами почв с помощью растений и ассоциируемых с ними микроорганизмов. Значимость ее в научном плане связана с поиском и изучением растений, обладающих высоким коэффициентом накопления (КН), скоростью отчуждения (СО) и коэффициентом фитоэкстракции (КФЭ) ТМ; в производственном – в разработке технологии, связанной с отчуждением из почвенного покрова определенного вида поллютанта, ее экономической и энергетической обоснованностью. Предложенная нами технология фиторемедиации с использованием растений-аккумуляторов, обладающих высоким коэффициентом фитоэкстракции – горца растопыренного, свербиги восточной в регионе не изучалась.

Цель работы - изучение особенностей фитоэкстракции ТМ и мышьяка различными видами растений для использования их в технологиях фиторемедиации загрязненных почв и получения экологически безопасной растениеводческой продукции (ЭБРП) в зональных условиях.

Задачи исследований:

1. Оценить степень загрязнения почвенного и растительного покрова ТМ и мышьяком на территории муниципального образования (МО) г. Свирск и учхоза «Молодежное» Иркутского ГАУ.

2. Изучить особенности фитоэкстракции кадмия (Cd), свинца (Pb) и мышьяка (As) различными видами сельскохозяйственных растений: овощными, зелеными, кормовыми культурами и картофелем, а также новыми, интродуцируемыми в Иркутской области культурами: свербигой восточной и горцем растопыренным.

3. По интенсивности поглощения ТМ и мышьяка классифицировать изучаемые растения на индикаторы, исключители и аккумуляторы.

4. Разработать технологию фиторемедиации техногенно загрязненных почв с использованием потенциала горца растопыренного, свербиги восточной, эспарцета песчаного, люцерны посевной.

5. Дать экономико-энергетическую оценку различным видам ремедиации почв: землеванию и фиторемедиации.

Научная новизна исследований. Впервые в условиях региона проведено изучение степени загрязнения почвенного покрова и возделываемых сельскохозяйственных культур ТМ и мышьяком. По степени поглощения их из почвы выявлены растения индикаторы, исключители, аккумуляторы. Для проведения фиторемедиации предложены растения-гипераккумуляторы – горец растопыренный и свербига восточная, разработана технология фитоочистки загрязненных ТМ почв. Дана сравнительная агроэкологическая и экономическая оценка эффективности фиторемедиации и землевания техногенно загрязненных почв.

Теоретическая и практическая значимость. Разработана и предложена технология фиторемедиации – приема использования высокого эколого-биологического потенциала растений-аккумуляторов и гипераккумуляторов для фитоэкстракции из загрязненной почвы ТМ (Cd, Pb) и As: свербиги восточной, горца растопыренного, люцерны посевной, эспарцета песчаного, растений-индикаторов для проведения биомониторинга и растений-отражателей, обладающих толерантными свойствами и используемых для получения экологически безопасной продукции растениеводства в условиях техногенного загрязнения региона.

Положения, выносимые на защиту:

1. Почва исследуемых территорий и выращиваемая на ней растениеводческая продукция характеризуются высокой степенью загрязнения кадмием, свинцом и мышьяком.

2. Виды сельскохозяйственных растений отличаются разной реакцией и интенсивностью поглощения кадмия, свинца и мышьяка.

3. Растениями-аккумуляторами для проведения фиторемедиации техногенно загрязненных почв являются горец растопыренный, свербига восточная, эспарцет песчаный, люцерна посевная.

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в разработке программы и методики исследований, проведении полевых и лабораторных исследований, обработке полученных результатов, подготовке научных публикаций и диссертационной работы.

Степень достоверности и апробация результатов исследований

Результаты исследований подвергались статистической обработке, которая свидетельствует об их достоверности. Аналитические исследования проводились в лицензируемой лаборатории ФГБУ «ЦАС «Иркутский».

Основные результаты исследований были доложены на: Всероссийском научно-практическом семинаре «Ресурсосберегающие технологии производства экологически безопасной сельскохозяйственной продукции» (Иркутск, 2011); научно-практическом семинаре, посвященном «Дню аспиранта ИрГСХА» (Иркутск, 2012), международной научно-практической конференции молодых ученых (Иркутск, 2012), научно-практическом семинаре, посвященном «Дню аспиранта ИрГСХА» (Иркутск, 2013), международной научно-практической конференции молодых ученых «Научные исследования и разработки к внедрению в АПК» (Иркутск, 2013), международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию аспирантуры ИрГСХА «Экологическая безопасность и перспективы развития аграрного производства Евразии» (Иркутск, 2013), региональной научно-практической конференции с международным участием, посвященной 80-летию ФГБОУ ВПО ИрГСХА «Современные проблемы и перспективы развития АПК» (Иркутск, 2014), Международной научно-практической конференции молодых ученых, посвященной 70-летию Победы в ВОВ и 100-летию со дня рождения А.А. Ежевского (Иркутск, 2015).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 7 работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка используемой литературы, включающего 129 источников. Диссертация изложена на 127 страницах машинописного текста, включает 41 таблицу, 21 рисунок и 18 приложений

Глава 1 Обзор литературы. Особенности загрязнения природной среды региона тяжелыми металлами и мышьяком, методы их детоксикации и фиторемедиации почв

Раскрыты антропогенные источники поступления и токсичность кадмия, свинца, мышьяка. Показаны особенности загрязнения природной среды Иркутской области. Подчеркнуто техногенное загрязнение почв ТМ, расположенных вокруг промышленных центров (свыше 200 тыс. га), состояние санитарно-эпидемиологической обстановки, состояние здоровья населения региона (территория риска по 7 из 10 мониторинговым заболеваниям). Приводятся данные по нормированию содержания ТМ и мышьяка в почвах, растениях, кормах, продуктах питания. Представлена группировка почв для эколого-токсикологической оценки по содержанию ТМ и мышьяка, классификация их по классам опасности.

