

На правах рукописи



Баенгуев Борис Александрович

**ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВЕННО-
РАСТИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНОГЕННОЙ ЗОНЫ МЫШЬЯКОВОГО
ЗАВОДА Г. СВИРСКА ПОСЛЕ ЕГО ЛИКВИДАЦИИ**

Специальность: 1.6.21 – Геоэкология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (ИГХ СО РАН), г. Иркутск

Научный руководитель: **Белоголова Галина Александровна,**
кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологической геохимии и эволюции геосистем Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск

Официальные оппоненты: **Минкина Татьяна Михайловна,**
доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой почвоведения и оценки земельных ресурсов Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону

Белозерцева Ирина Александровна,
кандидат географических наук, доцент, заведующий лабораторией геохимии ландшафтов и географии почв Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

Защита состоится 24 декабря 2024 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.053.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН

Адрес: 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а
e-mail: amosova@igc.irk.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, адрес сайта:
<http://www.igc.irk.ru/ru/zashchita>

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.х.н.



Амосова А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В минувшем столетии интенсивная эксплуатация земных недр привела к негативному воздействию на окружающую природную среду. Наряду с цветными и благородными металлами, наиболее опасными являлись соединения мышьяка, которые в виде примесных минералов, в основном, арсенопирита, выводились в отвалы горных выработок и металлургических предприятий. Это создавало большую экологическую проблему. Наибольшую опасность представляли старые отвалы, где со временем происходили процессы физико-химических преобразований сульфидов с образованием гипергенных минералов, растворимых форм мышьяка и сопутствующих тяжелых металлов (ТМ), которые интенсивно мигрировали в окружающую среду. При длительном открытом хранении содержимое отвалов подвергалось вымыванию атмосферными осадками и пылевому выветриванию. Такая опасная критическая ситуация возникла в зоне отвалов и строений бывшего Ангарского металлургического завода (АМЗ), расположенного в городе Свирск, (Южное Прибайкалье). Завод выпускал мышьяковую продукцию с 1934 по 1949 год. После закрытия АМЗ в 1949 г. здание завода, оборудование, а также отходы производства были брошены без дальнейшей их ликвидации. В 2013–2015 годах проведены мероприятия по ликвидации металлургического завода и его отходов, включая отвалы, с последующей рекультивацией нарушенных почв. В связи с этой ситуацией, приведенные в диссертации эколого-геохимические исследования территории бывшего АМЗ после его ликвидации, имеют особо важную актуальность.

При оценке степени загрязнения почв тяжелыми металлами необходимо учитывать закономерности трансформации соединений ТМ и их потенциальную подвижность, а также ряд факторов, влияющих на биодоступность и бионакопление. Процессы трансформации химических соединений в зонах техногенеза являются ключевыми, влияющими на их миграцию в почве. Детальное их изучение позволит объективно оценить эколого-геохимическое состояние системы «почва – растение» техногенно трансформированных территорий, что также имеет большое значение для разработки биотехнологий для рекультивации, ремедиации почв и фитостабилизации ТМ и мышьяка.

Достаточно перспективным направлением в биоремедиации почв является применение биопрепаратов, разработанных на основе живых почвенных бактерий. Ризосферные бактерии относятся к микроорганизмам, которые в большей степени толерантны к высоким содержаниям ТМ в почве. Они способны аккумулировать большие концентрации химических элементов (ХЭ) в корневой части ризосферы растений, а также трансформировать их соединения в почве. Механизм миграции и трансформации веществ и их соединений в системе «почва – микроорганизмы – растение» представляет собой комплекс биогеохимических процессов, которые на сегодняшний день мало изучены.

Целью данного исследования являлось изучение современного эколого-геохимического состояния почвенно-растительной системы на территории АМЗ после его ликвидации и особенности влияния ризосферных бактерий *Azotobacter* и *Bacillus* на биогеохимические процессы As и тяжелых металлов в системе «почва – растение».

Задачи исследования:

1. Изучить пространственное распределение основных халькофильных элементов в почве и сопряженных растениях и их формы нахождения в техногенно трансформированных почвах.

2. Изучить особенности накопления химических элементов в различных органах травянистого растения пырей ползучего (*Elytrigia repens*) и влияние формы соединений потенциально токсичных элементов в почве на интенсивность их накопления в растениях. Определить основные закономерности межэлементного взаимодействия потенциально токсичных и биогенных химических элементов в растениях.

3. Установить особенности миграции химических элементов в системе «почва – растение» под влиянием ризосферных бактерий *Azotobacter* и *Bacillus* на основе выделения постадийных и хелатных вытяжек из почв. Рассмотреть способность ризосферных бактерий влиять на иммобилизацию потенциально токсичных элементов (As, Pb, Cd, Zn, Cu) в техногенных почвах.

Защищаемые положения:

1. Основными потенциально опасными загрязнителями техногенных почв промплощадки АМЗ являются халькофильные элементы сульфидных руд As, Pb, Zn, Cd, Cu, Hg. Выделены три участка, отличающиеся по степени загрязнения почв элементами-токсикантами и различными по подвижности формами их соединений. Глинистые горизонты почв на глубине и изменение параметров рН создают для них геохимический барьер.

2. Установлена способность растений пырей *Elytrigia repens* аккумулировать As и тяжелые металлы в зависимости от степени накопления химических элементов в почве, форм их нахождения и органов растения. Выявлен антагонизм между элементами-токсикантами и биогенными макроэлементами при токсическом стрессе.

3. Ризобактерии *Azotobacter* и *Bacillus* способствовали аккумуляции тяжелых металлов и мышьяка в виде органических хелатных соединений и их иммобилизации в почве, что приводило к снижению накопления элементов-токсикантов в растениях.

Научная новизна. Впервые на территории г. Свирска получены результаты исследования потенциально токсичных ХЭ в техногенных почвах и растениях после ликвидации АМЗ и рекультивации нарушенных почв. Доказана способность пырей ползучего аккумулировать потенциально токсичные элементы в различных органах растения в условиях техногенного загрязнения.

Изучены закономерности взаимодействия между биотическими и потенциально токсичными элементами в различных органах пырей ползучего при токсическом

стрессе. Выявлен антагонизм между As, тяжелыми металлами и основными элементами питания (К и Р).

Получены новые данные, характеризующие биогеохимические процессы, связанные с влиянием комплексного биопрепарата на основе ризосферных бактерий *Azotobacter*, *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* и *Bacillus mucilaginosus* на мобилизацию и иммобилизацию ТМ и биофильных элементов в системе «почва-растение». Показана возможность использовать эти штаммы бактерий для ремедиации почв и для разработки новых биотехнологий, что имеет большое научное и практическое значение.

Фактический материал. Работа выполнена по результатам геохимических исследований территории бывшего АМЗ г. Свирска, проведенных сотрудниками лаборатории экологической геохимии и эволюции геосистем ИГХ СО РАН в 2019–2020 гг. и последующего химического анализа макро- и микроэлементного состава почв и растений в ЦКП Изотопно-геохимических исследований ИГХ СО РАН. Общий объем отобранного и проанализированного материала составил более 300 проб, включая пробы почв и растений, произрастающих на исследуемой территории, также были проанализированы формы соединений ХЭ и пробы при проведении экспериментов с ризосферными бактериями.

Личный вклад автора заключается в отборе проб почв и растений, подготовке проб для дальнейшего химического анализа и проведении постадийной экстракции из почв для определения в них форм соединений ТМ и As, в интерпретации и анализе теоретического и экспериментального материалов, подготовке демонстрационных материалов, а также апробации полученных результатов на научных конференциях и подготовке научных публикаций.

Практическая значимость.

Полученные на основе исследований данные по накоплению, распределению, мобильности и источникам поступления элементов в системе «почва – растение» послужат основой для планирования дальнейших рекультивационных и мониторинговых работ на данной территории. Сделан вывод, что по уровню загрязнения верхних горизонтов почв мышьяком, свинцом и другими потенциально токсичными элементами, большая часть изученной территории не пригодна для землепользования. Результаты изучения эколого-геохимического состояния территории АМЗ были представлены на заседании Научно-Консультационного Совета при Байкальской межрегиональной природоохранной прокуратуре и переданы в Росприроднадзор и в администрацию г. Свирска.

В процессе исследования выявлено, что пырей ползучий (*Elytrigia repens*), как один из толерантных видов растений к повышенным уровням загрязнения почв, может использоваться для их ремедиации, в частности, в фитостабилизации.

Выявленные закономерности антагонистических отношений потенциально токсичных элементов и основных эссенциальных макроэлементов могут служить

критерием степени фитотоксичности в зонах техногенного загрязнения As и тяжелыми металлами.

Полученные результаты исследований с использованием ризосферных бактерий могут быть полезны для разработки новых биотехнологий, применяемых для фиторемедиации, рекультивации почв и выращивании растений, а также для лучшего понимания механизма поведения потенциально токсичных элементов в системе почва-растение и их взаимодействия с биогенными макроэлементами.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, списка литературы из 281 наименования и 15 приложений. Материал работы изложен на 148 страницах, включая 35 таблиц и 41 рисунок.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность результатов исследования обеспечена значительным количеством проанализированных проб почв и растений, использованием современных аналитических методов, статистической обработкой большого массива полученных данных.

