



УДК 551.4:631.42(571.5)

<https://doi.org/10.26516/2073-3372.2025.51.63>

Фиторемедиация техногенных грунтов, сильно загрязнённых мышьяком и тяжёлыми металлами

В. И. Воронин¹, В. А. Осолков¹, С. Г. Швецов^{1,2*}

¹Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, г. Иркутск, Россия

²Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

E-mail: bioin@sifibr.irk.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных работ по подбору видов растений, способных в большом количестве извлекать из почвогрунта мышьяк. Исследования выполнены с целью обосновать технологию фиторемедиации почвы и грунта на территории г. Свирска (Иркутская область), где с 1934 по 1958 г. работал Ангарский металлургический завод по производству мышьяка. На основании результатов экспериментального выращивания при разных режимах питания на грунте с промплощадки завода определён детоксикационный потенциал гречихи сахалинской *Reynoutria sachalinensis* и топинамбура *Helianthus tuberosus*. Обсуждаются преимущества указанного подхода, предложена схема детоксикации почвогрунтов с применением методов фиторемедиации.

Ключевые слова: загрязнение тяжёлыми металлами, фиторемедиация, металлоаккумулирующие растения, гуматы.

Для цитирования: Воронин В. И., Осолков В. А., Швецов С. Г. Фиторемедиация техногенных грунтов, сильно загрязнённых мышьяком и тяжёлыми металлами // Известия Иркутского государственного университета. Серия Биология. Экология. 2025. Т. 51. С. 63–72. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2025.51.63>

Research article

Phytoremediation of Man-Made Soils Heavily Contaminated with Arsenic and Heavy Metals

V. I. Voronin¹, V. A. Oskolkov², S. G. Shvetsov^{1,2*}

¹Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

²Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The problem of restoring the fertility of soils contaminated with heavy metals (HM) can be solved with the help of phytoremediation, since cleaning soils from HM using engineering equipment is usually ineffective, economically unprofitable and often technically impossible. The way out in this situation may be the use of plants that are able to selectively accumulate metals, especially heavy metals. To do this, it is necessary to select plants of special selection, the efficiency of absorption of toxicants in which reaches significant values, as well as soil improvement with the help of fertilizers and humates. In the city of Svirsk (Irkutsk Region), where the Angarsk Metallurgical Plant for the production of arsenic operated from 1934 to 1958, there is a significant excess of its content in the soil and ground in most of the city and adjacent garden plots. Pollution spreads up to the shore

of the Bratsk reservoir for a distance of more than nine kilometers. We have tested two types of plants, concentrators of arsenic and heavy metals. Two species of plants from different families were identified: Sakhalin buckwheat (Polygonaceae) and Jerusalem artichoke (Asteraceae). These plants have successfully passed the entire cycle of vegetative development from spring to autumn, have increased significant biomass and have shown high accumulating abilities against arsenic. The efficiency of absorption of toxicants in plants was increased with the help of fertilizers and humates. During one growing season, Sakhalin buckwheat plants extracted 15% of the arsenic originally contained in the soil, and Jerusalem artichoke plants – 35%. Based on the results of the study, it is proposed; Detoxification of soils and territories by phytoremediation methods should be carried out in two directions at once: 1) transformation of toxic components into bound and less mobile compounds in the soil and 2) extraction by plants of the remaining mobile toxicants from the soil with subsequent removal of phytomass. The first direction involves the use of agrochemical methods, the second is the use of fast-growing crops with high tolerance to toxicants. The results of the study showed that phytoremediation, although it takes longer than technical methods, ultimately turns out to be more economical, environmentally friendly and socially acceptable.

Keywords: heavy metal pollution, phytoremediation, metal-accumulating plants, humates.

For citation: Voronin V.I., Oskolkov V.A., Shvetsov S.G. Phytoremediation of Man-Made Soils Heavily Contaminated with Arsenic and Heavy Metals. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Biology. Ecology*, 2025, vol. 51, pp. 63-72. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2025.51.63> (in Russian)

Введение

В г. Свирске (Иркутская область) в середине XX в. в течение почти 25 лет действовал Ангарский металлургический завод (АМЗ), после прекращения работы которого остались сильно загрязнённые мышьяком и тяжёлыми металлами отходы производства, брошенные помещения и оборудование. Объём токсичных материалов превышал 116 тыс. кубометров, а площадь сильно загрязнённого участка составляла около 12 га. Особенности географического положения этого объекта (практически в черте города и на берегу р. Ангары) и геологическое строение (водоносные речные отложения) территории способствовали быстрому распространению токсичных элементов в окружающей среде [Ликвидация ... , 2014; Богданов, Столярова, 2006; Гордеева, Белоголова, Гребенщикова, 2010].