Раскрыты разнообразные профилактические, химические, агротехнические, физические и биологические приемы снижения загрязнения окружающей природной среды ТМ и мышьяком: интенсивное известкование,

применение фосфорных, органических, органо-минеральных удобрений, фитомелиорация, интенсивная обработка почвы, землевание, ландшафтинг.

Указано деление растений на 3 группы: растения-индикаторы, которые можно использовать при проведении биомониторинга загрязнения почвенного покрова; исключители, которые можно возделывать при обычных технологиях на техногенно загрязненных почвах и аккумуляторы - для фиторемедиации почв. Растения с повышенной скоростью поглощения ТМ из окружающей среды (ОС) отнесены к группе гипераккумуляторов.

Глава 2 Почвенно-климатические характеристики Иркутской области

2.1 Климатические условия

Климат Иркутской области резко континентальный с суровой, продолжительной, малоснежной зимой и теплым с обильными осадками летом. Продолжительность безморозного периода колеблется от 62 дней – в долинах, до 111 дней – на возвышенных элементах рельефа. Сумма температур выше 10°C от 1200 до 1700°C. На большей части равнинной территории выпадает от 350 до 500 мм осадков. Климатические условия в годы проведения исследований были близки со средними многолетними характеристиками.

2.2 Почвенный покров

В сельскохозяйственных районах преобладают следующие типы почв: серые лесные – 47,7 %, дерново-карбонатные – 35,5%, черноземы – 7,4 %, лугово-черноземные – 3,2 %, пойменные – 2,4 %, дерново-подзолистые – 1,9 %, луговые – 1,6 %, прочие – 0,3 %.

Глава 3 Объекты и методика проведения исследований

Объектами исследований являлись культуры, широко возделываемые в регионе, как в крупных сельскохозяйственных предприятиях, так и на приусадебных и садово-огородных участках:

1. Овощные культуры: капуста (*Brassica oleracea*), столовая свекла (*Beta vulgaris*), морковь (*Daucus carota*), томаты (*Solanum lycopersicum*), огурцы (*Cucumis sativus*), кабачки (*Cucurbita pepo*);

2. Зеленные овощные культуры: лук (*Allium cepa*), чеснок (*Allium sativum*), салат (*Lactuca*), укроп (*Anethum graveolens*), петрушка (*Petroselinum*);

3. Картофель (*Solanum tuberosum*);

4. Плодовые культуры: смородина черная (*Ribes nigrum*), вишня домашняя (*Prunus domestica*);

5. Кормовые культуры: кострец безостый (*Bromopsis inermis*), пырей безкорневищный (*Elymus trachycaulon*), люцерна посевная (*Medicago sativa*), эспарцет песчаный (*Onobrychis orenaria*), овес на зеленый корм (*Avena sativa*);

6. Новые, интродуцируемые в регионе растения: свербига восточная (*Bunias orientalis*), горец забайкальский (*Polygonum divaricatum*).

Полевые исследования проводились в период с 2009 по 2014 годы на территории садово-огородного кооператива (СОК) «Астра», расположенного в черте г. Свирска Черемховского района и опытном поле учхоза «Молодежное» Иркутского аграрного университета им. А.А. Ежевского (ИрГАУ), расположенного в 12 км от центра г. Иркутска.

Площадь опытных посевов 2 м² (2 x 1 м), повторность шестикратная.

Почва опытного участка СОК г. Свирска черноземная, учхоза «Молодежное» ИрГАУ – серая лесная. Агрохимическая характеристика почв участков исследования представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Агрохимические показатели опытных участков, 2009 г.

Место проведения опытов	Тип почвы	Глубина взятия образца, см	Содержание			pH _{сол}
			гумуса, %	P ₂ O ₅ , мг/кг	K ₂ O, мг/кг	
г. Свирск, СОК «Астра»	чернозем	0-20	7,6	129(М)*	535(М)	7,0
		20-40	7,3	113(М)	440(М)	7,0
г. Иркутск, учхоз ИрГАУ	серая лесная	0-20	2,0	260(К)**	50(К)	5,7
		20-40	1,8	240(К)	38(К)	5,6

*М – метод определения подвижных форм фосфора и калия по Мачигину

**К – метод определения подвижных форм фосфора и калия по Кирсанову

Почвы, расположенные в черте г. Свирска подвержены сильному техногенному загрязнению. Земли учхоза «Молодежное» также испытывают загрязнение, но в значительно меньших размерах.

Валовое содержание ТМ и мышьяка в почвах опытных участков представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Валовое содержание ТМ и мышьяка в почве опытных участков, 2009 г.

Место проведения опытов	Тип почвы	Глубина взятия образца, см	Тяжелые металлы, мг/кг		Мышьяк, мг/кг
			Свинец	Кадмий	
г. Свирск	чернозем	0-20	169,7	0,55	432,0
		20-40	20,6	0,37	172,0
г. Иркутск	серая лесная	0-20	11,2	0,31	4,1
		20-40	11,7	0,32	4,9

Отбор почвенных образцов проводился в конце вегетационного периода возделываемых растений (август, начало сентября) в слое почвы 0-20 и 20-40 см. Отбор проводился согласно ГОСТ 17.4.4.02-84 методом почвенного конверта. Пробы отбирались пластмассовым шпателем в четырех крайних точках и одной центральной. Средняя проба из каждого слоя была массой около 1 кг. В это же время отбирались растительные образцы в фазе полной спелости. С целинных и опытных участков отбор производился со всей площади исследуемого участка. На садово-огородном участке отбирались все виды возделываемых на нем растений. Масса растительного образца составляла 1 кг.