Публикации по теме исследования. По теме диссертации опубликована 21 работа. Из них из перечня ВАК, WoS, Scopus опубликовано 4 статьи и одна – в печати.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю, кандидату геолого-минералогических наук Г.А. Белоголовой за руководство и поддержку в процессе работы над диссертацией. Автор также выражает благодарность аналитикам института геохимии СО РАН к.х.н. Е. В. Чупариной, к.х.н. Т. С. Айсуевой, к.х.н. О. В. Зарубиной, к.х.н. Ю. В. Сокольниковой, И. В. Старченко, О. С. Рязанцевой, О. А. Пройдаковой, П. Т. Долгих, Г. И. Щербаковой за помощь в проведении исследований и качественные аналитические данные, к.б.н. М. В. Пастухову, П. Г. Долгих за помощь в отборе проб, к. г.-м. н. С. Н. Просекину за помощь в составлении картосхем.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Обзор темы исследования

В главе представлен литературный обзор, посвященный проблеме химического загрязнения почв тяжелыми металлами (ТМ), где рассмотрены основные источники поступления ТМ в почву.

Рассмотрены история изучения форм соединений ТМ и существующие методы постадийного фракционирования почв. Также показаны методы ремедиации загрязненных почв, предложены наиболее эффективные и доступные методы удаления ТМ из почв. Наибольшее внимание уделено видам биоремедиации.

Глава 2. Объект и методы исследования

Объектом исследования являлась территория бывшего Ангарского металлургического завода (АМЗ) по производству мышьяка в городе Свирске, расположенного вблизи реки Ангары в пределах Иркутско-Черемховской равнины (Южное Прибайкалье). Район приурочен к южной части Сибирской платформы, где

преимущественно развиты карбонатные породы нижнекембрийского возраста. Территория бывшего АМЗ располагалась на аллювиальных отложениях, перекрытых слоем суглинков и глин с включениями карбонатов. Мощность суглинистого слоя почв на глубине колеблется от 2 до 7,5 м. Глины имели слабую водопроницаемость и могли являться барьером для миграции химических элементов на глубину [Шенькман, 2017]. В районе исследований преимущественно распространены дерново-карбонатные почвы.

Завод функционировал с 1934 по 1949 год и занимался выпуском веществ, созданных на основе белого и серого мышьяка для оборонной промышленности. Для производства мышьяка использовали сульфидные руды с высокими его концентрациями, привезенными из Запокровского и Дарасунского золоторудных месторождений Забайкалья. После закрытия АМЗ в 1949 году здание завода, оборудование, а также отходы производства были оставлены без дальнейшей их ликвидации. Около 140 тыс. т. арсенопиритовых огарков в отвалах находились на территории бывшего АМЗ, в опасной близости от р. Ангара и городской территории более 60 лет, что представляло большую угрозу здоровью для местного населения [Шенькман, 2017]. Такая ситуация значительно обострила экологическую обстановку в этом районе. В результате ранее проведенных исследований было установлено загрязнение почв мышьяком выше предельно допустимой концентрации ПДК – 10 мг/кг [СанПиН, 2022] до 100 мг/кг в черте г. Свирска, а вблизи отвалов содержание мышьяка превышало ПДК в 400 раз [Гордеева и др., 2010]. Соответственно, высокие содержания мышьяка и некоторых тяжелых металлов прослеживались в пищевой цепи и биосубстратах человека [Качор, 2019].

В 2013 г. завершилась ликвидация этого объекта и проведена рекультивация «зараженного» техногенного грунта с внесением плодородной чистой почвы на территории бывших строений завода. Позже, по данным авторов [Богданов и др., 2014; Качор, 2019], сделан вывод о безопасном землепользовании этой территории, которая представляет собой выровненную площадку, используемую для выпаса скота.

Спустя 5 лет после ликвидации бывшего АМЗ и рекультивации почв в 2019–2020 годах нами были проведены детальные эколого-геохимические исследования на этой территории. Объектом данного исследования являлись техногенные почвы и грунты бывшей промышленной площадки АМЗ (14,5 га). Для оценки пространственного распределения мышьяка в поверхностном слое почвы и в нижележащих горизонтах на этой территории были опробованы 70 образцов почв. Для изучения миграции ХЭ на глубину опробованы два почвенных разреза до 70 см. Сопряженные с почвами растения были отобраны в количестве 30 проб одного вида – пырей ползучий (*Elytrigia repens*). Почвы брали из верхнего горизонта 10–15 см и с такой же глубины – в техногенном грунте. Образцы почв и растений (надземные органы 30 проб и корни –

15) высушивались до воздушно-сухого состояния, корни растений предварительно промывали в проточной воде.

На исследуемой территории выделили 3 участка, отличающиеся по техногенной нагрузке.

Участок 1 — зона бывших мышьяковых отвалов. На данном участке, после ликвидации отвалов, распространены остатки от производства мышьякового концентрата с высоким количеством органики в виде угольных огарков и с примесью суглинков, продуктов обжига сульфидных руд, в состав которых входили, в основном, арсенопирит, пирит, халькопирит, галенит и алюмосиликаты. На поверхности бывших отвалов и вблизи них образовалась зона окисления с сульфатами и гидроксидами железа.

Участок 2 являлся наиболее опасным источником As, где непосредственно располагались строения промышленных объектов АМЗ. Здесь находились разрушенные остатки цеха и оборудование, где проводили обжиг арсенопиритового концентрата с возгонкой летучих форм As, что инициировало накопление здесь подвижных ионных соединений мышьяка [Kachor et al., 2019]. Переработанные огарки складировали в отвалах. После ликвидации строений завода на участке 2 и вблизи него проведена промывка почв известковым раствором и внесена на поверхности чистая черноземная почва.

Участок 3 — окрестности основной зоны загрязнения, расположенной за пределами участков 1, 2. Здесь распространены дерново-карбонатные почвы с гумусовым горизонтом 10–15 см, легким суглинком и примесью тонкодисперсных огарков, привнесенных за счет атмосферного переноса из отвалов. Рекультивация почв в южной части изученной площади не проводилась.

Химические анализы почв и растений проводили на научном оборудовании сертифицированного аналитического ЦКП «Изотопно-геохимические исследования» ИГХ СО РАН (г. Иркутск). Содержание мышьяка в почве и растениях определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа [Chuparina et al., 2024]. Измерения проводили на рентгеновских спектрометрах S4 Pioneer и S8 Tiger, Bruker, Германия. Ошибка анализа составляла 10–20% (20% при концентрации меньше 50 мг/кг, для более высоких концентраций – 10%). Для определения валовых содержаний ХЭ в пробах почв использовали атомно-абсорбционный метод, измеряли на спектрометрах моделей 403 и 503 производства Perkin Elmer (США). Погрешность определения не превышала 10 %. Для контроля правильности результатов анализа почв и растений использовали стандартные образцы: березовый лист БЛ-1, ГСО 8923–2007, элодея канадская ЭК-1, ГСО 8921–2007, травосмесь Тр-1, ГСО 8922–2007 для растений, а также карбонатная серая почва ССК-1 и техногенная почва СДПС-2 для почв.

Формы нахождения ХЭ в почвах изучались по методике [Кузнецов, Шимко, 1990], являющейся модификацией методики [Tessier et al., 1979], для изучения форм ртути – методика [Bloom et al., 2003]. Химический анализ содержаний ХЭ в вытяжках

из почв анализировался методом атомной абсорбции на спектрометрах Perkin-Elmer-503 и РА-915.

Проведен эксперимент по выращиванию растений при инокуляции почв комплексным биопрепаратом, в состав которого входили ризобактерии: *Azotobacter chroococcum* (штамм Azd 10, ВКМ В-2272 Д), поставляющий аммонийную форму азота в растения, *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* (штамм Р1-04, ВКМ В-2357 Д) — препарат на основе живых почвенных кислотообразующих бактерий, способных переводить фосфор из нерастворимых фракций в подвижные формы и *Bacillus mucilaginosus*, штамм ВКМ В-1574 — препарат на основе силикатных бактерий. Бактерии, содержащиеся в этом препарате, выделяют фермент силиказу и поставляют кремний и другие макро- и микроэлементы из природных силикатов в ризосферу растений. Биопрепараты разработаны в Томском государственном университете. Растения овес (*Avena sativa* L.), горох (*Pisum sativum* L.), салат (*Lactuca sativa*) и редис (*Raphanus sativus* L.) выращивали в центре коллективного пользования «Фитотрон» СИФИБР СО РАН на почвах, отобранных из техногенной зоны территории АМЗ. Почва была взята из поверхностного горизонта на глубину до 15 см на удалении приблизительно 10 м от основного источника загрязнения производственного отвала (участок 1) бывшего АМЗ. Каждая проба была разделена на исходную без бактерий (контроль) и обработанную биопрепаратами (опыт). На этих почвах проведено выращивание растений. Комплексный раствор, с тремя бактериальными препаратами по 5 мл концентрата на 10 л (0,5 мл/л) воды вносился в почву поливом во время посадки и далее через 5 дней в количестве 1 л/м². Титр бактерий в рабочем растворе 10⁶ кл/мл. Растения не достигли зрелого состояния, они были собраны после 37 дней роста. Для анализа использовали растения, высушенные до воздушно сухого состояния. Химический состав проб растений в этом эксперименте определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой ИСП-МС. Использован чувствительный прибор с магнитным сектором ЕЛЕМЕНТ 2. Ошибка определения не превышала 5–10 %. Хелатные формы соединений с ионами металлов и мышьяка выделяли этилендиаминтетрауксусной кислотой (ЭДТА). Органический углерод (Сорг) почвы анализировали по методике Тюрина (ГОСТ 23740-79). Величину рН водное определяли из почвенной суспензии.