Для ликвидации этого опасного очага химического загрязнения, находящегося в пределах городского поселения, в начале прошлого десятилетия были проведены соответствующие мероприятия в рамках Федеральной целевой программы «Национальная система химической и биологической безопасности». На подготовительном этапе возникла альтернатива двух направлений работ: физическое удаление токсичных отходов с последующим их захоронением и использование методов фиторемедиации.

Фиторемедиация – экологически чистый метод очистки почвы от тяжёлых металлов и других токсических элементов с помощью выращивания на ней растений, способных аккумулировать эти элементы. Российские и зарубежные исследователи активно изучают вопросы биоремедиации и биологической детоксикационной активности почвы. Фиторемедиация и лесомелиорация признаны эффективными методами очистки среды [Граковский, Сорокин, Фрид, 1994; Настинова, Доржиева, 1998; Iskandar, Adriano, 1997; Glick, 2003; Kramer, 2005; Arsenic ... , 2012; Bioremediation ... , 2012; *In-situ* phytoremediation ... , 2017; Arsenic ... , 2023; Phytoremediation ... , 2025], под-

ход вытесняет техническую очистку, которая экономически невыгодна. Однако эти методы следует применять, используя соответствующие растения – гипераккумуляторы токсикантов.

Целями настоящей работы являются подбор видов растений, способных в большом количестве извлекать из почвы (грунта) токсичные элементы, в особенности мышьяк, и изучение практических подходов к детоксикации почвогрунта с использованием отобранных растений применительно к конкретной территории.

Материалы и методы исследования

В 2009–2010 гг. в рамках подготовки к возможному использованию фиторемедиационного подхода для ликвидации очага загрязнения на территории бывшего АМЗ мы провели исследования по подбору растений, которые способны поглощать мышьяк. Поскольку территория *in situ* не была огорожена, растения высаживали на территории СИФиБР СО РАН в г. Иркутске. Для этого было приготовлено 20 вегетационных сосудов с грунтом, отобранным в центре промышленной площадки. Начальная концентрация мышьяка в грунте для экспериментов в 2009 г. составляла 7,7 г/кг. В этом исследовании не использовались никакие удобрения. Учитывался баланс мышьяка каждого вегетационного сосуда до начала вегетации растений и после её окончания. Контрольные растения выращивались в обычном грунте. Вегетационные сосуды с растениями выставлялись на открытой площадке. Были испытаны несколько видов растений, обладающих высокой потенциальной способностью к поглощению поллютантов из почвы. В 2010 г. опытные растения выращивались на загрязнённом почвогрунте, содержащем мышьяк в концентрации 2,3 г/кг. Плотность экспериментальных растений была увеличена до натурной посевной. В ряд вегетационных сосудов вносилось комплексное удобрение (гуматизированная нитроаммофоска) в дозах 100, 200 и 300 кг/га. Контрольные растения выращивались в обычном грунте.

По окончании опытов (14 сентября) биомасса растений (надземные и подземные органы) и грунт, на котором они выращивались, были использованы для соответствующих определений. Исследование содержания мышьяка в надземной массе растений и почвогрунте было проведено в 2009 г. в химико-аналитическом центре Института географии имени В. Б. Сочавы СО РАН, в 2010 г. анализ был повторён в аналитическом отделе Института геохимии имени А. П. Виноградова СО РАН. Содержание мышьяка определялось с помощью атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на эмиссионном спектрометре OPTIMA 2100DV и атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермическим атомизатором на спектрометре Analyst 400 (оба PerkinElmer, США), а также по методу прямого атомно-эмиссионного анализа по способу вдувания-просыпки.

