

УДК 550.47:550.73

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ФИТОРЕМЕДИАЦИИ СУЛЬФИДНЫХ ОТХОДОВ ХВОСТОХРАНИЛИЩ ОВСОМ ПОСЕВНЫМ (*AVENA SATIVA*)

Бортникова Светлана Борисовна¹,
BortnikovaSB@ipgg.sbras.ru

Артамонова Валентина Сергеевна²,
artamonovavs@yandex.ru; artamonova@issa-siberia.ru

Абросимова Наталья Александровна¹,
AbrosimovaNA@ipgg.sbras.ru

Юркевич Наталия Викторовна¹,
YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

Хвощевская Альбина Анатольевна³,
unpr_voda@mail.ru

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3.

² Институт почвоведения и агрохимии СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 8/2.

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Повышение концентрации металлов и металлоидов в наземных экосистемах в результате деятельности горнодобывающей и металлургической промышленности является серьезной проблемой для окружающей среды – приводит к накоплению элементов в почвах, дикорастущих и сельскохозяйственных растениях и сопровождается загрязнение компонентов пищевой цепи.

Цель: определить и оценить способность овса посевного *Avena sativa* аккумулировать металлы и металлоиды из вещества хвостохранилищ с разными физико-химическими параметрами для фиторемедиации.

Объекты: вещество хвостохранилищ (Дюков лог, Талмовские Пески, Хову-Аксинские) и отвалов (Урской, Белоключевской, Беркульский).

Методы. Пробы корней и ростков были проанализированы на содержание широкого круга элементов методом ИСП-МС на масс-спектрометре NexION 300D (PerkinElmer, США) (ПНИЛ ГГХ ИШПР ТПУ). Отбор твердых проб выполнялся в соответствии с общепринятыми методиками. Пробы твердого вещества были проанализированы на содержание оксидов силикатной группы методом РФА на рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL-9900-XP (Thermo Electron Corporation, Switzerland) в лаборатории рентгеноспектральных методов анализа ИГМ СО РАН, элементный анализ проводился методом ИСП-МС на приборе ELAN-9000 DRC-e, Perkin Elmer, USA (ХАЦ «Плазма»).

Результаты. Проведены эксперименты с проращиванием семян однодольного растения – овса посевного (*Avena sativa*), на субстратах хвостохранилищ (Дюков лог, Талмовские Пески, Хову-Аксинские) и отвалов (Урской, Белоключевской, Беркульский), расположенных в Западной Сибири и республике Тыва. Данное растение относится к списку гостированных тестов фитотоксичности и сидератам, но его развитие на представленных техногенных объектах ранее не изучалось. Впервые показано, что в среднем концентрация металлов и металлоидов в проростках овса превышала концентрацию этих элементов во всех случаях по сравнению с контролем. Оценено влияние кислотности/щелочности техногенных субстратов на извлечение элементов растениями. Показано, что семена овса не вошли в пробах с добавлением вещества, дающего кислую среду (pH<2) либо высокую минерализацию жидкой фазы. В веществе отходов с диапазоном pH 2–5 (кислая и слабокислая среда) семена проросли, но масса проростков существенно меньше, чем в веществе с нейтральной-субщелочной средой (pH 6–8). На всхожесть не влияет соотношение алюмосиликаты/пирит, основное значение имеет наличие карбонатов и степень окисленности вещества отходов. В кислой среде, при относительно высоких концентрациях металлов (Fe, Mn, Cu, Zn) в жидкой фазе, их доля, поглощаемая растениями, была существенно ниже, чем в нейтральной-субщелочной среде. На аккумуляцию большинства элементов кислотность среды не оказывала влияния, их накопление в подземных и в наземных частях растений зависело от содержания их растворимых форм. Для мышьяка и висмута прослеживается повышение их содержания в проростках овса с повышением pH водной вытяжки. Влияние концентраций элементов в среде питания растений неоднозначно. Например, для вещества с высоким содержанием подвижных форм Cd, Pb, Zn биомасса и длина корня проростков овса была выше, чем для овса, выращенного на другом веществе. Транслокационный индекс указывает на то, что накопление большинства металлов и металлоидов выше в корнях, чем в наземных частях.