Воздушно-сухие почвенные образцы измельчались, просеивались через сито 1 мм, после чего в них определялись следующие показатели: рН солевой вытяжки – потенциометрическим методом – ГОСТ 26483-85; подвижные формы фосфора и калия по методу Кирсанова – ГОСТ 26207-91 и Мачигина – ГОСТ 20205-91; гумус по методу Тюринга – ГОСТ 26213-91; валовые формы ТМ атомно-абсорбционным методом – РД 52.18-289-90. В высушенных и размолотых растительных образцах определялось содержание свинца, кадмия – атомно-абсорбционным методом – ГОСТ 30178-96, мышьяка – ГОСТ 26930-86. Степень отчуждения и эффективность фиторемедиационного воздействия растений - аккумуляторов и гипераккумуляторов определялась ежегодно.

Аналитические исследования почвенных и растительных образцов проводились в ФГБУ «Центр агрохимической службы «Иркутский». Полученные результаты были статистически обработаны.

Экономическая и энергетическая эффективность фиторемедиации и землевания определялась на основании разработанных технологических карт и затрат по гранд – сметам.

Глава 4 Особенности фитоэкстракции тяжелых металлов и мышьяка различными видами сельскохозяйственных растений и её использование в технологиях ремедиации почв

4.1 Оценка опасности загрязнения почвенного покрова тяжелыми металлами и мышьяком

Для определения степени загрязнения почв ТМ и мышьяком были проведены лабораторные исследования по определению их содержания в исследуемых почвах (табл. 3).

Таблица 3 – Содержание тяжелых металлов и мышьяка в образцах почвы, взятых на черноземах (целинные, СОК «Астра») и серых лесных (учхоз «Молодежное» ИрГАУ) (2009 г.)

Место взятия образца	Тип почвы	Глубина взятия образца, см	Валовые формы, мг/кг						
			Pb	Cd	Ni	Zn	Cu	Mn	As
СОК «Астра», г. Свирск	чернозем	0-10	169,7	0,55	31,3	105,6	83,2	167,0	432
Учхоз «Молодежное», ИрГАУ	серая лесная	0-10	11,2	0,31	25,8	56,6	11,4	502,0	4,1
ПДК			30,0	2,0	80,0	220,0	132,0	1500	2,0

Расчеты показали, что величина показателя суммарного загрязнения (Zc) в условиях СОК «Астра» на черноземных почвах колебалась от 32 до 128 единиц. По общепринятой оценочной шкале опасности загрязнения почвы СОК «Астра» г. Свирска отнесены нами к категории высоко опасных. Серые лесные почвы учхоза «Молодежное» ИрГАУ по категории

загрязнения отнесены нами к умеренно опасным. Оценка опасности загрязнения (Z_c) составила 16-32 единицы.

Земли учхоза «Молодежное» отнесены к категории среднезагрязненных (опасность загрязнения 16–32 единицы), что может привести к увеличению общего уровня заболеваемости населения.

При очень высокой степени загрязнения почв СОК «Астра» рекомендуется изъятие земель из сельскохозяйственного оборота и их консервация.

4.2 Реакция растений на загрязнение почв тяжелыми металлами и мышьяком

По отношению к ксенобиотикам предполагалось выделить растения - индикаторы, то есть те растения, которые указывают на присутствие в почве ТМ; толеранты, то есть те растения, которые в условиях техногенного загрязнения избегают усвоения из почв нежелательных для растений и растительной продукции элементов; аккумуляторы, которые более интенсивно, чем другие, рядом произрастающие растения, потребляют из загрязненной почвы вредные, нежелательные, ядовитые для человека и сельскохозяйственных животных вещества.

4.3 Особенности накопления тяжелых металлов и мышьяка различными видами сельскохозяйственных растений

Кадмий. Источником загрязнения окружающей среды кадмием в зонах проведения исследований являются действующие ТЭЦ. Содержание в почвенном покрове кадмия составляет 0,05-0,08 мг/кг. Поэтому все возделываемые продовольственные овощные и плодовые, а также кормовые культуры в районах проведения опытов накапливали в зеленой массе и плодах большое количество кадмия (рис. 1).

Из овощных культур наибольшее количество кадмия накапливалось в корнеплодах столовой свеклы (4,6 ПДК), моркови (4,0 ПДК), огурцах (3,0 ПДК), томатах (7,3 ПДК). Высокое содержание кадмия отмечено в зеленой массе зеленных овощных культур: салата и укропа (4,6-5,3 ПДК). Загрязненными кадмием были плодовые культуры: смородина – 3ПДК и вишня – 2ПДК и все кормовые культуры – 4,3-6,0 ПДК.

К растениям-индикаторам следует отнести томаты, укроп и салат, так как они наиболее интенсивно накапливали кадмий: коэффициент биологического накопления оказался выше всех других опытных растений – 2,8. Умеренное количество кадмия накапливалось в клубнях картофеля (белоклубневые сорта) и чесноке. По отношению к кадмию, их можно отнести к толерантным растениям. К растениям-исключителям нами отнесены картофель, капуста и вишня.