Результаты и обсуждение

В опытах использовали два перспективных вида растений из разных семейств: гречиха сахалинская *Reynoutria sachalinensis* (F. Schmidt) (Polygonaceae) и топинамбур *Helianthus tuberosus* L., 1753 (Asteraceae). Эти

растения успешно прошли весь цикл вегетативного развития от весны до осени, нарастили значительную биомассу и показали высокие аккумулирующие способности в отношении мышьяка.

Выращенная на загрязнённом почвогрунте гречиха сахалинская уже к середине августа содержала в своих листьях мышьяк в количестве до 53,3 мг/кг сухого веса, что в 4000 раз больше, чем в контрольных условиях (0,0125 мг/кг сухого веса). Максимум накопления мышьяка у этой культуры пришёлся на середину августа, после чего листья почернели и опали, а на их месте развились новые, которые дожили до осени, однако накопили существенно меньше мышьяка – в 60 раз больше, чем контрольные растения. Фитомасса топинамбура в опыте с загрязнённым грунтом к середине августа содержала в 300 раз больше мышьяка, чем в контроле (10,2 мг на кг сухого веса и 0,032 мг на кг сухого веса соответственно). Максимум накопления мышьяка пришёлся на август. После этого на листе начал развиваться некроз, и она начала опадать. К середине сентября во вновь образованной листе мышьяка содержалось в 46 раз меньше, чем в контрольных образцах¹.

Содержание мышьяка в загрязнённом почвогрунте при начальной концентрации 7740 мг/кг после завершения выращивания топинамбура составило 5560 мг/кг, а гречихи сахалинской – 6690 мг/кг. За весь вегетационный период 2009 г. растения гречихи сахалинской экстрагировали из почвы 15 % изначально содержащегося в ней мышьяка, а топинамбура – 28 %. Разница, вероятно, сформировалась за счёт большей плотности посева и большей биомассы у топинамбура (по отношению к гречихе сахалинской). Содержание мышьяка в подземных частях не учитывалось.

Таким образом, отобранные нами растения подтвердили свойства гипераккумуляторов мышьяка. Их достоинством также является высокая биопродуктивность: надземная биомасса в пересчёте на гектар для гречихи сахалинской составила 8,4 т, для топинамбура – 3,4 т; масса подземных частей составила соответственно 3,63 и 1,96 т/га.

В 2010 г. в конце августа надземная биомасса гречихи сахалинской на грунте без добавки минеральных удобрений при нормальной плотности растений в пересчёте на гектар достигала 10 т, а в опыте с добавкой – 16 т. Подземная биомасса в обоих случаях оказалась сходной по величине и составила 4,37 т/га. Основанная на этих данных оценка показывает, что надземная биомасса гречихи сахалинской в реальных условиях ремедиации территории может находиться в диапазоне 15–20 т/га с пределом урожайности в 40 т/га. При выращивании топинамбура на техногенном грунте без удобрений надземная масса составила 3,2 т/га. Однако при использовании удобрений этот показатель увеличился до 16,8 т/га. Масса клубней и корней в первом случае была равна 1,7 т/га, а во втором – 4,8 т/га. Оценочные данные показывают, что при посеве топинамбура в реальных условиях ремедиации территории урожайность зеленой массы может достигать 30 т/га, а масса корней и клубней –

¹ Для сравнения: ранее проведённые исследования в районе Свирска показали, что картофель, выросший на загрязнённом грунте с содержанием мышьяка 260 мг/кг, содержал мышьяк в количестве 0,236 мг/кг, а кочаны капусты – 0,175 мг/кг.

4–6 т/га. Верхним пределом в наших условиях для топинамбура является урожайность, достигающая 50 т зелёной массы и 20–40 т клубней с гектара.

По окончании опытов (14 сентября) биомасса растений (надземные и подземные органы) и почвогрунт были использованы для соответствующих определений. Максимальное количество мышьяка наблюдалось в подземных частях растений: у гречихи – 12 кг/т, у топинамбура – 8,5 кг/т. Подкормка удобрениями увеличила аккумуляцию мышьяка у гречихи в корневищах, а у топинамбура – в надземной биомассе. Второй год опытов с выращиванием на почвах с высоким содержанием мышьяка вновь подтвердил высокую аккумуляционную способность испытываемых растений в отношении этого токсиканта.