Для оценки интенсивности и способности растениями накапливать ХЭ в различных условиях рассчитывали коэффициенты биологического накопления (Кб), как отношение концентрации ХЭ в надземной или корневой частях растений (на сухое вещество) относительно его валового содержания в сопряженной почве. Также был рассчитан транслокационный индекс (ТИ) для оценки способности транслокации ХЭ из корней в побеги растений как отношение содержания ХЭ в надземной части растения (сухой вес) относительно содержания ХЭ в корневой части растения (сухой вес).

Для количественной оценки воздействия ассоциации элементов на окружающую природную среду используется суммарный показатель геохимического загрязнения

(СПЗ), который рассчитывается по следующей формуле: $Z_c = \sum K_c - (n-1)$, где n — число учитываемых ХЭ с $K_c > 1$; K_c — коэффициент концентрации, рассчитанный по следующей формуле: $K_c = \frac{C}{C_{\text{ПДК}}}$, где C — валовое содержание ХЭ в пробе; $C_{\text{ПДК}}$ — значение ПДК для ХЭ.

Глава 3. Закономерности распределения химических элементов в почвах и формы их соединений

По результатам наших исследований основными загрязнителями почв и грунтов, оставшихся после ликвидации бывшей промплощадки Ангарского металлургического завода (АМЗ) в г. Свирске, являются мышьяк и свинец. Эти элементы относятся к первому классу опасности [СанПиН, 2022], известные как сильные экотоксиканты, способные инициировать многочисленные физиологические и биохимические нарушения у всех форм живых организмов. Воздействие высоких концентраций мышьяка на человека могут вызывать онкологические заболевания кожи, печени, мочевого пузыря, почек и легких и некоторые другие заболевания. Высокие дозы мышьяка приводят к развитию острой интоксикации при вдыхании мышьяковистых соединений, а также при попадании этих соединений в организм человека через кожу и с пищей. Мышьяк очень подвижен в окружающей среде и при воздействии почвенных бактерий выделяет летучие формы в виде газа и аэрозолей из почвы в атмосферу. Свинец также считается одним из наиболее распространенных и токсичных элементов для живых организмов и обычным загрязнителем урбанизированных территорий. Повышенное содержание свинца в организме человека приводит к острым и хроническим заболеваниям различных систем органов в результате вмешательства в клеточные процессы. Воздействие свинца вызывает риск возникновения неврологических, сердечно-сосудистых, онкологических заболеваний, болезни почек, возникновение анемии, а также снижение умственного развития у детей.

На рисунке 1 показано пространственное распределение концентраций мышьяка и свинца на изученной территории. Мышьяк в почвах исследованной территории характеризуется очень высокими концентрациями, превышающими допустимую концентрацию в сотни раз, (ПДК As – 10 мг/кг [СанПиН, 2022]), рисунок 1. В настоящее время максимальные концентрации As в грунте отвала (участок 1) составляют 8394 мг/кг, среднее содержание 2543 мг/кг, что превышает ПДК в 250 раз. На участке 2, где непосредственно находились строения завода и вблизи него, после удаления остатков завода и проведения рекультивации почв среднее содержание As в почве значительно снизилось, превышает ПДК в 7 раз. На участке 3, расположенном на окраине изученной территории, за пределами бывшей промышленной зоны, выделяются единичные аномалии мышьяка (образцы почв № 9, 29, 59) с содержаниями выше 1000 мг/кг. В среднем на этой территории загрязнение мышьяком остается высоким, так как концентрации мышьяка превышают ПДК в 60 раз.

Распределение содержания свинца на территории бывшего АМЗ г. Свирска представлено на рисунке 1.

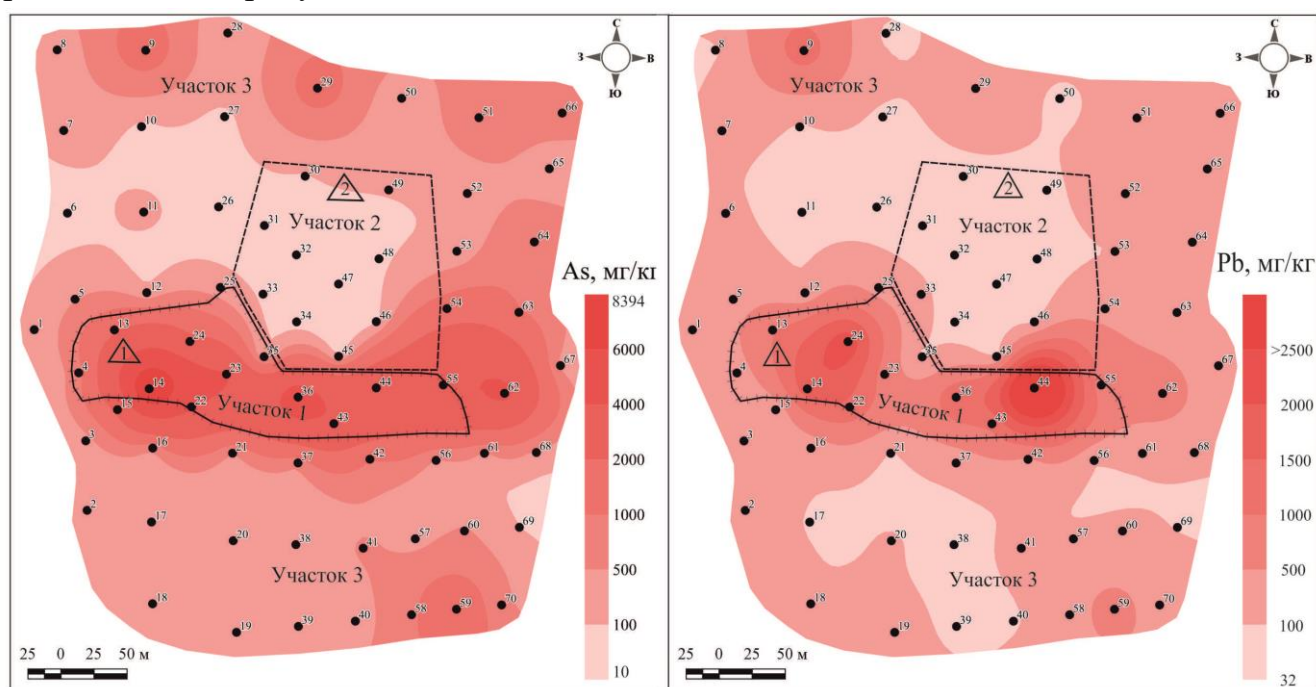


Рис. 1. Распределение концентраций As и Pb мг/кг в техногенных грунтах и почве. Участок 1 – остатки грунта отвалов; участок 2 – бывшие строения завода, 3 – окрестности территории. (ПДК As – 10 мг/кг, Pb – 32 мг/кг). Треугольниками обозначены почвенные разрезы 1, 2.

Данная территория характеризуется повышенными концентрациями свинца в почве, значительно превышающими ПДК (32 мг/кг). Максимальные концентрации свинца установлены в почвенном грунте участка 1, наибольшее содержание составляет 4910 мг/кг, что выше ПДК в 153 раза, минимальное значение – 43 мг/кг (рис.1). В среднем содержание Pb на этом участке превышает ПДК в 28 раз. Источником этой аномалии могут являться остатки бывших отвалов от производства рудного концентрата, в состав которого входили сульфидные минералы галенита (PbS). Почвы окрестности изученной территории также загрязнены свинцом, относительно ПДК.

Кроме мышьяка и свинца в почвах и грунтах бывшей промплощадки Ангарского металлургического завода в г. Свирске обнаружены высокие содержания и других тяжелых металлов – Cd, Zn, Cu, содержание которых на участке 1 значительно превышает ПДК (ПДК Cd – 0,5 мг/кг, Zn – 55 мг/кг, меди Cu – 33 мг/кг). Суммарное накопление в техногенных почвах изученной территории тяжелых металлов и мышьяка могут усиливать токсичные свойства почв, вызывая синергетический эффект.

После ликвидации отвала его остатки прослеживаются на поверхности и до глубины 30–40 см. Это видно на примере распределения содержания химических элементов по почвенному профилю №1, таблица 1, рис. 1.