Ключевые слова:

Хвостохранилища, металлы и металлоиды, подвижные формы элементов, фиторемедиация, овес посевной (*Avena sativa*).

Введение

Фиторемедиация представляет собой эффективную, экологически чистую, недорогую технологию, в которой растения используются для уменьшения или удаления неорганических и органических загрязнителей из окружающей среды [1].

Выбор местных адаптированных видов растений важен для восстановления растительности, долгосрочной стабильности и устойчивости экосистемы. Фиторемедиация – это новая «зеленая» технология, которая использует растения и ризосферные микроорганизмы для очистки загрязненных участков. Фиторемедиация предлагает множество преимуществ, таких как низкая стоимость, общественное признание и эстетическая ценность, что делает ее востребованной для восстановления загрязненных территорий. Как правило, существует разрыв между исследованиями в лабораториях в контролируемых условиях и «реальным полевым сценарием», когда виды растений растут и выживают в загрязненной окружающей среде [2].

Основными технологиями фиторемедиации являются фитостабилизация и фитоэкстракция, ризодеградация/фитостимуляция и фитодеградация/фитотрансформация [1, 3]. Фитостабилизация – использование растений для снижения биодоступности тяжелых металлов в почве, (ii) фитоэкстракция – использование растений для извлечения и удаления тяжелых металлов из почвы, (iii) фитоволатилизация – использование растений для поглощения тяжелых металлов из почвы и выброса в атмосферу в виде летучих соединений, и (iv) фитофильтрация – использование гидропонно культивируемых растений для поглощения или адсорбции ионов тяжелых металлов из грунтовых вод и водных отходов [4, 5]. В число перспективных технологий биоремедиации входит фиторемедиация (фитоэкстракция). Механизм фиторемедиации заключается в следующем: в ходе корневого (минерального) питания растения поглощают практически все химические элементы. В процессе роста и развития растений осуществляется их транслокация в надземные органы растений. По мере приближения к старению надземная масса растений удаляется и подлежит соответствующей переработке. При этом растения следует отбирать экспериментально, исходя из поглотительной способности корней, их физиологической активности, гидротермических условий нарушенных территорий, подлежащих восстановлению. После скашивания растений надземная фитомасса может быть использована в качестве источника металлов. С этой целью растения сжигают и из золы извлекают целевые компоненты. Как технологический приём, фитоэкстракцию делят на два разных метода – индуцированную и непрерывную. Первый метод основывается на применении специальных хелатирующих агентов, образующих растворимые комплексы с металлами. В комплексном виде они довольно быстро поглощаются корнями и транспортируются в надземные органы растений. Непрерывная фитоэкстракция является более долгосрочной и базируется на приме-

нении растений-гипераккумуляторов [6]. Фиторемедиация стала эффективным и экономически выгодным методом очистки окружающей среды только после того, как обнаружили растения-гипераккумуляторы тяжелых металлов [7]. Фиторемедиация с применением растений-гипераккумуляторов является экологически чистой и экономически выгодной технологией для очистки окружающей среды [8]. Как правило, растениями-гипераккумуляторами являются те, которые способны накапливать ионы металлов $>0,1-1\%$ в пересчете на сухой вес [9]. Растения-гипераккумуляторы могут накапливать >100 мкг/г Cd, >300 мкг/г Co/Cu/Cr, >1000 мкг/г Ni/As/Pb, >3000 мкг/г Zn, >10000 мкг/г Mn при выращивании в естественной среде обитания [10].

Растения обладают способностью поглощать ионные соединения из корнеобитаемого слоя даже в низких концентрациях. Благодаря ризосферной микрофлоре происходит регулирование биодоступности тяжелых металлов, что позитивно отражается на плодородии [11, 12]. Использование фиторемедиации предполагает: 1) экономическую целесообразность, поскольку фиторемедиация представляет собой автотрофную систему, работающую от солнечной энергии, поэтому проста в управлении, а стоимость установки и обслуживания невысока; 2) экологичность и снижение воздействия загрязняющих веществ на окружающую среду; 3) доступность применения на крупномасштабных месторождениях; 4) противозерозионное действие и предупреждающее выщелачивание металлов благодаря стабилизации тяжелых металлов, что сокращает риск распространения загрязняющих веществ; 5) повышение плодородия [13–15].