Следует заметить, что эффективность использования растений для детоксикации почв и грунтов ограничивается корнеобитаемым слоем, который для гречихи сахалинской и топинамбура не распространяется ниже 40 см. Для глубинного извлечения мышьяка в проекте предусматривалась также высадка тополей, испытания которых нами не проводились, поскольку они довольно массово уже произрастают на территории промплощадки АМЗ и имеют удовлетворительное жизненное состояние. Химический анализ листьев, собранных с высоковозрастных тополей, растущих на северо-западной части промышленной площадки АМЗ, показал относительно невысокое содержание мышьяка – до 90 г/т. Однако стоит учесть, что концентрация мышьяка в почвах, на которых росли эти деревья, изначально была невысока – 25–50 мг/кг.

Детоксикацию почвогрунтов с применением методов фиторемедиации следует проводить сразу по двум направлениям: 1) перевод токсичных компонентов в связанные и менее подвижные в почве соединения и 2) экстракция подвижных токсикантов из почвы растениями с последующим удалением фитомассы. Первое направление предусматривает использование методов агрохимии, второе – использование быстрорастущих культур с высокой толерантностью к токсикантам. Возникает вопрос, как оптимизировать процесс детоксикации в условиях, когда необходимо уменьшить содержание в почве подвижных и, следовательно, доступных растениям форм токсикантов, и при этом поддерживать высокий уровень поглощения токсикантов растениями? Мы анализировали работы, в которых изучали воздействие гуматов, трилона Б [Ильин, Царькова, 1998; Chen, Lee, Liu, 2000; Papassiopi, Tambouris, Kontopoulos, 1999], известковых и калийных удобрений [Разработка ... , 1997; Шаркова, 2007; Berti, Cunningham, 1997; Derome, 2000], цеолитов [Повышение ... , 2000] на свойства почвы, подвижность токсичных элементов и доступность их растениям. Гуматы проявили себя с наилучшей стороны и наши опыты это подтвердили. Во-первых, при внесении в почву они связывают тяжёлые металлы, образуя нерастворимые и малоподвижные комплексы, недоступные растениям. Эти комплексы выводятся из круговорота веществ в экосистеме. Ряд других элементов образует с гуматами растворимые комплексы (хелаты), которые могут мигрировать либо в растения, либо в более глубокие слои почвы, недоступные растениям. Во-вторых, гуматы активизируют жизнедеятельность растений и почвенной микрофлоры, что повышает их устойчивость к техногенному загрязнению. Это усиливает рост рас-

тений, увеличивает поглощение элементов из почвы и накопление их в фитомассе, благоприятно влияет на физические и химические свойства почвы. В-третьих, гуминовые препараты для целей фиторемедиации доступны и относительно дешёвы на рынке агрохимикатов [Новые ... , 2012].

Поэтому применение гуматов вместе с минеральными удобрениями (раздельно или в виде гуматизированных удобрений) является важным элементом предлагаемой нами методики фиторемедиации почв.

Заключение

Наши исследования показали, что на протяжении одного вегетационного периода растения гречихи сахалинской в экспериментальных условиях способны изъять из грунта 15 % содержащегося в ней мышьяка, а топинамбур – до 35 %. Топинамбур является более предпочтительным для целей фиторемедиации по следующим причинам: 1) накопление биомассы топинамбуром интенсивно происходит как в надземной, так и в подземной частях (клубни), и по этой причине он более активно очищает почвы от токсиканта; 2) агротехника возделывания топинамбура детально проработана, и посадочный материал имеется в широком предложении. Для извлечения мышьяка из глубоких горизонтов нарушенных почв рекомендуется посадка быстрорастущих тополей с последующей утилизацией опадающей листвы. Детоксикация промышленной площадки АМЗ потребовала бы ежегодно в течение семи лет утилизации 360 тонн надземных побегов и 72 тонн клубней топинамбура. Объём подлежащей утилизации биомассы листьев тополя составил бы 24 т. Следовательно, утилизационные сооружения (могильник, саркофаг) для таких объёмов должны быть значительно меньшего размера по сравнению с объёмами утилизируемого грунта, что более выгодно и с экономической, и с экологической точек зрения.