Таблица 1. Распределение содержания As, Pb, Cu, Zn, Mg, Ca (мг/кг), C_{орг} (%), рН в почвенных разрезах

Глубина, см	Параметры									
	As	Pb	Cu	Zn	Cd	Hg	Mg	Ca	C _{орг}	рН
1 разрез										
0-10	8590	4510	1020	365	2,6	11,9	4480	20257	6,47	3,03
10-20	8250	295	830	113	1,6	0,04	10341	5908	4,02	3,1
20-30	5150	220	980	155	1,3	0,03	11838	13533	3,02	3,46
30-40	146	40	6650	3050	11,8	0,04	11897	50412	1,52	6,76
40-50	12	38	600	1200	4,3	0,03	18250	69393	1,42	7,73
50-60	11	44	29	80	1,9	0,02	20266	77518	0,89	7,94
60-70	259	60	183	153	2,1	0,07	18725	60671	0,71	8
2 разрез										
0-10	120	37	1305	227	2,4	0,04	10175	7738	4,74	3,78
10-20	67	33	900	315	3,1	0,03	13607	15508	4,13	3,79
20-30	37	37	93	600	5,1	0,04	14405	15560	2,89	4,07
30-40	25	39	41	1360	3,7	0,04	16894	28851	2,31	7,4
40-50	34	42	24	73	1,6	0,03	18694	64430	1,09	7,85
50-60	65	51	22	65	1,9	0,03	19363	76758	0,83	8,13
60-70	185	113	38	87	2,2	0,05	21221	67841	0,61	8,05

Содержание As и Pb с поверхности и до глубины 40 см остается очень высоким. Далее снижается, а на глубине 60–70 см концентрация As возрастает. Причиной этому служит развитый на глубине глинистый природный горизонт, который создает геохимический барьер, способствующий иммобилизации подвижных форм мышьяка и свинца. Такая же тенденция, при меньших концентрациях As и Pb, наблюдается и в почвенном профиле №2 на месте бывших строений АМЗ участка 2, табл. 1. Максимальные концентрации Cu, Zn и Cd отмечены на глубине 30–40 см в первом почвенном разрезе, сорбция данных элементов объясняется повышением параметров рН, а также наличием глинистого горизонта.

Для того чтобы установить закономерности потенциальной подвижности и трансформации соединений химических элементов и оценить степень их закрепления в различных компонентах почвы, обычно используют не содержания химических элементов в какой-либо фракции, а рассчитывают величину концентраций элементов в процентном соотношении для отдельной фракции относительно суммы всех фракций (Ладонин, 2019). Такой подход дает возможность оценить особенности трансформации соединений тяжелых металлов и металлоидов и установить степень их потенциальной подвижности в техногенной почве. Это является важной задачей при изучении загрязнения почв и поступления элементов-токсикантов в растения.

Распределение форм соединений As и ТМ, их подвижность на трех выше описанных участках и вертикальных почвенных разрезах показаны на рисунке 2.

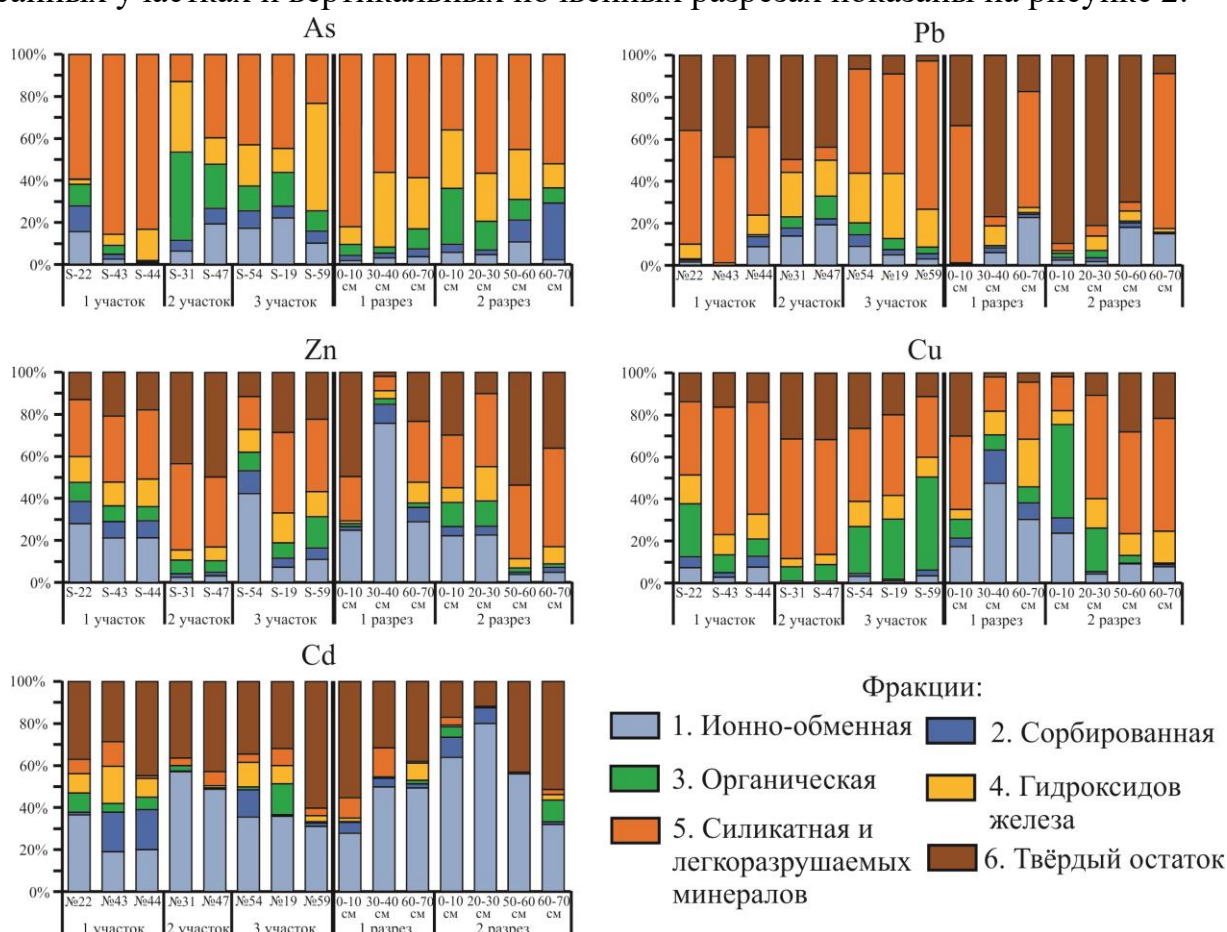


Рис. 2. Распределение концентраций элементов по фракциям (процент от суммы фракций) в почвах территории бывшего АМЗ. Участок 1 – остатки грунта отвалов, участок 2 – бывшие строения завода, 3 – окрестности территории.

На участке 1 в почвенном грунте наиболее подвижными являются Cd, Zn, Cu. Источниками этой группы элементов могут быть минералы сфалерит ZnS и халькопирит $CuFeS_2$, кадмий может являться как примесь в сфалерите. При разрушении минералов эта группа элементов в техногенных почвах может находиться в форме легко разрушаемых минералов фракции 5 и далее переходить в более подвижные соединения. Особо подвижными являются кадмий и цинк, при этом частично эти элементы закреплены и в твердом остатке, наряду со свинцом на этом участке. Мышьяк в твердом остатке практически не обнаружено, так как он в основном может находиться в виде гипергенных и легко разрушаемых минералов во фракции 5 и с гидроксидами Fe. Большая часть свинца закрепляется в твердом остатке и силикатной фракции.

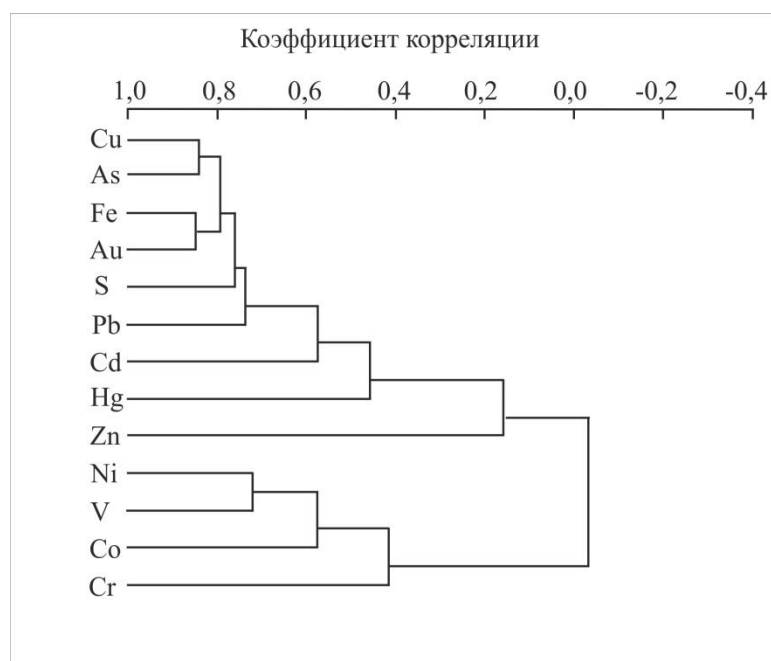
На втором участке Pb и особенно As переходят в подвижные и потенциально подвижные фракции. Небольшая часть As закрепляется в силикатной фракции, а в твердом остатке мышьяк практически отсутствует. Повышенная подвижность As и Pb на этом участке обусловлена использованием сульфидных руд, в основном,

арсенопирита в производственном процессе в результате их обжига. Но валовые содержания As и Pb и других элементов на этом участке имеют невысокие значения, так как здесь была проведена рекультивация почв.