Факторами, ограничивающими рост растений на отходах, являются кислотность/щелочность среды (значения pH), высокие концентрации растворимых солей As, B, Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, недостаток биогенных элементов питания, таких как N и P, низкое содержание азотфиксирующих микроорганизмов [16, 17].

Переход металлов из почвы в растения оценивается и изучается с помощью различных индексов, один из них транслокационный (ТИ). Этот индекс рассчитывается как отношение концентрации металла в растении к концентрации того же металла в почве [18]. Высокие значения ТИ (≥ 1) указывают на хорошую способность поглощения растениями металлов из корнеобитаемого слоя. Низкие значения ТИ указывают на слабое поглощение металлов корневой системой [19].

Цель исследования состояла в анализе влияния состава вещества хвостохранилищ на рост овса посевного (*Avena sativa*) для применения в фитостабилизации и/или фитоэкстракции металлов и металлоидов.

Материалы и методы

Проведены эксперименты с проращиванием семян однодольного растения – овса посевного (*Avena sativa*) – на веществе хвостохранилищ (Дюков лог, Талмовские Пески, Хову-Аксинские) и отвалов (Урской, Белоключевской, Берикольский), расположенных в Кеме-

ровской области и Республике Тыва (рис. 1). Объекты подобраны таким образом, чтобы их минералогическо-геохимические характеристики охватывали многообразие составов складированных отходов.



Рис. 1. Расположение объектов исследования

Fig. 1. Location of study objects

Хранилища отходов переработки барит-полиметаллических руд Салаирского рудного поля (г. Салаир, Кемеровская область)

Талмовские Пески – первое хвостохранилище Салаирского ГОКа – образовано в начале эксплуатации барит-полиметаллических месторождений рудного поля, когда разрабатывались верхние, наиболее богатые части рудных тел из зоны окисления. Переработка руд производилась на Золотоизвлекательной фабрике методами гравитации, цианирования и флотации. С 1932 по 1942 гг. отходы обогащения складировались в запруженное дамбой русло реки Малой Талмовой в виде ленты протяженностью 7 км и шириной ~30 м. После заполнения отходами получившегося искусственного пруда ниже по течению сооружалась следующая дамба, и процесс повторялся. В настоящее время хвостохранилище представляет собой узкую (до 30 м) ленту протяженностью около 8 км, в непосредственной близости от которой протекает река Малая Талмовая. Мощность техногенных отложений не превышает 3 м, что составляет около 1 млн т. Содержание сульфидов (пирит, сфалерит, галенит) не превышает 6–7 %, карбонаты (кальцит, доломит) составляют 9–10 %.

Хвостохранилище Дюков лог находится к юго-востоку от Салаирского рудного поля, близ жилых построек г. Салаира. Оно эксплуатировалось после заполнения Талмовских Песков. Вещество, слагающее хвостохранилище, поступало из Золотообогащительной фабрики, перерабатывающей руды зоны окисления рудного поля, и поэтому состоит из сильно измененных пород и минералов [20]. Сульфидные минералы составляют около 5 %, основной из них пирит, меньшая доля приходится на галенит и сфалерит; халькопирит встречается очень редко. Доля карбонатов – 2–3 % [21, 22]. В хвостохранилище складировано 1,5 млн т отходов.

Насыпные отвалы отходов переработки руд Урского рудного поля (пос. Урская, Кемеровская область)

Белоключевской отвал (~400 тыс. т) сформирован в результате складирования отходов цианирования руд зоны окисления одноименного месторождения. Характерной чертой отвала является переслаивание контрастных по составу горизонтов кварц-баритовой (рыжее окисленное вещество) и кварц-пиритовой сыпучки (голубовато-серое вещество). В сильноокисленной кварц-баритовой сыпучке содержание сульфидов составляет 2–4 %, а в кварц-пиритовой доходит до 25 %. Доля карбонатов в обоих горизонтах не превышает 0,5 % [23].