Окончательное решение по способам реализации детоксикации и рекультивации промышленной площадки АМЗ оказалось следующим: работу провести путём физического удаления токсичных отвалов и загрязнённого грунта в специально оборудованные места долговременного хранения (могильники). Основные доводы: быстрота и радикальность достижения поставленной цели, ликвидация источника загрязнения окружающей среды опасными токсикантами. Значительные ресурсные затраты в обеспечении логистики и экологической безопасности при этом игнорировались. Этот план стал осуществляться в 2013 г. Все опасные отходы были вывезены с территории Свирска и захоронены в выработанном угольном карьере в Черемховском районе. Тем не менее, с точки зрения авторов, использование фиторемедиации стало бы хотя и более долговременным, но в результате более экономичным, экологически безопасным и социально приемлемым по сравнению с техническими методами способом решения названной проблемы. В связи с этим мы сочли необходимым опубликовать полученные нами результаты. Существует вероятность, что они могут быть полезны при проведении аналогичных и сопряжённых работ, например удаления остаточных количеств токсикантов и рекультивации территории, освобождённой от загрязнённого почвогрунта.

Список литературы

- Богданов А. В., Столярова Е. А. Рекуперативная технология обезвреживания промплощадки Ангарского металлургического завода // *Экология и промышленность России*. 2006. № 2. С. 25–27.
- Гордеева О. Н, Белоголова Г. А., Гребенщикова В. И. Распределение и миграция тяжёлых металлов и мышьяка в системе почва – растение в условиях г. Свирска (Южное Прибайкалье) // *Проблемы региональной экологии*. 2010. № 3. С. 118–113.
- Граковский В. Г., Сорокин С. Е., Фрид А. С. Санация загрязнённых почв и рекультивация нарушенных земель в России // *Почвоведение*. 1994. № 5. С. 67–72.
- Ильин В. И., Царькова Т. Г. Разработка технических решений по очистке почв территорий промышленных предприятий от тяжёлых металлов и органических веществ // *Экология промышленного производства*. 1998. № 1–2. С. 34–35.
- Ликвидация последствий деятельности мышьякового производства горноперерабатывающей промышленности / А. В. Богданов, О. Л. Качор, К. В. Федотов, Н. В. Чайка // *Экология и промышленность России*. 2014. № 2, С. 31–35.
- Настина Г. Э., Доржиева В. И. Морфофизиологические и экологические особенности кормовых культур-биомелиорантов // *Проблемы сохранения биоразнообразия аридных регионов России : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Волгоград : Изд-во Волгоград. гос. ун-та*, 1998. С. 196.
- Новые высокотехнологичные сорбенты и сорбенты-биодеструкторы на основе гуминовых кислот в качестве средств ремедиации и рекультивации загрязнённых почв / Е. М. Загрербин, А. В. Соснов, С. В. Садовников, М. А. Землякова, Е. Г. Пузыкин, А. А. Шаповалов // *Теоретическая и прикладная экология*. 2012. № 4. С. 29–37.
- Повышение эффективности минеральных удобрений под действием цеолитов / Н. Т. Чеботарев, И. Н. Хмелин, В. М. Швецова, Г. Г. Романов, Т. Е. Спицына // *Аграрная наука*. 2000. № 8. С. 11–12.
- Разработка защитных механизмов при экологических загрязнениях почв тяжёлыми металлами на основе биоаккумуляции / Н. М. Чернавская, Т. Б. Плескачева, А. Ю. Рудяк, Н. И. Воронжева, Н. Н. Качанова, И. И. Потапов, Ю. В. Рудяк // *Обзор: информационные, научные и технические аспекты охраны окружающей среды / ВИНИТИ*. 1997. № 4. С. 23–26
- Шаркова С. Ю. Экологические аспекты известкования и применения удобрений на серых лесных почвах правобережной лесостепи Среднего Поволжья. М. : Агроконсалт, 2007. 174 с.
- Arsenic Removal by Phytoremediation Techniques / Z. Souiri, H. Sharifan, L. M. de Oliveira, L. Ngatia // *Arsenic in Plants: Uptake, Consequences and Remediation Techniques* / eds.: P. K. Srivastava, R. Singh, P. Parihar, Sh. M. Prasad. John Wiley & Sons, 2023. P. 267–286. <https://doi.org/10.1002/9781119791461.ch14>
- Arsenic uptake by plants and possible phytoremediation applications: a brief overview / M. Vithanage, B. B. Dabrowska, A. B. Mukherjee, A. Sandhi, P. Bhattacharya // *Environ. Chem. Lett.* 2012. Vol. 10. P. 217–224. <https://doi.org/10.1007/s10311-011-0349-8>
- Berti W. R., Cunningham S. D. In-place inactivation of Pb-contaminated soils // *Environ. Sci. and Technol.* 1997. Vol. 31, N 5. P. 1359–1364. <https://doi.org/10.1021/es960577+>
- Bioremediation of Arsenic in Contaminated Terrestrial and Aquatic Environments / B. B. Dabrowska, M. Vithanage, K. R. Gunaratna, A. B. Mukherjee // *Environmental Chemistry for a Sustainable World. Vol. 2. Remediation of Air and Water Pollution* / eds.: E. Lichtfouse, J. Schwarzbauer, D. Robert. Springer Nature, 2012. P. 475–509. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2439-6_12
- Chen Z.-S., Lee G.-J., Liu J.-Ch. Chemical remediation techniques for the soils contaminated with cadmium and lead in Taiwan // *Environmental restoration of metals-contaminated soils* / ed. I. K. Iskandar. CRC Press, 2000, P. 93–107. <https://doi.org/10.1201/9780367801243>
- Derome J. Detoxification and amelioration of heavy metal contaminated forest soils by means of liming and fertilization // *Environ. Pollut.* 2000. Vol. 107, N 1. P. 79–88. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00132-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00132-3)