На третьем участке накопление потенциально токсичных элементов связано с пылевым переносом загрязняющих веществ. На этой территории в подвижной ионно-обменной фракции повышен процент Cd, Zn, As, но большая часть потенциально токсичных элементов связана с гидроксидами Fe и закреплена в силикатной фракции.

Распределение форм нахождения As и ТМ по почвенным разрезам, в основном, зависит от степени подвижности самих элементов, рН почвы и наличия геохимического барьера, табл. 1, рис. 2.

Для комплексной оценки полиэлементного загрязнения почв была построена



дендрограмма кластерного анализа почв, рисунок 3. В результате кластерного анализа были выделены 2 геохимические группы элементов.

Первая группа представлена в основном халькофильными элементами, входящими в основные сульфидные минералы: As, Pb, Cu, Cd, Hg, Fe, S, Au.

Вторая выделенная группа представлена сидерофильными элементами: Ni-V-Co-Cr, которые относятся ко второй степени опасности.

Рис. 3. Дендрограмма результатов кластерного анализа содержания ХЭ в почвах территории бывшего АМЗ г. Свирска (70 образцов)

На изученной территории сидерофильные элементы являются сопутствующими и представляют меньшую опасность. При этом Au максимально связано с Fe, что может указывать на его перераспределение в зоне окисления сульфидов. Такое элементное распределение подтверждает, что основным источником элементов-загрязнителей являлись сульфидные руды, которые использовались в технологических процессах при производстве мышьякового концентрата. Связь золота с сульфидными минералами общеизвестна. При окислении сульфидов рассеянное в них золото освобождается и становится доступным для миграции в зоне техногенеза. Большая роль в этих процессах принадлежит оксидам Fe, органическому веществу.

По полученным данным была построена карта суммарного показателя загрязнения почв (СПЗ), рисунок 4.

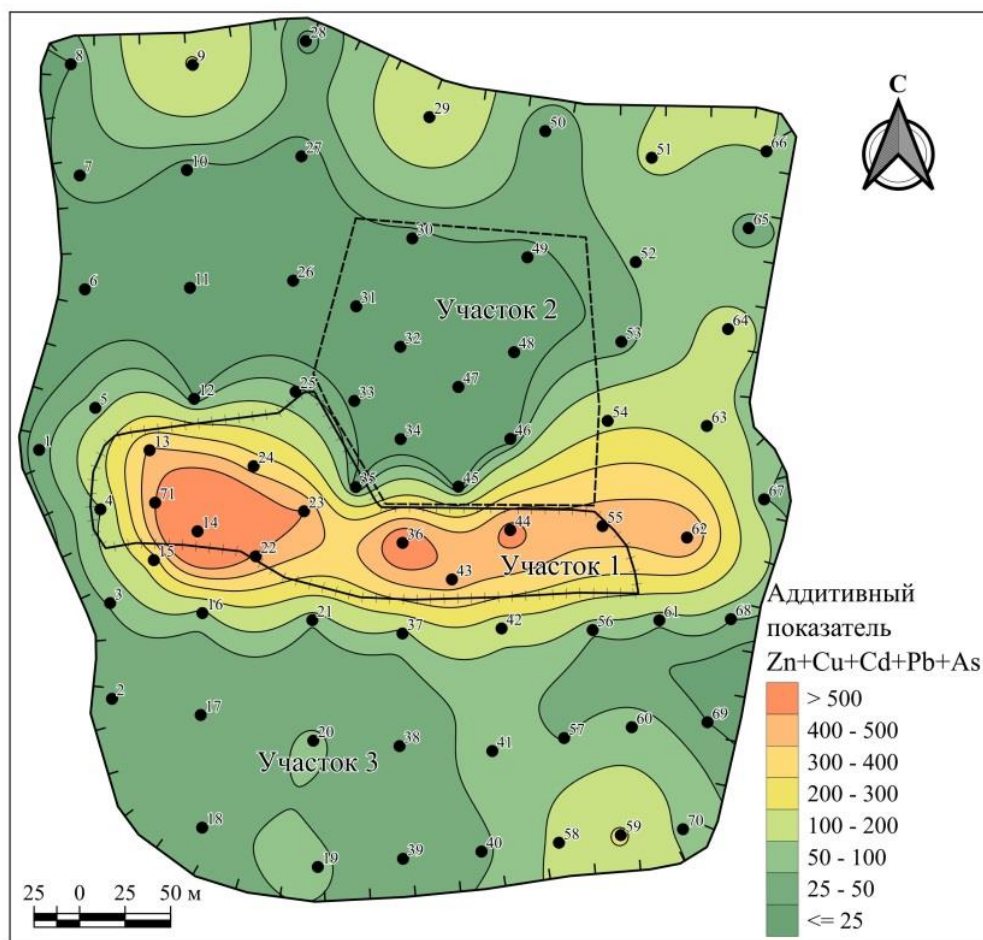


Рис. 4. Схема пространственного распределения значений суммарного показателя загрязнения техногенных почв для потенциально токсичных элементов территории бывшего АМЗ после его ликвидации

Количественной оценочной мерой загрязнения почв является суммарный показатель геохимического загрязнения почвы (СПЗ), который представляет собой аддитивную сумму превышений коэффициентов концентрации над единичным (фоновым) уровнем. В качестве такого уровня в данном исследовании вместо фоновых значений используется показатель ПДК, как нормативно обоснованный и универсальный критерий гигиенической оценки загрязнения почв. Уровни СПЗ представлены на рисунке 4. На участке 1 суммарный показатель загрязнения по оценочной шкале можно отнести к очень высокому (> 128 по Саеt, 1990), что указывает на интенсивное загрязнение техногенных почв на первом участке.

Глава 4. Распределение химических элементов в системе «почва-растение»

Особенности накопления химических элементов в растениях из почвы в различных техногенных условиях участков 1–3 показаны на примере травянистых растений пырея ползучего (*Elytrigia repens*), максимально распространенного на данной

территории. Изучено распределение As в надземных вегетативных органах, корневой системе и степень его биоаккумуляции относительно сопряженных с растениями почв. Общее распределение концентраций As и Pb в растениях показано на рисунке 5.

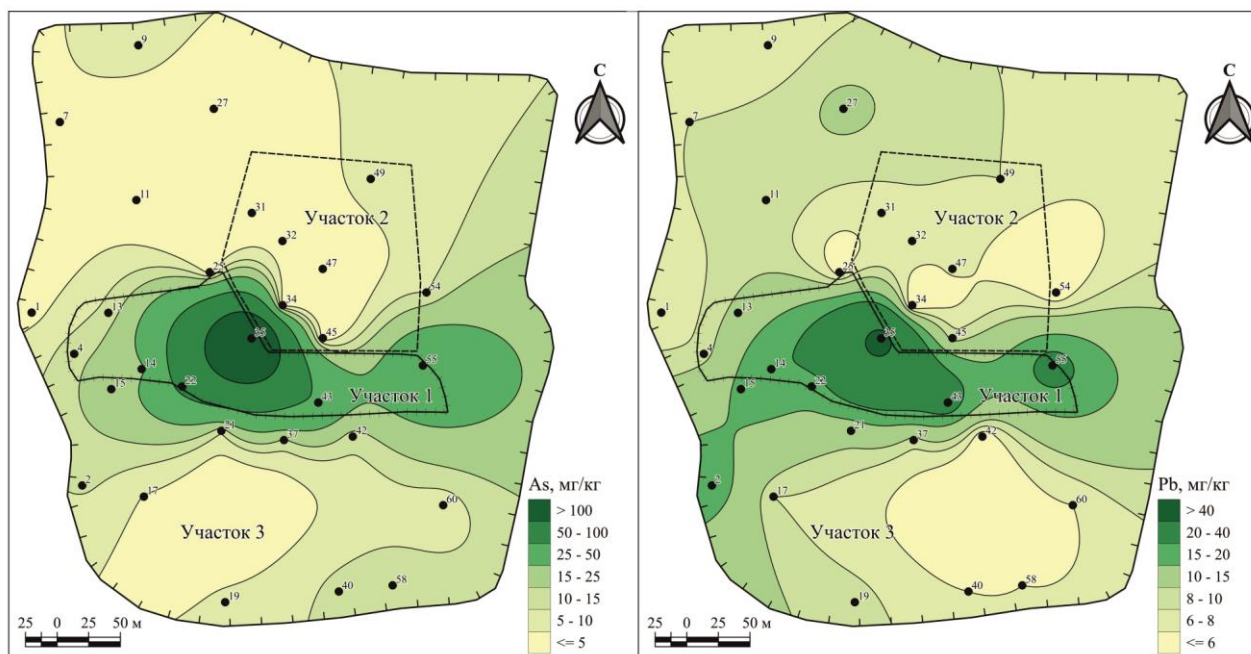


Рис. 5. Схема распределения концентраций As и Pb в надземной части *Elytrigia repens*, мг/кг (сухое вещество)

В надземной части пырея на изученной территории концентрации As и Pb значительно превышают содержания травянистых растений незагрязненных территорий, которые составляют для As – 0,3 мг/кг, для Pb – 2,1 мг/кг. Максимальное накопление мышьяка и свинца характерно для растений зоны техногенных грунтов участка 1. Пониженные концентрации As в растениях, относительно Pb других территорий, установлены на участке 2.