Урская отвал образован в 30–40-х гг. прошлого века и содержит отходы переработки зоны окисления Ново-Урского месторождения. Отходы цианирования кварц-баритовой сыпучки (самая верхняя, наиболее окисленная, часть рудных тел) и кварц-пиритовой сыпучки складировались рядом в пойме ручья в два насыпных отвала без защитных технических сооружений или дамб. В результате были сформированы насыпи высотой 10–12 м. Отвал кварц-пиритовой сыпучки в большой степени изъят в последнее десятилетие для вторичного извлечения барита. Второй, из отходов верхней части зоны окисления, остался как есть. Состав отвалов во многом аналогичен составу Белоключевского.

Бериккульский отвал (пос. Комсомольск, Кемеровская обл.)

Бериккульские кеки цианирования сульфидного флотоконцентрата являются отходами Бериккульского золотоизвлекательного завода (БЗЗ, пос. Новый Бериккуль, Тисульский район, Кемеровская область), где перерабатывались главным образом руды Старо-Бериккульского месторождения. В отвале складированы отходы цианирования флотоконцентрата, в котором содержание сульфидов доходило до 25 %.

Хову-Аксинские хранилища (пос. Хову-Аксы, Республика Тыва)

Месторождение уникальных сульфидоарсенидных никель-кобальтовых руд Хову-Аксы расположено на левобережье р. Элегест в 70 км от места впадения ее в верховья р. Енисей (Республика Тыва). Комбинат «Тувакобальт», осуществлявший отработку рудных жил этого месторождения и получение коллективного концентрата, проработал с 1970 по 1991 гг. и остановлен из-за плановой убыточности производства. В результате за 20 лет производственной деятельности на промплощадке в пяти картах захоронения складировано более 2 млн м³ хвостов гидрометаллургического передела [24].

Для проведения экспериментов отобраны пробы хвостохранилищ и отвалов. Пробы (~0,5 кг каждая) отбирались из закопшек глубиной ~20 см в пластиковые герметично закрывающиеся пакеты (грипперы).

Каждый образец высушен на воздухе, измельчен, тщательно перемешан и просеян через сито <0,25 мм.

Лабораторные анализы и эксперименты

Пробоподготовка и анализы вещества

В лабораторных условиях пробы были гомогенизированы и разделены на три части. Первая часть высушена при комнатной температуре и истерта для анализов. Из второй части приготовлены пасты (твердое/вода=2/1) для определения кислотно-основного баланса вещества [25], и в них измерены значения pH (pH/Т-метром HI 9025 С, HANNA Instruments, США) и электропроводности (УЭП) кондуктометром Cond 315 i (WTW, США). Водные вытяжки (твердое/вода=1/10) для определения концентраций подвижных форм элементов приготовлены из третьей части проб. В водных вытяжках также были измерены значения pH и УЭП. Концентрации основных ионов определялись методом капиллярного электрофореза на приборе «Капель 105-М» (Люмэкс, Санкт-Петербург). На микроэлементный состав пробы анализировались методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе Agilent 8800 (Agilent Technologies, США).

Пробы твердого вещества проанализированы на содержание оксидов силикатной группы методом РФА на рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL-9900-XP (Thermo Electron Corporation) в лаборатории рентгеноспектральных методов анализа ИГМ СО РАН, элементный анализ проводился методом ИСП-МС на приборе ELAN-9000 DRC-e, Perkin Elmer, USA (ХАЦ «Плазма»).

Эксперименты по проращиванию

Вещество отходов насыпали в чашки Петри (10 г) и покрывали бумажным фильтром, на котором размещали семена в количестве 25 штук (в пятикратной повторности), увлажнённые дистиллированной водой (~5 мл). Закрытые чашки термостатировались в течение трех суток при $t=20-25$ °С. Одновременно закладывались семена на фильтры, размещённые на поверхность пробы фоновой почвы. После трех суток прорастания семян в термостате подсчитывали долю проросших семян во всех вариантах. После семисуточной экспозиции проростков овса измеряли максимальную длину их корней и высоту ростков, их воздушно-сухую массу. Пробы корней и ростков (их сухая масса) проанализированы на содержание химических элементов методом ИСП-МС на масс-спектрометре NexION 300D (PerkinElmer, США) (ПНИЛ «Вода» ГГХ ИШПР ТПУ). Полученные результаты сопоставлены с параметрами вещества отходов, на которых проводились эксперименты с растениями.