Glick B. R. Phytoremediation: synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment // *Biotechnol. Adv.* 2003. Vol. 21, N 5. P. 383–393. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(03\)00055-7](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(03)00055-7)

In-situ Phytoremediation of Arsenic from Contaminated Soil / O. O. Francis, L. Xiang, M. Li, O. E. Alepu // *Int. J. Waste Resour.* 2017. Vol. 7, Is 1. 1000261. <https://doi.org/10.4172/2252-5211.1000261>

Iskandar I. K., Adriano D. C. Remediation of soil contaminated with metals – a review of current practices in the USA // *Remediation of soils contaminated with metals* / I. K. Iskandar, D. C. Adriano (eds.). Northwood : Science Reviews, 1997. P. 154–160.

Kramer U. Phytoremediation: novel approaches to cleaning up polluted soils // *Cur. Opin. Biotechnol.* 2005. Vol. 16, N 2. P. 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2005.02.006>

Papassiopi N., Tambouris S., Kontopoulos A. Removal of heavy metals from calcareous contaminated soils by EDTA leaching // *Water, Air, and Soil Pollut.* 1999. Vol. 109, N 1–4. P. 1–15. <https://doi.org/10.1023/A:1005089515217>

Phytoremediation of arsenic: A state-of-the-art review with special emphasis on modern biotechnological approaches / I. Ch. Lwanga, S. Bhattacharya, S. Dey, S. Mandal, K. Gupta, J. K. Biswas, Sh. Sengupta, M. Watts // *Total Envir. Eng.* 2025. Vol. 2. 100014. <https://doi.org/10.1016/j.teengi.2025.100014>

References

Bogdanov A. V., Stolyarova E.A. Rekuperativnaya tekhnologiya obezvrezhivaniya promyshchadki Angarskogo metallurgicheskogo zavoda [Recuperative Technology of Neutralization of the Industrial Site of the Angarsk Metallurgical Plant]. *Ecology and Industry of Russia*, 2006, no. 2, pp. 25–27. (in Russian)

Gordeeva O.N, Belogolova G.A., Grebenshchikova V.I. Raspreделение i migratsiya tyazhelykh metallov i mysh'yaka v sisteme pochva-rastenie v usloviyakh g. Svirsk (Yuzhnoe Pri-baikal'e) [Distribution and migration of heavy metals and arsenic in the soil-plant system in the conditions of the city of Svirsk (Southern Baikal region)]. *Problemy Regionalnoy Ekologii* [Problems of Regional Ecology], 2010, no. 3, pp. 118–113. (in Russian)