Полученные результаты исследований указывают на то, что большую роль в транспортировке мышьяка в надземную часть растений играет корневая система, которая способна повышать растворимость и подвижность мышьяка в почве ризосферы и способствовать транслокации его в побег пырея. С увеличением концентрации As в почве происходит увеличение его в корнях и надземных органах растений.

Для оценки интенсивности и способности накапливать химические элементы растениями в различных условиях рассчитывали коэффициенты биологического накопления Кб для корней и надземной части растений, а также транслокационные индексы (ТИ). Данные по средним показателям коэффициентов и индексов показаны в таблице 2.

Полученные результаты рассчитанных индексов коэффициентов биологического накопления (Кб) показали, что основное накопление потенциально токсичных элементов наблюдается в корневой части *Elytrigia repens*. Повышенные значения индексов Кб и ТИ отмечены на территории участка 2 (бывшие строения АМЗ), что

обусловлено низкими концентрациями ХЭ в почве и более подвижными формами их нахождения на этом участке.

Таблица 2. Средние показатели оценочных индексов Кб и ТИ.

(жирным шрифтом выделены повышенные значения)

Кб надземная часть					
№ участка	As	Pb	Zn	Cu	Hg
1	0,019	0,03	0,08	0,04	0,020
2	0,15	0,15	0,21	0,24	0,192
3	0,019	0,03	0,11	0,05	0,084
Кб корни					
1	0,21	0,17	0,35	0,36	0,074
2	0,6	0,36	0,60	0,47	0,631
3	0,24	0,25	0,35	0,30	0,244
Транслокационный индекс (ТИ)					
1	0,1	0,164	0,22	0,12	0,22
2	0,31	0,51	0,36	0,51	0,403
3	0,08	0,155	0,30	0,18	0,385

В процессе исследований изучены закономерности взаимодействия между биотическими и потенциально токсичными элементами в различных органах растений пырея при токсическом стрессе. Это рассмотрено на основе изучения множественной корреляции между концентрациями As, Pb, Cu, Zn и основными биотическими макроэлементами K, P, Ca, Mg, Si, S, Na, которые входят в состав структуры растительных клеток и участвуют в их метаболических процессах. Растения разных ботанических видов имеют в природе свое избирательное постоянное накопление эссенциальных элементов в различных

органах. В техногенных условиях под влиянием токсического стресса происходит нарушение метаболических процессов в клетках растений, что отражается на соотношении потенциально токсичных и некоторых биотических элементов. Изучение межэлементного взаимодействия может представлять большой интерес для оценки состояния растений в природно-техногенных экосистемах. Основные межэлементные связи в корнях и в побегах пырея выделены на основе кластерного анализа. Результаты показаны на дендрограмме, рисунок 6.

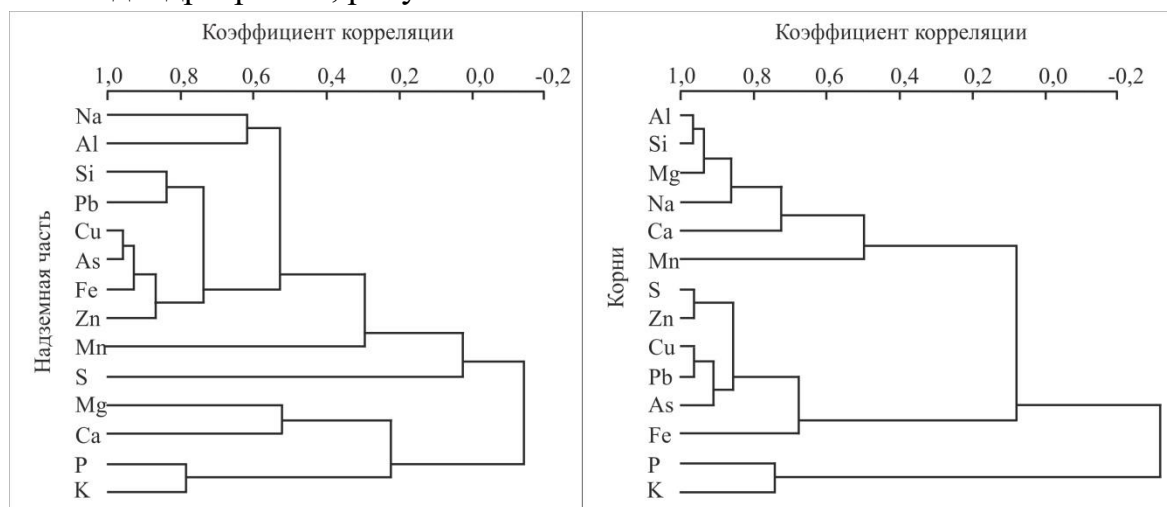


Рис. 6. Дендрограмма результатов кластерного анализа содержания ХЭ в растениях, произраставших на территории бывшего АМЗ г. Свирска

В корневой системе выделены три ассоциации элементов с высокой корреляцией: 1 - (Al – Si – Na – Mg – Ca – Mn); 2 - (P – K); 3 - (As – S – Zn – Cu – Pb – Fe). Третья группа выделенных халькофильных элементов может указывать на преимущественно пассивное их поглощение корнями из загрязненных данными элементами почв. Пассивное движение ионов в клеточных стенках апопласта корней растений может способствовать поглощению кальция и магния. Кремний содержится во всех растениях и, в основном, концентрируется в больших количествах в клеточных стенках вместе с натрием.

В надземной части растений установлены межэлементные связи между: 1- (Al – Si – Na – As – Pb – Cu – Fe – Zn); 2- (Mg – Ca); 3- (P – K). Первая ассоциация ХЭ обладает низкой биофильностью и способна, в основном, накапливаться в клеточной стенке надземных органов растений. В отдельных работах показано, что значительное количество As и других ХЭ сосредоточено в клеточной стенке надземных органов растений, иногда до 50% по сравнению с другими органеллами [Farooq et al., 2016]. Клеточная стенка растений способна связывать избыточные ионы мышьяка и других потенциально токсичных элементов, особенно у толерантных видов растений, которые являются гипераккумуляторами [Yan et al., 2012].

Установлено также, что при воздействии полиметаллов на растения в надземной их части происходит модификация клеточной стенки побегов растений в результате деметилирования пектинов. Это увеличивает ее ионообменную способность и приводит к накоплению в ней токсичных элементов [Meuchik et al., 2021]. По-видимому, этим объясняется положительная корреляционная связь (As – Pb – Zn – Cu) с (Na – Si) и отрицательная связь (As – Pb – Zn – Cu) с (P – K) в побегах пырея, произраставшего на техногенных почвах (рис. 6). Цитоплазма внутри клетки надземных вегетативных органов является основным местом метаболизма растений, где большую роль играют К и Р. Эти элементы характеризуются значимой отрицательной корреляцией с потенциально токсичными элементами.

Можно сделать вывод, что высокие концентрации данных элементов, присутствующие в техногенных почвах этой территории, могут влиять на метаболические реакции в клетках травянистых растений, связанных с нарушением поступления в них основных биотических элементов К и Р, необходимых для их жизнедеятельности. Полученные результаты указывают на особое межэлементное взаимодействие As и Р. Отрицательная значимая корреляция этих элементов наблюдается и в корнях, и в побегах пырея. Это может объясняться тем, что As и Р обладают сходством по химической структуре и используют одну и ту же транспортную систему. По данным [Lee et al., 2016] внесение фосфора в загрязненные мышьяком почвы снижает поглощение концентраций As в различных органах растений.

Глава 5. Влияние ризосферных бактерий на трансформацию соединений микроэлементов и их биодоступность для растений в условиях техногенеза

В настоящее время широко обсуждается роль ризосферных бактерий, стимулирующих рост и развитие растений PGPR (*Plant Growth Promoting Rhizobacteria*)

и их перспективность в развитии экологически чистого растениеводства. Эта группа бактерий дает возможность сократить применение минеральных удобрений, так как стимулирует аккумуляцию элементов питания для растений – фосфора и кремния. Она также ориентирована на защиту от фитопатогенов и отказ от токсичных пестицидов. Известно, что многие микроорганизмы обладают высокой устойчивостью к тяжелым металлам, могут участвовать в процессах трансформации их соединений в почве, что воздействует на аккумуляцию этих элементов в растениях. Широкое внедрение биопрепаратов на основе микроорганизмов представляет особую актуальность в области ремедиации почв и открывает новые перспективы при разработке новых биотехнологий.