Расчеты и коэффициенты

Для оценки поглощения растениями химических элементов использовали: транслокационный индекс (ТИ), транслокационный фактор (ТФ) и биоконцентрационный фактор (БКФ).

Перемещение металлов из корней в надземную часть оценивают с помощью ТИ, который определяется как отношение концентрации металла в надземной части растения к его концентрации в корне:

$$ТИ = \frac{C_p}{C_k}, \quad (1)$$

где C_p – содержание элемента в ростках, мг/кг сух. вес.; C_k – содержание того же элемента в корнях, мг/кг сух. вес.

Поступление химических элементов из вещества хвостохранилища в корни и надземные части овса оценивали путем изучения соответствующих коэффициентов переноса. ТФ рассчитывался путем деления концентрации металлов в растении на общее содержание металлов в корнеобитаемом слое:

$$ТФ_p = \frac{C_p}{C_{\Pi}}, \quad (2)$$

где $ТФ_p$ – транслокационный фактор для надземных частей [26]; C_p – содержание элемента в ростках, мг/кг сух. вес.; C_{Π} – содержание того же элемента в пробе вещества, г/т;

$$ТФ_k = \frac{C_k}{C_{\Pi}}, \quad (3)$$

где $ТФ_k$ – транслокационный фактор для подземных частей (корней) [27]; C_k – содержание элемента в корнях, мг/кг сух. вес.; C_{Π} – содержание того же элемента в пробе вещества, г/т.

Если значения отношений >1 , это указывает на то, что растения накапливают соответствующие элементы, отношения около 1 указывают на то, что растения не подвержены влиянию, а отношения <1 показывают, что растения исключают элементы из поглощения [28–30]. Если растения имеют высокие значения ТФ, они могут быть использованы для фиторемедиации [27, 31].

Способность аккумулировать металлы рассчитывается через БКФ:

$$БКФ = \frac{C_p}{C_{\text{ВВ}}}, \quad (4)$$

где БКФ – биоконцентрационный фактор; C_p – суммарное содержание элемента в подземных и надземных частях, мг/кг сух. вес.; $C_{\text{ВВ}}$ – содержание того же элемента в подвижной форме, в данном случае в водной вытяжке из пробы [29].

БКФ может быть рассчитан отдельно для побегов (БКФ_p) и корней (БКФ_k). Значение БКФ >1000 является критерием отнесения растения к хорошим аккумуляторам элементов.

Результаты

Характеристика вещества

Состав экспериментальных проб вещества отходов изменялся в широких пределах (табл. 1). Содержание алюмосиликатов ($\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$) колебалось в пределах 23,2–88,1 %, Fe (определяемое главным образом количеством пирита) – 2,9–31 %, CaO – 0,05–18,8 %, S_{total} – 0,4–24,6 % (рис. 2).

В соответствии с особенностями состава (кислотонейтрализующие/кислотопродуцирующие компоненты), кислотность вещества и минерализация жид-

кой фазы (в данном случае – электропроводность (УЭП) пасты) также лежат в широкой области значений (рис. 3): от ультракислых (pH 0,89) до слабощелочных (pH 8,13) с УЭП от 0,063 (минерализация водной вытяжки 0,88 г/л, ультрапресная) до 8,9 мСм/см (10,6 г/л, солоноватая).