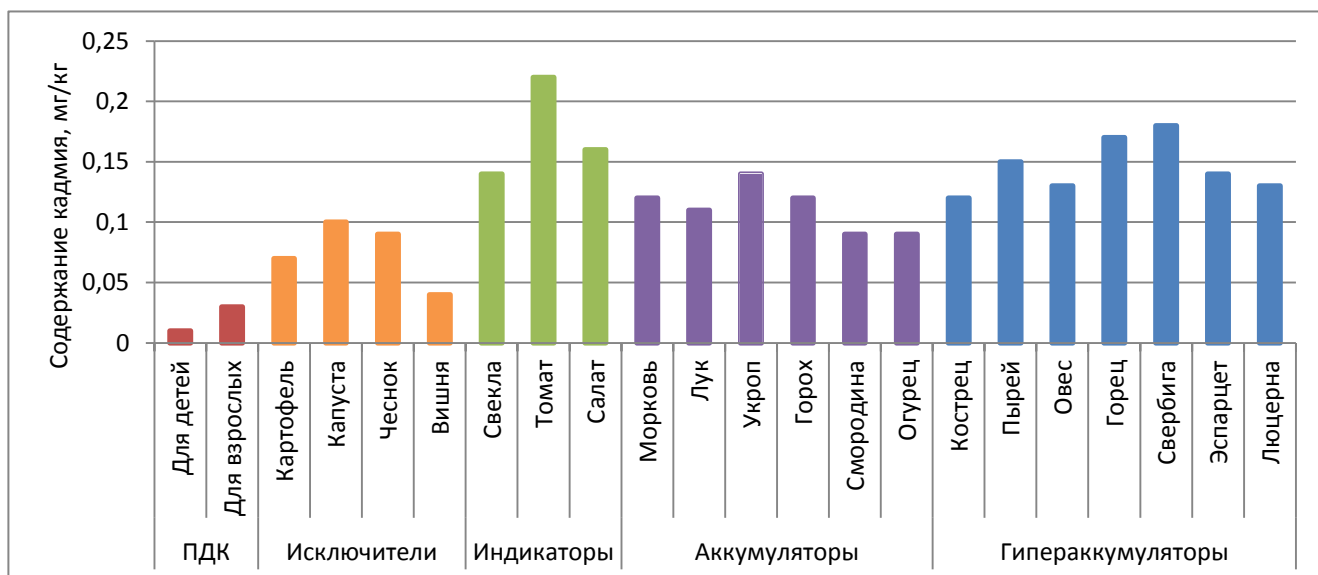


Рисунок 1 – Сравнительная оценка интенсивности фитоэкстракции кадмия разными видами сельскохозяйственных растений в условиях СОК «Астра» г. Свирск (среднее за 2009-2014 гг.)

Наиболее полно требованиям, которые предъявляются к растениям-аккумуляторам, отвечали кормовые растения, и в первую очередь, кострец безостый и пырей – многолетние высокоурожайные растения семейства злаковых (мятликовых); гипераккумуляторам – горец, свербига, аккумуляторам - эспарцет, люцерна.

Свинец. Загрязнение окружающей природной среды г. Свирска свинцом происходит вследствие работы завода по производству аккумуляторных батарей, а г. Иркутска – в результате ранее накопленных автотранспортных выбросов.

Возделываемые растения накапливали свинец в вегетативной массе и плодах, часто выше предельных нормативов (рис.2). Результаты исследований показали, что наибольшее количество свинца накапливалось в корнеплодах столовой свеклы, горохе, луке, укропе, салате и огурцах.

Наибольшее содержание свинца отмечалось в корнеплодах столовой свеклы, возделываемой в СОК «Астра», расположенном в черте г. Свирска. Высокое содержание свинца было и в корнеплодах столовой свеклы, которая возделывалась в учхозе «Молодежное» ИрГАУ – 1,8 ПДК. Высокий коэффициент фитоэкстракции свинца – 3,3 в условиях СОК «Астра» и 0,96 – в условиях учхоза «Молодежное» позволяет отнести эту культуру к группе аккумуляторов свинца, с одной стороны, а с другой – ее высокая чувствительность к загрязнению свинцом – к группе индикаторов.

Загрязнение огурцов свинцом было на уровне 2,14 ПДК, картофеля – 2,0 ПДК, моркови – 1,9 ПДК, томатов – 1,48 ПДК.

Следует отметить толерантность картофеля (белоклубневые сорта) и особенно белокочанной капусты.

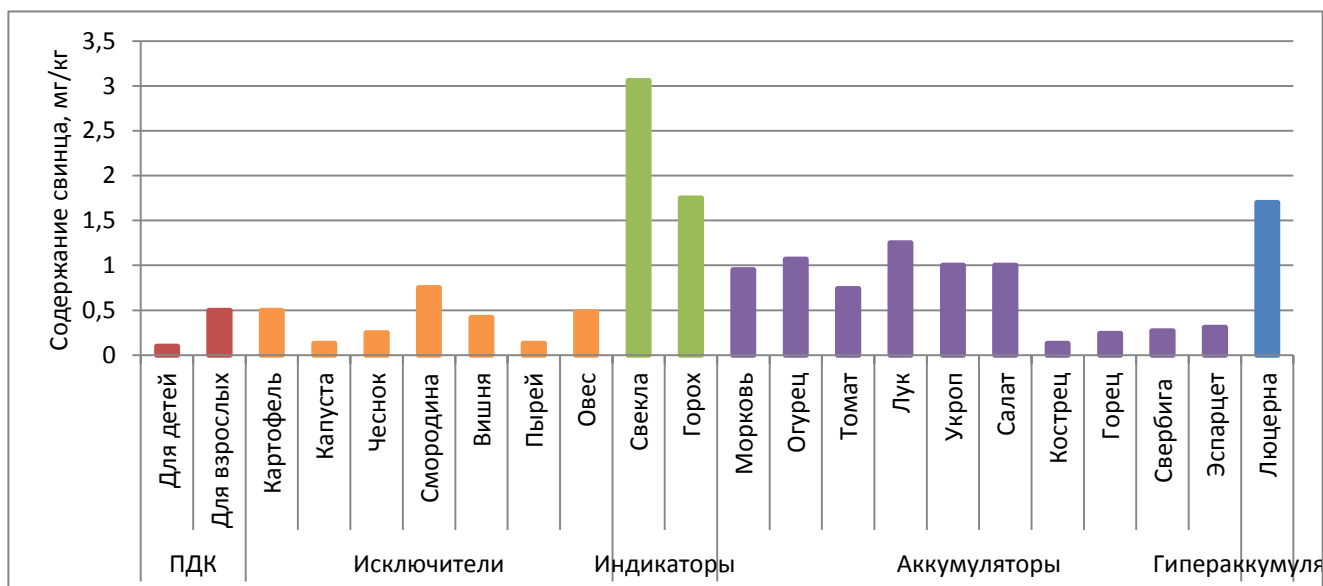


Рисунок 2 – Оценка интенсивности фитоэкстракции свинца различными сельскохозяйственными культурами в условиях СОК «Астра» г. Свирск (среднее за 2009-2014 гг.)