Проведен эксперимент по выращиванию растений при инокуляции почв комплексным биопрепаратом, в состав которого входили ризосферные бактерии *Azotobacter* и *Bacillus*. В результате в растениях, выращенных на почвах, инокулированных ризобактериями, наблюдалось значительное снижение аккумуляции тяжелых металлов и мышьяка растениями за счет их биосорбции ризосферными бактериями, которые создавали биохимический барьер в почве для поступления As, Pb, Cd в растения (Рисунок 7). Это указывает на высокую толерантность ризобактерий к высоким концентрациям тяжелых металлов и мышьяка, содержание которых резко снижается в растениях, выращенных под воздействием бактерий (табл. 3).

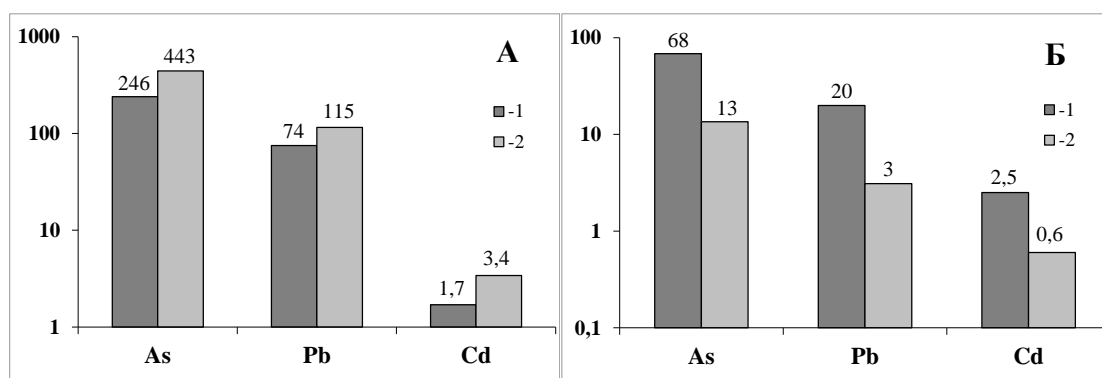


Рисунок 7. (А) – Концентрации As, Pb и Cd мг/кг в вытяжке ЭДТА техногенных почв, (Б) – средняя концентрация As, Pb и Cd мг/кг в растениях (сухое вещество), выращенных на техногенных почвах (участок 1). 1 – контроль, 2 – опыт.

Накопление тяжелых элементов и мышьяка в растениях зависит и от вида растений. Так, например, салат обладает более выраженной способностью поглощать тяжелые металлы и мышьяк. Аккумуляция тяжелых металлов для этого растения происходит по безбарьерному типу, поэтому при расчете средних содержаний элементов для растений (рис. 7 Б) концентрации по салату не учитывались. Растения, выращенные на контрольной почве, характеризуются максимальным содержанием тяжелых металлов и As, особенно в корневой системе. В опыте концентрации этой группы элементов значительно снижаются во всех органах растений (табл. 3).

Таблица 3. Концентрация химических элементов в растениях (мг/кг, на сухое вещество), выращенных на почвах, отобранных в 10 м от отвалов АМЗ (участок 1).

Растения	As	Cd	Pb	Cr	Ni	Co	Cu	Zn
Контроль								
Салат	101	9,3	51,1	0,958	4,76	2,30	32,9	325
Редис	79,7	3,01	25,3	0,531	2,16	1,06	34,5	345
Горох (стебель листья)	18,7	1,11	5,04	0,201	2,97	0,45	10,8	99,3
Горох корень	110	6,18	27,7	0,696	5,06	2,41	20,8	308
Овес (стебель листья)	19,2	0,85	0,82	0,175	2,54	0,067	3,73	41,1
Овес корень	120	1,44	40,6	0,810	2,05	0,97	16,7	103
Опыт								
Салат	109	2,98	62,1	1,27	2,06	1,04	52,2	121
Редис	7,71	0,25	1,89	1,17	2,05	0,45	6,46	33,3
Горох (стебель, листья)	11,8	0,86	2,90	0,225	2,30	0,34	8,92	73,5
Горох корень	2,28	0,15	0,96	0,286	0,72	0,11	2,33	23,6
Овес (стебель, листья)	14,8	0,88	1,71	0,155	1,68	0,083	3,21	36,2
Овес корень	30,7	0,85	8,26	0,325	0,78	0,33	7,77	63,8
Среднее содержание в травах [Kabata-Pendias, 2011]	0,2	0,05	0,5	0,1-0,9	0,1-1,7	0,03-0,27	1,8-10,5	12-47

Примечание: Жирным шрифтом выделено повышенное содержание элементов в растениях при сопоставлении контрольного и опытного эксперимента с ризобактериями.

При высоких концентрациях ТМ в почве растения выделяют в ризосферу органические кислоты и другие вещества, которые переводят микроэлементы в хелатные формы [Kabata-Pendias, 2011]. Уменьшение доступности микроэлементов для растений обусловлено аккумуляцией хелатных соединений ТМ и As ризобактериями (рис. 7 А). При очень высоких концентрациях ТМ в почвенном растворе, вероятно, активируются защитные реакции у микроорганизмов за счет образования биопленки, и в ризосфере начинают преобладать микробиологические иммобилизационные процессы. Токсические концентрации химических элементов могут накапливаться в матриксе биопленки бактерий. Это может служить одним из объяснений снижения содержания тяжелых металлов в растениях при инокуляции загрязненных почв ризобактериями.

Таким образом, проведенные исследования позволили выделить основные закономерности и факторы, влияющие на миграцию тяжелых металлов и As в системе почва – растение в условиях техногенеза. Установлено значительное влияние биопрепарата, разработанного на основе ризобактерий *Azotobacter* и *Bacillus* на особенности миграции тяжелых металлов и As в системе почва – растение. [Belogolova et al., 2019]. В условиях загрязненных техногенных почв ризобактерии способны переводить тяжелые металлы и мышьяк в труднодоступные для растений органические соединения, включая хелатные формы, способные сорбироваться ризобактериями и способствовать снижению аккумуляции элементов-токсикантов в растениях.

Накопление тяжелых металлов в растениях зависело от их вида и органов растения. Максимальное их поступление отмечено в корнях.

Установлено, что ризобактерии *Azotobacter* и *Bacillus* обладают высокой устойчивостью к токсичным дозам тяжелых металлов и способствуют трансформации формы нахождения элементов и их иммобилизации в ризосферной части почвы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования установлено повсеместное загрязнение потенциально токсичными элементами верхних горизонтов почв и наиболее распространенных на этой территории растений в виде пырея (*Elytrigia repens*). После ликвидации промышленных объектов Ангарского металлургического завода, концентрации многих химических элементов в почвах и грунтах остаются очень высокими, превышающими ПДК в сотни раз в зоне бывших отвалов, которые являются основным очагом загрязнения. На удалении от этой зоны степень загрязнения почв уменьшается, а миграционная подвижность ХЭ увеличивается.

Сделан вывод, что по уровню загрязнения верхних горизонтов почв мышьяком, свинцом и другими потенциально токсичными элементами, большая часть изученной территории не пригодна для землепользования и остается опасной зоной для проведения непосредственно на ней хозяйственной деятельности.

Изучение форм соединений As, Cd, Zn указывает на их особо повышенную мобильность и способность образовывать множество различных форм соединений в почве, которые обусловлены различной спецификой источников загрязнения. Основными факторами, влияющими на степень подвижности ХЭ в почве, являлись рН, наличие органического вещества, гидроксидов железа, карбонатов и алюмосиликатов.

Установлено, что интенсивность накопления и транслокация изученных элементов в пырее зависит не только от их валового содержания в почве, но и от формы нахождения и степени их подвижности в почве.

Максимальное накопление As, Pb, Cu, Zn, Hg отмечается в корнях пырея. Защиту надземной части пырея от избытка потенциально токсичных элементов берет на себя корневая система *Elytrigia repens*, что имеет большое значение для фитоэкстракции и фитостабилизации и указывает на его повышенную толерантность.

Основной закономерностью биогеохимических изменений в растениях зоны мышьякового загрязнения является антагонизм основных эссенциальных элементов К, Р к накоплению потенциально токсичных ХЭ в надземных органах пырея. Это указывает на наличие дисбаланса и нарушение поступления в клетки побегов пырея основных биогенных макроэлементов, необходимых для жизнедеятельности растений.

Техногенные почвы послужили основой для проведения модельных экспериментов при изучении влияния ризосферных бактерий на формы соединений мышьяка и тяжелых металлов, на их иммобилизацию и миграцию в техногенных почвах, а также возможность их аккумуляции в растениях.