Grakovskii V.G., Sorokin S.E., Frid A.S. Sanatsiya zagryaznennykh pochv i rekultivatsiya narushennykh zemel v Rossii [Sanation of Contaminated Soils and Reclamation of Disturbed Lands in Russia]. *Eurasian Soil Sci.*, 1994, no. 5, pp. 67–72. (in Russian)

Il'in V.I., Tsarkova T.G. Razrabotka tekhnicheskikh reshenii po ochistke pochv terri-torii promyshlennykh predpriyatii ot tyazhelykh metallov i organicheskikh veshchestv [Development of technical solutions for cleaning the soils of the territories of industrial enterprises from heavy metals and organic substances]. *Industrial Ecology*, 1998, no. 1–2, pp. 34–35. (in Russian)

Bogdanov A.V., Kachor O.L., Fedotov K.V., Chaika N.V. Likvidatsiya posledstviy deyatelnosti mysh'yakovogo proizvodstva gornopreraba-tyvayushchei promyshlennosti [Liquidation of the Consequences of the Arsenic Production of the Mining Industry]. *Ecology and Industry of Russia*, 2014, no. 2, pp. 31–35. (in Russian)

Nastinova G.E., Dorzhieva V.I. Morfofiziologicheskie i ekologicheskie osobennosti kormovykh kultur-biomeliorantov [Morphophysiological and ecological features of fodder crops-bioameliorants]. *Problemy sokhraneniya bioraznoobraziya aridnykh regionov Rossii* [Problems of Conservation of Biodiversity of Arid Regions of Russia]. *Proc. Int. Sci. Conf.*, Volgograd, Russia. Volgograd, Volgograd St. Univ. Publ., 1998, p. 196. (in Russian)

Zagrebin E.M., Sosnov A.V., Sadovnikov S.V., Zemlyakova M.A., Puzykin E.G., Shapovalov A.A. Novye vysokotekhnologichnye sorbenty i sorbenty-biodestruktory na osnove gumi-novykh kislot v kachestve sredstv remediatsii i rekultivatsii zagryaznennykh pochv [New high-tech sorbents and sorbents-biodestructors based on humic acids as means of remediation and reclamation of contaminated soils]. *Theoretical and Applied Ecology*, 2012, no. 4, pp. 29–37. (in Russian)

Chebotaev N.T., Khmelin I.N., Shvetsova V.M., Romanov G.G., Spitsyna T.E. Povyshenie effektivnosti mineral'nykh udobrenii pod deistviem tseolitov [Improving the efficiency of mineral fertilizers under the action of zeolites]. *Agrarian Science*, 2000, no. 8, pp. 11–12. (in Russian).

Chernavskaya N.M., Pleskacheva T.B., Rudyak A.Yu., Voronezhcheva N.I., Kachanova N.N., Potapov I.I., Rudyak Yu.V. Razrabotka zashchitnykh mekhanizmov pri ekologicheskikh zagryazneniyakh pochv tyazhelymi metallami na osnove bioakkumulyatsii [Development of protective

mechanisms in ecological pollution of soils with heavy metals based on bioaccumulation. Inf. Scientific. and techn. aspects of environmental protection]. *Obzor: informatsionnye, nauchnye i tekhnicheskies aspekty okhrany okruzhayushchei sredy* [Overview: informational, scientific and technical aspects of environmental protection VINITI], 1997, no. 4, pp. 23-26. (in Russian)

Sharkova S.Yu. *Ekologicheskie aspekty izvestkovaniya i primeneniya udobrenii na serykh lesnykh pochvakh pravoberezhnoi lesostepi Srednego Povolzh'ya* [Ecological aspects of liming and fertilizer application on gray forest soils of the right-bank forest-steppe of the Middle Volga region]. Moscow, Agroconsalt Publ., 2007, 174 p. (in Russian)

Souri Z., Sharifan H., de Oliveira L.M., Ngatia L. Arsenic Removal by Phytoremediation Techniques. *Arsenic in Plants: Uptake, Consequences and Remediation Techniques*. P.K. Srivastava, R. Singh, P. Parihar, Sh. M. Prasad (eds.). John Wiley & Sons, 2023, pp. 267-286. <https://doi.org/10.1002/9781119791461.ch14>