Проведенные исследования показали, что среди зеленых овощных культур высокий коэффициент биологического поглощения свинца (>1) отмечался у гороха, лука, салата, укропа, причем этот показатель для указанных культур был характерным в обеих зонах проведения исследований.

Аномальное накопление свинца отмечалось также в плодовых культурах: смородине и вишне.

Содержание свинца в кормовых травах было значительно выше, чем в овощных культурах, поэтому они были отнесены нами к растениям-аккумуляторам. Люцерна посевная отнесена к растениям-гипераккумуляторам, так как КБН, отражающий отношение содержания свинца в растениях к содержанию его в почве, был больше единицы и равнялся – 1,8. Содержание подвижных форм свинца в почве опытного участка СОК «Астра» было 0,94 мг/кг, а количество свинца, накапливаемого в зеленой массе люцерны посевной – 1,70 мг/кг.

Все возделываемые на опытных участках сельскохозяйственные культуры оказались непригодными не только для детского питания, но и для потребления взрослым населением, за исключением картофеля и капусты. В кормлении сельскохозяйственных животных можно использовать кормовые растения, произрастающие только в учхозе «Молодежное».

Мышьяк. В период с 1934 по 1949 г.г. в центре города Свирска функционировал Ангарский металлургический завод (АМЗ) по производству боевых отравляющих веществ (БОВ): люизита и адамсита на основе мышьяка. В 1949 г. завод был закрыт, а отходы производства (огарки), заброшенные и разрушенные цеха простояли до 2013 г. (62 года), загрязняя окружающую среду.

Почвенный покров МО г. Свирск подвергся очень большому загрязнению мышьяком. Степень потенциального загрязнения почв МО г. Свирск мышьяком составляет: для целинных (неиспользуемых) почв – до 216 ПДК, для интенсивно используемых – до 80 ПДК. По этой причине все возделываемые сельскохозяйственные культуры накапливали мышьяк выше ПДК (рис.3).

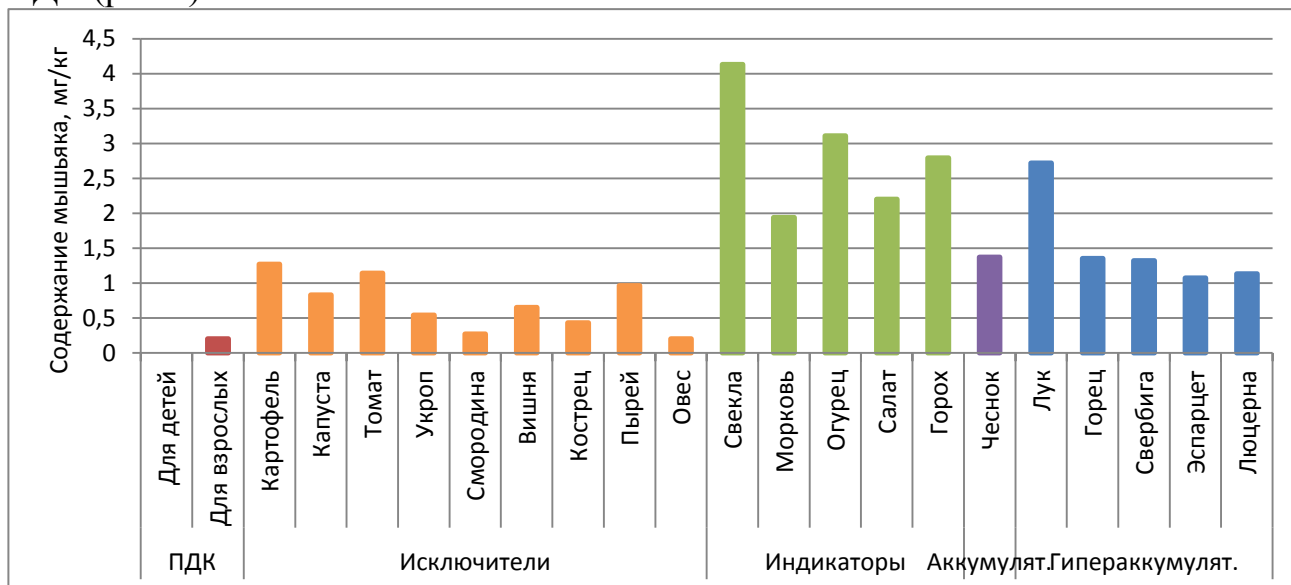


Рисунок 3 – Оценка интенсивности фитоэкстракции мышьяка различными сельскохозяйственными растениями в условиях СОК «Астра» г. Свирск (среднее за 2009-2014 гг.)

Нами установлено, что овощи и картофель непригодны для питания не только детям, но и взрослым. Особенно высокое содержание мышьяка было в столовой свекле, огурцах и картофеле (белоклубневые сорта). Из овощных культур, выращенных в учхозе «Молодежное», непригодными для пищевых целей оказались огурцы, томаты и морковь. Среди зеленых овощных растений, выращиваемых в СОК «Астра» наибольшим потреблением и накоплением мышьяка отличались горох, салат, лук, а в учхозе «Молодежное» - укроп и салат.

В зеленой массе кормовых культур, возделываемых в СОК «Астра», содержание мышьяка было выше ПДК. Высокая аккумуляция мышьяка свойственна люцерне – коэффициент биологического поглощения (КБП) был равен 1,2. Содержание мышьяка в зеленой массе кормовых растений, возделываемых в учхозе «Молодежное» было меньше предельно допустимых ПДК концентраций.