Таблица 1. Состав проб для экспериментов SiO₂-LOI в %, Cu-Sb в г/т

Table 1. Sample composition for the experiments SiO₂-LOI in %, Cu-Sb in g/t

Компонент Component	Талмовские Пески Talmovskiy Sands		Дюков лог Dyukov Log			Белоключевской Beloklyuch		Урской Ursk		Берикольский Berikul		Хову-Аксинские хранилища Khovu-Aksy tailings				Контроль Control
	pH _{пасты} pH _{paste}															
pH _{пасты} pH _{paste}	2,47	6,95	7,63	2,27	6,64	1,18	0,89	0,64	1,79	4,95	2,12	4,55	7,63	8,04	8,13	6,87
SiO ₂	39,34	42,08	85,36	62,86	44,71	69,49	49,24	77,12	23,38	50,77	17,97	34,45	55,45	34,01	35,67	57,45
Al ₂ O ₃	12,05	3,81	2,70	15,64	2,79	2,77	1,97	4,88	0,91	16,39	5,27	7,22	13,56	7,44	9,26	14,25
Fe ₂ O ₃	8,17	4,57	2,91	4,63	4,73	4,24	15,66	7,50	17,79	11,53	31,1	7,56	6,00	7,79	7,46	7,25
MnO	0,03	0,16	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,07	0,051	<0,01	0,13	0,23	0,18	0,13
MgO	1,41	1,30	0,74	0,12	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	1,21	2,11	4,63	2,47	4,11	4,78	1,86
CaO	1,49	4,31	0,22	2,43	0,94	0,12	0,14	0,12	0,05	5,27	5,42	16,53	5,41	18,77	16,22	6,46
S _{total}	9,15	5,83	1,60	3,65	13,43	9,75	24,63	1,38	17,45	1,63	14,45	0,58	0,45	0,68	0,40	0,35
S _{sulfate}	0,62	0,01	0,007	0,71	0,0075	7,7	7,4	1,4	16,24	0,11	4,6	0,34	0,92	0,31	0,04	0,005
Na ₂ O	0,26	0,24	<0,05	0,39	0,07	<0,05	<0,05	<0,05	0,38	2,77	0,48	<0,05	1,52	<0,05	<0,05	1,18
K ₂ O	2,43	0,58	0,55	4,09	0,69	0,81	0,66	0,90	0,16	1,63	1,12	1,65	2,37	1,55	1,62	2,5
P ₂ O ₅	0,22	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,03	0,00	0,11	0,21	0,24	0,13	0,32	0,16	0,12
BaO	16,91	22,30	3,61	1,66	22,88	11,39	10,80	3,46	28,11	<0,01	0,042	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,063
TiO ₂	0,24	0,17	0,10	0,28	0,11	0,58	0,43	0,38	0,26	1,00	0,425	0,37	0,90	0,37	0,39	0,84
LOI	8,60	2,35	1,68	4,91	7,38	4,92	14,63	3,77	13,18	6,16	12,20	14,58	11,29	15,72	14,58	10
Cu	220	480	370	73	460	79	770	270	620	42	760	980	32	1000	610	19
Zn	680	7600	650	270	8400	62	110	110	320	150	330	480	90	330	210	80
Pb	3300	2400	2000	470	4500	1500	2000	1800	3100	370	4300	46	11	51	22	12
Cd	1,1	30	2,0	0,71	33	0,19	0,42	0,15	1,2	0,45	4,8	1,9	0,05	1,5	0,68	0,05
As	180	94	120	270	440	370	630	390	380	5600	8100	22000	180	14000	14000	4,5
Sb	44	37	37	30	190	400	280	130	400	29	140	88	1,4	87	88	1,2