В условиях техногенного загрязнения ризобактерии *Azotobacter* и *Bacillus* способствовали иммобилизации тяжелых металлов и мышьяка в почве, что приводило к снижению аккумуляции элементов-токсикантов в растениях. Накопление тяжелых металлов в культурных растениях зависело от их вида и органов растения. Максимальное их поступление отмечено в безбарьерных видах растений и корнях.

Таким образом, комплексный препарат на основе ризобактерий *Azotobacter* и *Bacillus* обладает высокой устойчивостью к токсичным дозам тяжелых металлов, способствует трансформации формы нахождения элементов и их иммобилизации в ризосферной части почвы и блокирует поступление элементов-токсикантов в растения.

Проведенные исследования позволили выделить основные закономерности и факторы, влияющие на миграцию тяжелых металлов и As в системе почва – растение в условиях техногенеза. Полученные результаты исследований могут быть полезны для разработки новых биотехнологий, применяемых для фиторемедиации, рекультивации почв и выращивания растений, а также для лучшего понимания механизма поведения потенциально токсичных элементов в системе почва – растение и их взаимодействия с биогенными макроэлементами.

В настоящее время рекомендуется расширить территорию проведения эколого-геохимических исследований вокруг изученной зоны загрязнения. Необходимо проведение рекультивации на участке 1, вывоз остатков грунта отвалов загрязненной почвы, внесение чистых плодородных почв и использование методов фитостабилизации с применением толерантных к загрязнению травянистых растений.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи из перечня ВАК, Scopus, WoS

1. **Баенгуев Б. А.**, Мокрый А. В., Каницкая Л. В., Белых О. А. Экологическое состояние территории Южного Прибайкалья: содержание серы в почвах // Успехи современного естествознания. 2016. № 8. С. 156-160.
2. Belogolova G. A., **Baenguev B. A.**, Gordeeva O. N., Sokolova M. G., Pastukhov M. V., Poletaeva V. I., Vaishlya O. B. Rhizobacteria effect on bioaccumulation and biotransformation of arsenic and heavy metal compounds in the technogenous soils // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 381. P. 012007.
3. **Баенгуев Б. А.**, Белоголова Г. А., Чупарина Е. В., Просекин С. Н., Долгих П. Г., Пастухов М. В. Распределение содержания свинца и формы его соединений в техногенной почве г. Свирска (Южное Прибайкалье) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 8. С. 205-214.
4. Chuparina E. V., Belogolova G. A. **Baenguev B. A.**, Sokolnikova Ju. V., Zarubina O. V. Application of some calibration strategies in comparison to determine Cr, Ni, Cu, Zn, As, and Pb in contaminated plants by wavelength dispersive x-ray fluorescence // X-Ray Spectrometry. 2024, 1.
5. Belogolova G. A., **Baenguev B. A.**, Chuparina E. V., Pastukhov M. V., Prosekin S. N., Sokolnikova Yu. V. The mechanism of arsenic behavior in the soil-plant system and its

interaction with biogenic macroelements of plants under conditions of toxic stress // Chemistry and ecology. (в печати).

Прочие публикации

6. **Баенгуев Б. А.**, Каницкая Л. В. Тяжелые металлы в почвах Южного Прибайкалья // Актуальные вопросы в лесном хозяйстве: Материалы молодежной международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 29–30 ноября 2017 года. Санкт-Петербург: СПбГЛТУ им. С.М. Кирова, 2017. – С. 58-61.
7. Белоголова Г. А., Соколова М. Г., **Баенгуев Б. А.**, Гордеева О. Н., Пастухов М. В., Вайшля О. Б. Влияние ризосферных бактерий *Azotobacter* и *Bacillus* на бионакопление тяжелых металлов и мышьяка в системе почва-растение // Географические основы и экологические принципы региональной политики природопользования: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной памяти члена-корреспондента РАН А.Н. Антипова, Иркутск, 23–27 сентября 2019 года. Иркутск: ИГ СО РАН, 2019. С. 320-324.
8. Belogolova G. A., Gordeeva O. N., Sokolova M. G., Pastukhov M. V., Poletaeva V. I., Vaishlya O. B., **Baenguev B. A.** Rhizobacteria effect on arsenic migration and translocation of biogenic elements in plants // KnE Life Sciences. International Scientific and Practical Conference “AgroSMART – Smart Solutions for Agriculture”. 2019. P. 868–876.
9. Gordeeva O. N., **Baenguev B. A.**, Belogolova G. A. Dolgikh P. G. Mercury in Soils and Plants in the Vicinity of Chlor-Alkali Product Manufacturers (Irkutsk Region) // Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology. 2019. V. 1. P. 49-53.
10. **Baenguev B. A.**, Belogolova G. A., Prosekin S. N., Dolgikh P. G., Chuparina E. V. Ecological and geochemical assessment of technogenic soils of Svirsk town // Environmental transformation and sustainable development in the Asian region: Материалы Международной научной конференции, Иркутск, 08–10 сентября 2020 года. Иркутск: ИГ СО РАН, 2020. P. 72.
11. **Баенгуев Б. А.**, Белоголова Г. А., Просекин С. Н., Долгих П. Г., Булсунаева О. С. Эколого-геохимическая оценка техногенных ландшафтов на примере г. Свирска // Материалы научно-практической конференции с международным участием «Комплексные исследования глубоководных водоемов: современные вызовы и решения» Иркутск. 2020. С. 22 – 24.
12. Гордеева О. Н., Пастухов М. В., **Баенгуев Б. А.** Формы нахождения ртути в почвах окрестностей шламохранилища «Усольехимпрома» (Иркутская область) // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Геонауки – 2021», Иркутск, 01–02 апреля 2021 года. – Иркутск: ИРНТУ, 2021. С. 31-35.
13. **Баенгуев Б. А.**, Белоголова Г. А. Содержание мышьяка в почве на территории бывшего Ангарского металлургического завода г. Свирска после рекультивации нарушенных земель // Байкальская молодежная научная конференция по геологии и геофизике: Материалы VI Всероссийской молодежной научной конференции, посвященной памяти академика Н.Л. Добрецова, Улан-Удэ - Горячинск, 23–27 августа 2021 года. – Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2021. – С. 8-10.
14. **Баенгуев Б. А.**, Белоголова Г. А. Оценка загрязнения техногенных почв мышьяком в г. Свирске после ликвидации Ангарского металлургического завода //

Строение Литосферы и Геодинамика: Материалы XXIX Всероссийской молодежной конференции, Иркутск, 11–16 мая 2021 года. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2021. С. 17-18.

15. **Baenguev B. A.**, Belogolova G. A. Distribution of lead in the technogenic soil in Svirsk town (South Baikal region) // Ресурсы, окружающая среда и региональное устойчивое развитие в Северо-Восточной Азии: Тезисы докладов V Международной научной конференции, Иркутск, 23–26 августа 2022 года. Иркутск: ИГ СО РАН, 2022. Р. 87.

16. **Баенгуев Б. А.**, Белоголова Г. А. Эколого-геохимическая оценка соединений мышьяка и свинца в техногенной почве г. Свирска // Материалы Всероссийской конференции (с участием зарубежных ученых), посвящённой 65-летию Института геохимии им. А.П. Виноградова и 105-летию со дня рождения академика Л.В. Таусона. Иркутск, 2022. С. 45-48.

17. **Баенгуев Б. А.**, Белоголова Г. А. Аккумуляция тяжелых металлов и мышьяка под воздействием ризосферных бактерий *Azotobacter* и *Bacillus* в техногенных почвах // Современные проблемы геохимии - 2023: Материалы конференции молодых ученых, Иркутск, 11–16 сентября 2023 года. Иркутск: ИГХ СО РАН, 2023. – С. 8-9.

18. **Баенгуев Б. А.**, Белоголова Г. А. Свинец в системе «почва-растение» в условиях техногенного загрязнения // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXVII Международного молодежного научного симпозиума имени академика М.А. Усова, посвященного 160-летию со дня рождения академика В.А. Обручева и 140-летию академика М.А. Усова, основателям Сибирской горно-геологической школы, Томск, 03–07 апреля 2023 года. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. С. 208-209.

19. Chuparina E. V., Sokolnikova Ju. V., Zarubina O. V., Pashkova G. V., Belogolova G. A., **Baenguev B. A.** WDXRF of vegetable and biological samples with nonstandard matrix or element compositions: quantification of some microelement // Abstracts book of the 6th International hybrid conference on X-ray analysis. 28-30 August 2023, Ulaanbaatar, Mongolia. P. 45-46.

20. **Баенгуев Б. А.**, Белоголова Г. А. Распределение тяжелых металлов и мышьяка в техногенных почвах г. Свирска // Эволюция биосферы и техногенез: материалы IV Всероссийской конференции, посвященной 300-летию РАН первой научной экспедиции под руководством Д. Г. Мессершмидта в Забайкалье, Чита, 05-09 августа 2024 г. С. 49.

21. **Баенгуев Б. А.**, Белоголова Г.А. Поведение As и биогенных элементов P и Si под воздействием ризобактерий в системе «почва растение» // PLAMIC 2024: материалы IV Международной научной конференции «Растения и микроорганизмы: биотехнология будущего». Байкальск, 15–22 сентября 2024 г. С. 213–215.