Во всех сельскохозяйственных культурах, возделываемых в СОК «Астра», содержание мышьяка было выше ПДК – они непригодны в питании как детей, так и взрослых.

Оценка степени поглощения мышьяка различными сельскохозяйственными растениями, возделываемыми в учхозе «Молодежное» Иркутского ГАУ показала, что в условиях двукратного превышения предельной концентрации соединений мышьяка в почве

опытного участка его накопление в продукции было меньше ПДК: в картофеле, капусте, свекле, луке, чесноке, горохе, смородине, зеленой массе люцерны, костреца, пырея, овса, гороха, сверби́ги. Однако, согласно требованиям ГОСТа, в продукции, производимой для детского питания, присутствие мышьяка не допускается. По этой причине продукция, производимая в учхозе «Молодежное», непригодна для детского питания.

4.4 Особенности использования фитоэкстракции тяжелых металлов и мышьяка разными видами растений в технологиях ремедиации почв

В результате многолетних исследований по фитоэкстракции ТМ и мышьяка выявлено, что новые растения, интродуцируемые в Иркутской области – горец растопыренный и свербига восточная, малораспространенное растение – эспарцет песчаный и традиционно возделываемое – люцерна посевная обладают высокими кумулятивными свойствами, по сравнению с кострцом безостым, используемым нами в качестве контрольного растения (табл. 4).

Таблица 4 – Оценка содержания поллютантов в вегетативной массе растений-аккумуляторов и растений-гипераккумуляторов, мг/кг (среднее за 2013-2014 гг.)

Вид растения	Место проведения опытов					
	СОК «Астра»			учхоз «Молодежное»		
	Cd	Pb	As	Cd	Pb	As
Горец растопыренный	0,17	0,24	1,35	0,12	0,22	0,14
Свербига восточная	0,18	0,27	1,32	0,16	0,19	0,15
Эспарцет песчаный	0,14	0,31	1,07	0,11	0,21	0,27
Люцерна посевная	0,13	1,70	1,13	0,09	0,13	0,17
Кострец безостый	0,12	0,13	0,43	0,10	0,13	0,04
ПДК	0,03	0,5	0,2	0,03	0,5	0,2
ПДК для детского питания	0,01	0,1	не допускается	0,01	0,1	не допускается
НСР 0,5	0,01	0,02	0,10	0,01	0,02	0,01

Степень накопления кадмия на черноземных почвах г. Свирска изучаемыми растениями-аккумуляторами была выше, чем у контрольного растения на 28-76 %; свинца – на 23-130%; мышьяка – на 28-62 %. Аналогичные свойства этих растений были выявлены и на серых лесных почвах в пригороде г. Иркутска.

Кроме основополагающих требований, таких как высокое КН, СО и КФЭ, растения, отобранные как эффективные в технологиях фитоэкстракции обладали комплексом ценных эколого-биологических особенностей: высоким фотосинтетическим потенциалом, биологической продуктивностью, мощной, хорошо развитой корневой системой, проникающей в глубокие подпахотные горизонты, кроме того они засухо- и морозостойкие.

Весьма ценной хозяйственно-биологической особенностью опытных растений является их долголетие. Особенно ценна эта особенность в технологиях фиторемедиации. Высоким устойчивым долголетием

отличаются, интродуцируемые в Иркутской области, горец растопыренный – растение семейства гречишных и свербига восточная – растение семейства капустных. Их долголетие достигает свыше 10 лет. Бобовые растения обеспечивали получение устойчивой продуктивности в течение 5 лет – люцерна посевная и 3 года – эспарцет песчаный (Хуснидинов, 2014).

За годы возделывания опытные растения формируют очень большое количество надземной вегетативной массы: от 11,1 до 53 т/га в условиях г. Свирска и до 20,7-105,0 т/га – в г. Иркутске.

Наблюдения показали, что опытные растения уже в первый и второй год жизни, благодаря присущей им жизненной «стратегии» проделали большую «работу» по детоксикации ТМ и мышьяка. Проведенные исследования показали, что все опытные растения в условиях техногенного загрязнения (особенно мышьякового) значительно снижали свою продуктивность (до 50 %). Продуктивность растений-фиторемедиантов снижалась до 30 %.

Величина количественного отчуждения поллютантов из почвы растениями-фиторемедиантами в течение одного года вегетации представлена в таблице 5.

Таблица 5 – Величина количественного отчуждения поллютантов из почвы растениями-фиторемедиантами, в течение одного года вегетации, г/га (среднее за 2009-2014 гг.)

Вид опытных растений	Место проведения опытов					
	СОК «Астра»			учхоз «Молодежное»		
	Cd	Pb	As	Cd	Pb	As
Горец растопыренный	0,90	1,27	7,15	1,26	2,31	1,47
Свербига восточная	0,81	1,21	5,94	1,20	1,42	1,12
Эспарцет песчаный	0,52	1,14	3,95	0,76	1,45	1,86
Люцерна посевная	0,41	5,4	3,61	0,51	0,74	0,97

За счет фитоэкстракции содержание кадмия в почве уменьшилось на 0,90 г/га, свинца – на 1,27 г/га, мышьяка – на 7,15 г/га – в условиях г. Свирска и уменьшение содержания ТМ и мышьяка в условиях г. Иркутска составило: Cd – 2,31г/га; Pb – 2,31 г/га; As – 1,47 г/га.

Скорость отчуждения ТМ и мышьяка при фиторемедиации техногенно загрязненных почв зависело как от пациентности, кумулятивных свойств рекомендуемых растений, интенсивности бионакопления (ИБН), так и от их «работы», связанной с продолжительностью воздействия их на почвенный покров.