Vithanage M., Dabrowska B.B., Mukherjee A.B., Sandhi A., Bhattacharya P. Arsenic uptake by plants and possible phytoremediation applications: a brief overview. *Environ. Chem. Lett.*, 2012, vol. 10, pp. 217-224. <https://doi.org/10.1007/s10311-011-0349-8>

Berti W. R., Cunningham S. D. In-place inactivation of Pb-contaminated soils. *Environ. Sci. and Technol.*, 1997, vol. 31, no. 5, pp. 1359-1364. <https://doi.org/10.1021/es960577+>

Dabrowska B.B., Vithanage M., Gunaratna K.R., Mukherjee A.B. Bioremediation of Arsenic in Contaminated Terrestrial and Aquatic Environments. *Environmental Chemistry for a Sustainable World. Vol. 2. Remediation of Air and Water Pollution*. E. Lichtfouse, J. Schwarzbauer, D. Robert (eds.). Springer Nature, 2012, pp. 475-509. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2439-6_12

Chen Z.-S., Lee G.-J., Liu J.-Ch. Chemical remediation techniques for the soils contaminated with cadmium and lead in Taiwan. *Environmental restoration of metals-contaminated soils*. I.K. Iskandar (ed.). CRC Press, 2000, pp. 93-107. <https://doi.org/10.1201/9780367801243>

Derome J. Detoxification and amelioration of heavy metal contaminated forest soils by means of liming and fertilization. *Environ. Pollut.*, 2000, vol. 107, no. 1, pp. 79-88. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00132-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00132-3)

Glick B.R. Phytoremediation: synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment. *Biotechnol. Adv.*, 2003, vol. 21, no. 5, pp. 383-393. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(03\)00055-7](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(03)00055-7)

Francis O.O., Xiang L., Li M., Alepu O.E. In-situ Phytoremediation of Arsenic from Contaminated Soil. *Int. J. Waste Resour.*, 2017, vol. 7, is. 1, 1000261. <https://doi.org/10.4172/2252-5211.1000261>

Iskandar I.K., Adriano D.C. Remediation of soil contaminated with metals – a review of current practices in the USA. *Remediation of soils contaminated with metals*. I.K. Iskandar, D.C. Adriano (eds.). Northwood, Science Reviews, 1997, pp. 154-160.

Kramer U. Phytoremediation: novel approaches to cleaning up polluted soils. *Cur. Opin. Biotechnol.*, 2005, vol. 16, no. 2, pp. 133-141. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2005.02.006>

Papassiopi N., Tambouris S., Kontopoulos A. Removal of heavy metals from calcareous contaminated soils by EDTA leaching. *Water, Air, and Soil Pollut.*, 1999, vol. 109, no. 1-4, pp. 1-15. <https://doi.org/10.1023/A:1005089515217>

Lwanga I.Ch., Bhattacharya S., Dey S., Mandal S., Gupta K., Biswas J.K., Sengupta Sh., Watts M. Phytoremediation of arsenic: A state-of-the-art review with special emphasis on modern biotechnological approaches. *Total Envir. Eng.*, 2025, vol. 2, 100014. <https://doi.org/10.1016/j.teengi.2025.100014>

Сведения об авторах

Воронин Виктор Иванович

доктор биологических наук,
главный научный сотрудник
Сибирский институт физиологии
и биохимии растений СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 132
e-mail: bioin@sifibr.irk.ru

Information about the authors

Voronin Viktor Ivanovich

Doctor of Sciences (Biology),
Principal Research Scientist
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry SB RAS
132, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: bioin@sifibr.irk.ru

Осколков Владимир Александрович

кандидат биологических наук,
старший научный сотрудник
Сибирский институт физиологии
и биохимии растений СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 132
e-mail: vosk@sifibr.irk.ru

Oskolkov Vladimir Aleksandrovich

Candidate of Sciences (Biology),
Senior Research Scientist
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry SB RAS
132, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: vosk@sifibr.irk.ru

Швецов Сергей Георгиевич

кандидат биологических наук,
технолог
Сибирский институт физиологии
и биохимии растений СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 132
доцент
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: sv833890@gmail.com

Shvetsov Sergey Georgievich

Candidate of Sciences (Biology), Technologist
Senior Research Scientist
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry SB RAS
132, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
Associate Professor
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: sv833890@gmail.com