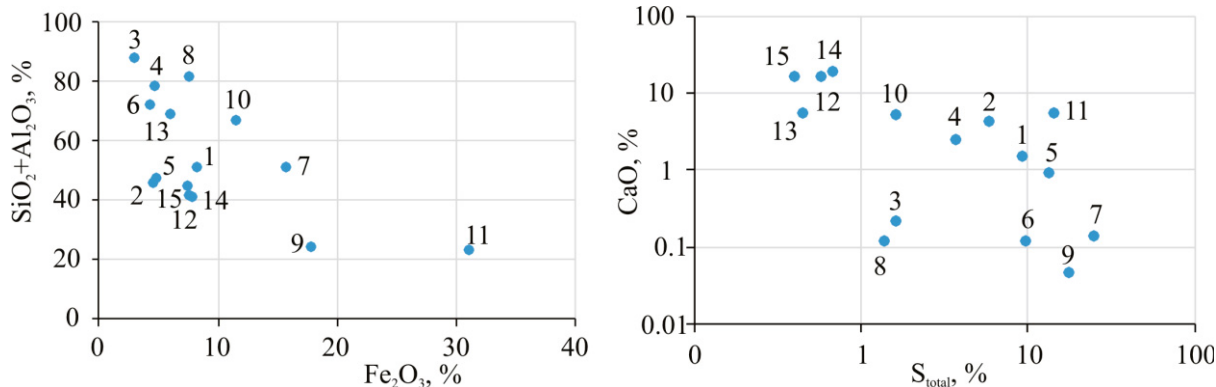


Рис. 2. Содержание некоторых оксидов и серы в пробах (здесь и далее: 1 – Талмовские Пески, окисленное вещество рыжего цвета; 2 – Талмовские пески, слабоокисленное вещество рыжевато-серого цвета; 3 – Дюков лог, желтовато-серое вещество верхнего слоя (ДЛ1-0); 4 – Дюков лог, рыжее вещество верхнего горизонта (ДЛ1-1); 5 – Дюков лог, серый песок (ДЛ2-1); 6 – Белоключевской отвал, кварц-баритовая сыпучка; 7 – Белоключевской отвал, кварц-пиритовая сыпучка; 8 – Урской отвал, кварц-баритовая сыпучка; 9 – Урской отвал, кварц-пиритовая сыпучка; 10 – Берикольский отвал, окисленный слой; 11 – Берикольский отвал рыжевато-серое вещество; 12 – Хову-Аксинские хранилища, карта 1; 13 – Хову-Аксинские хранилища, карта 1, почва; 14 – Хову-Аксинские хранилища, карта 3; 15 – Хову-Аксинские хранилища, карта 5

Fig. 2. Content of some oxides and sulfur in the samples (hereinafter: 1 – Talmovskiy Sands, oxidized tailings with red color; 2 – Talmovskiy Sands, slightly oxidized tailings with reddish-gray color; 3 – Dyukov Log, yellowish-gray tailings of the upper layer (DL1-0); 4 – Dyukov Log, red tailings of the upper horizon (DL1-1); 5 – Dyukov Log, gray sand (DL2-1); 6 – Beloklyuch waste heaps, quartz-barite tailings; 7 – Beloklyuch waste heaps, quartz-pyrite tailings; 8 – Ursk mining tailings, quartz-barite tailings; 9 – Ursk mining tailings, quartz-pyrite tailings; 10 – Berikul mine wastes, oxidized layer; 11 – Berikul mine wastes, reddish-gray tailings; 12 – Khovu-Aksy tailings, pond 1; 13 – Khovu-Aksy tailings, pond 1, soil; 14 – Khovu-Aksy tailings, pond 3; 15 – Khovu-Aksy tailings, pond 5

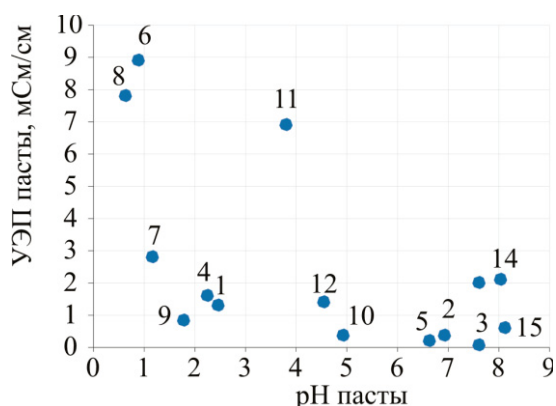


Рис. 3. Физико-химические параметры проб для экспериментов

Fig. 3. Physical and chemical parameters of samples for the experiments

Вариации в составе экспериментальных проб (концентрации основных и примесных компонентов, кислотность-щелочность, минерализация растворов) исчерпывали всё имеющееся разнообразие изучаемых отходов.