Фиторемедиация техногенно загрязненных почв – технологический прием, отличающийся дешевизной применения. При фиторемедиации используется энергия солнца и по сравнению, например, с землеванием или удалением загрязненной почвы, разрабатываемая технология имеет значительно более высокую агроэкологическую, хозяйственную, экономическую и энергетическую эффективность. Экологическая эффективность, выраженная в скорости фитоэкстракции и сокращении

сроков фитоочистки достигается при повторном посеве фитомелиоративных растений. На протяжении периода «работы» растений ежегодно в конце вегетационного периода зеленая масса скашивается и отвозится на место захоронения. Эффективность фиторемедиации и скорость отчуждения ТМ и мышьяка будет повышаться при повторном посеве предлагаемых для этих целей растений и их чередовании по схеме: люцерна – горец и эспарцет – свербига.

Глава 5 ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕМЕДИАЦИИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ

При сравнении затрат на проведение фиторемедиации и землевания на земельном участке в черте г. Свирска площадью 1 га, используемого для создания лесопарковой зоны г. Свирска, установлено, что затраты на проведение фиторемедиации составляли 859000 руб., землевания – 5597782 руб., кадастровая стоимость земельного участка площадью 1 га составила 1800859 руб.

Расчетные финансовые вложения и прогностическая (в течение 100 лет) эффективность приемов ремедиации техногенно загрязненных почв представлены в таблице 6.

*Таблица 6 – Расчет финансовых затрат и ожидаемая эффективность ремедиации
загрязненных почв, тыс. руб. (на 01.01.2015 г.)*

Показатели	Приемы ремедиации		Увеличение (+) Уменьшение (-)
	фиторемедиация	землевание	
Затраты на 1 га, тыс. руб.	858	5597	+ 4739
Доход от реализации земельного участка и произведенной продукции, тыс. руб.	2375	35550	+ 33175
Условно чистый доход, тыс. руб.	1517	29953	+ 28436

Следует подчеркнуть, что технология фиторемедиации по сравнению с землеванием менее затратная, но ее экономическая эффективность, выраженная в условно чистом доходе, оказалась значительно ниже. К тому же процесс фитоочистки очень продолжительный. Затраты на проведение землевания по сравнению с фиторемедиацией возрастает в 6,5 раз, однако условно чистый доход оказался в 19,7 раза выше.

Важнейшим методом оценки эффективности ремедиации почв является биоэнергетическая оценка, которая отражает кроме экономической эффективности и экологический эффект ее применения.

Энергетическая эффективность ремедиационных технологий рассчитывалась как отношение суммы энергии, накопленной возделываемыми растениями к сумме совокупных затрат энергоресурсов при проведении цикла технологических операций. Расчеты представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Энергетическая эффективность приемов ремедиации загрязненных почв

Показатели	Приемы ремедиации	
	фиторемедиация	землевание
Выход энергии, ГДж/га	11617,12	6237,0
Затраты совокупной энергии, ГДж/га	3160,96	14952,0
Энергетическая эффективность	3,67	0,42

Таким образом, расчеты энергозатрат при применении технологий ремедиации техногенно загрязненных почв показали, что фиторемедиация по сравнению с землеванием в условиях региона имеет более высокую энергетическую эффективность. Землевание, как указывалось, имеет высокую социальную значимость, но низкую энергетическую эффективность. Тем не менее, землевание, как прием ремедиации почв, несмотря на высокие материально-финансовые и энергетические затраты, экологически обоснован и оправдан, так как направлен на улучшение и сохранение ОПС.

ВЫВОДЫ:

1. Почвы садово-огородного кооператива «Астра», находящегося в черте г. Свирска характеризуются повышенным содержанием свинца – 5,6 ПДК, мышьяка – 216 ПДК, кадмия – 0,28 ПДК; серые лесные почвы учхоза «Молодежное» Иркутского ГАУ, расположенного в 12 км от г. Иркутска – свинца – 0,37 ПДК, кадмия – 0,31 ПДК, мышьяка – 2,09 ПДК.
2. Коэффициент опасности загрязнения почвенного покрова в условиях СОК «Астра» колебался от 32 до 128 единиц – эти почвы отнесены к категории высоко опасных; учхоза «Молодежное» – 16-32 единицы – умерено опасные.
3. По интенсивности фитоэкстракции ТМ все возделываемые сельскохозяйственные растения были разделены на три группы. В основу классификации были положены рассчитанные нами коэффициенты фитоэкстракции: индикаторы – растения указывающие на присутствие в почве ТМ; толеранты – растения, избегающие усвоение нежелательных для них элементов; аккумуляторы – растения, которые более интенсивно, чем другие, рядом произрастающие растения потребляют и накапливают в органах и тканях ТМ.
4. Из овощных культур наибольшее количество кадмия в условиях г. Свирска накапливалось в корнеплодах столовой свеклы (4,6 ПДК), моркови (4 ПДК), огурцах (3 ПДК), томатах (7,3 ПДК), зеленных овощных (салате и укропе) – 4,6-5,3 ПДК.
5. К растениям-индикаторам были отнесены томаты, так как коэффициент фитоэкстракции у них выше, чем у всех других опытных растений – 2,8. Умеренное количество кадмия накапливалось в толерантных растениях: клубнях картофеля и чесноке. Наиболее полно требованиям, которые предъявляются растениям – аккумуляторам и гипераккумуляторам, отвечают кормовые растения.

6. Наибольшее накопление свинца (6,1 ПДК) отмечалось в корнеплодах столовой свеклы. Высокий коэффициент фитоэкстракции позволяет отнести эту культуру к группе индикаторов. Загрязнение огурцов было на уровне 2,14 ПДК, картофеля – 2 ПДК, моркови – 1,9 ПДК, томатов – 1,48 ПДК. К толерантным культурам отнесены картофель и белокочанная капуста. Высокий коэффициент фитоэкстракции ($> 1,6$) отмечался у гороха, лука, салата, укропа. Аномальное накопление свинца было в плодовых культурах. Кормовые культуры были отнесены к растениям – аккумуляторам, а люцерна – к гипераккумуляторам.
7. Картофель и овощи, возделываемые в СОК «Астра», накапливали мышьяк в количествах выше ПДК. Они оказались непригодны для питания не только детям, но и взрослым. Особенно высокое содержание мышьяка было в столовой свекле, огурцах. Из овощных культур, выращиваемых в учхозе «Молодежное», непригодными для пищевых целей оказались огурцы, томаты, морковь, укроп и салат. Высокая аккумуляция мышьяка свойственна люцерне – коэффициент фитоэкстракции был равен 1,2.
8. В результате многолетних исследований нами выявлены растения - аккумуляторы и гипераккумуляторы, которые обладают высоким коэффициентом накопления, скоростью отчуждения и коэффициентом фитоэкстракции ТМ и мышьяка из техногенно загрязненных почв: горец растопыренный, свербига восточная, эспарцет песчаный и люцерна посевная. Коэффициент фитоэкстракции кадмия (Cd) из почвы у этих растений был выше, чем у контрольного растения на 28-76 %, свинца (Pb) – 23-130 %, мышьяка (As) – 28-62 %.
9. За счет фитоэкстракции содержание кадмия в почве уменьшилось на 0,90 г/га в течение одного года, свинца – 1,27 г/га, мышьяка – 7,15 г/га (в условиях СОК «Астра» г. Свирска) и соответственно Cd – 1,26 г/га, Pb – 2,31 г/га и As – 1,47 г/га (в условиях учхоза «Молодежное» Иркутского ГАУ).
10. Проведенные прогностические расчеты показали, что полное очуждение изучаемых поллютантов из загрязненной почвы с помощью растений – аккумуляторов и гипераккумуляторов может быть достигнуто в зависимости от вида и степени загрязнения за 8-163 года.
11. Технология фитоэкстракции по сравнению с землеванием менее затратна. Затраты на проведение землевания по сравнению с фиторемедиацией возрастают в 6,5 раз, но экономическая эффективность, выраженная в условно чистом доходе, оказалась значительно ниже.
12. Фиторемедиация по сравнению с землеванием в условиях региона имеет более высокую энергетическую эффективность. Коэффициент энергетической эффективности составил – 3,67, землевания – 0,42 единицы.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВУ:

1. Рекомендовать использование разработанной нами технологии фиторемедиации и землевания для восстановления техногенно загрязненных почв региона.
2. Для проведения фиторемедиации использовать высокий эколого-биологический потенциал растений аккумуляторов: горца забайкальского и свербиги восточной.
3. При проведении экспресс-мониторинга загрязнения почвенного покрова, использовать растения-индикаторы, а для получения экологически безопасной продукции растениеводства – растения - отражатели.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Работы, опубликованные в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК

1. Сосницкая Т.Н. Транслокация тяжелых металлов в экосистемах МО г. Свирск / Т.Н. Сосницкая, Ш.К. Хуснидинов, **М.В. Бутырин**, Р.В. Замашиков // Вестник ИрГСХА. – 2014. – № 60. – С. 24-31.
2. Бутырин М.В. Оценка загрязнения почвенного покрова тяжелыми металлами и мышьяком МО г. Свирск Иркутской области / **М.В. Бутырин**, Т.Н. Сосницкая, Ш.К. Хуснидинов, Р.В. Замашиков // Вестник БГСХА. – 2014. – №1(34) – С. 45-50.
3. Бутырин М.В. Оценка опасности загрязнения окружающей природной среды тяжелыми металлами в условиях Иркутской области / **М.В. Бутырин**, Ш.К. Хуснидинов, Т.Н. Сосницкая, Р.В. Замашиков // Плодородие. – 2017. – № 6.

Работы, опубликованные в других изданиях

4. Хуснидинов Ш.К. Оценка содержания мышьяка в почвах садоводческих кооперативов г. Свирска / Ш.К. Хуснидинов, **М.В. Бутырин**, Т.Н. Сосницкая, З.В. Замашиков, Т.Г. Кудрявцева, Е.О. Красикова // Ресурсосберегающие технологии производства экологически безопасной сельскохозяйственной продукции: материалы научно-практического семинара посвященного 75-летию со дня рождения профессора Хуснидинова Ш.К. (27-28 октября 2012 г.). – Иркутск: ИрГСХА, 2011. – С. 35-38.
5. Хуснидинов Ш.К. Сравнительный анализ загрязнения целинных и органогенных почв г. Свирска Иркутской области тяжелыми металлами и мышьяком / Ш.К. Хуснидинов, **М.В. Бутырин**, Т.Н. Сосницкая // Материалы научно-практического семинара, посвященного «Дню аспиранта ИрГСХА» (26.02. 2013 г.). – Иркутск: ИрГСХА, 2013. – С. 125-128.
6. Хуснидинов Ш.К. Оценка загрязнения целинных и окультуренных почв г. Свирска Иркутской области тяжелыми металлами и мышьяком / Ш.К. Хуснидинов, **М.В. Бутырин**, Т.Н. Сосницкая, Р.В. Замашиков // Экологическая безопасность и перспективы развития аграрного производства Евразии: материалы международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию аспирантуры ИрГСХА (3-5 декабря 2013 г.). – Часть II. – Иркутск: ИрГСХА, 2013. – С. 102-106.
7. Сосницкая Т.Н. Фиторемедиационная способность многолетних трав на техногенно загрязненных почвах МО г. Свирск Иркутской области / Т.Н. Сосницкая, Ш.К. Хуснидинов, **М.В. Бутырин**, Р.В. Замашиков // Современные проблемы и перспективы развития АПК: материалы региональной научно-практической конференции, посвященной 80-летию ФГБОУ ВПО ИрГСХА (25-27 февраля 2014 г.). – Часть I. – Иркутск: ИрГСХА, 2014. – С. 168-173.