Таблица 2. Состав водных вытяжек из вещества экспериментальных проб, электропроводность УЭП в мСм/см, концентрации в мг/л

Table 2. Composition of water extracts from the substance of experimental samples, electrical conductivity (SEC) – $\mu\text{S/cm}$, concentrations – mg/l

Объект / Object Компонент / Component	Талмовские Пески / Talmovskiy Sands		Дюков лог / Dyukov Log			Белоклочевской / Beloklyuch		Урской / Ursk		Берикулский / Berikul		Хову-Аксинские хранилища / Khovu-Aksy tailings				
pH	3,26	6,42	7,38	3,16	6,32	2,82	2,95	3,56	2,83	4,76	4,51	5,05	7,89	8,28	8,15	
УЭП/SEC	877	165	28	1506	98	4290	4590	430	1759	334	3660	576	1141	476	177	
SO ₄ ²⁻	620	46	6,9	720	390	7400	1900	170	1300	110	4600	340	920	310	730	
Cl ⁻	1,6	0,49	0,35	0,61	1,9	11	0,95	0,22	0,55	0,59	2,04	1,8	2,4	3,0	0,57	
NO ₂ ⁻	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	46	0,2	0,1	16
NO ₃ ⁻	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	210	42	87	0,81
HCO ₃ ⁻	<0,1	65	52	<0,1	30	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	70	140	140	100
PO ₄ ³⁻	0,10	<0,002	0,0091	0,076	1,1	10	1,9	0,010	2,3	0,013	11	0,023	0,18	0,0071	0,0031	
NH ₄ ⁺	<0,01	<0,01	<0,01	0,15	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,05	<0,01	0,06	<0,01
Ca	101	9,9	2,88	151	2,1	46	33	10	6,1	6,12	154	86	160	8,4	5,5	
Mg	9,8	8,3	0,40	9,3	0,91	9,5	2,5	9,7	1,5	4,30	49	121	111	114	30	
Na	0,45	0,59	0,42	0,57	3,9	4,9	0,26	0,43	3,1	0,92	0,38	4,1	4,6	7,1	2,1	
K	0,062	0,62	0,25	0,95	1,3	0,17	<0,1	0,049	8,6	0,10	<0,1	4,0	1,1	4,8	2,4	
Fe	9,5	0,078	0,23	0,56	0,47	3000	520	0,70	480	11	1500	0,097	0,18	0,097	0,021	
Al	13	0,028	0,14	1,7	0,2	73	15	13	18	0,92	140	0,0031	0,0066	0,028	0,0095	
Mn	0,44	0,038	0,02	0,46	0,031	0,98	0,21	0,24	0,22	0,20	2,2	0,012	0,0033	0,018	0,012	
Si	2,7	0,34	0,77	1,2	0,89	0,22	1,2	1,2	0,34	5,7	9,0	1,1	3,7	0,53	0,97	
Cu	1,2	0,018	0,01	0,05	0,065	3,9	1,3	0,20	0,63	0,17	8,7	0,0026	0,0037	0,0062	0,0025	
Zn	16	0,52	0,07	0,78	1,0	1,7	0,73	0,47	0,96	0,25	10	0,0025	0,0033	0,0028	0,0013	
Pb	0,017	0,052	0,09	0,07	0,38	1,0	0,0037	0,0032	2,6	0,00	0,00	0,00001	0,00006	0,00003	0,00005	
Cd	0,048	0,0090	0,00	0,005	0,002	0,0035	0,0015	0,0008	0,0017	0,006	0,19	0,00003	0,00004	0,00003	0,00000	
As	0,0028	0,015	0,003	0,0016	0,053	15	1,9	0,0008	1,8	0,050	87	4,1	0,78	2,6	4,7	
Sb	0,0015	0,0032	0,0008	0,0005	0,028	0,13	0,0076	0,0006	0,047	0,001	0,012	0,21	0,0043	0,16	0,20	
Cr	0,029	0,00013	0,00021	0,00022	0,00078	0,092	0,024	0,0004	0,011	0,0017	0,37	0,00007	0,00045	0,00016	0,00053	
Co	0,0095	0,00025	0,00011	0,0050	0,00071	0,039	0,0099	0,0033	0,022	0,012	0,65	0,014	0,00084	0,0083	0,0087	
Ni	0,031	0,00061	0,00033	0,013	0,0025	0,077	0,024	0,0039	0,012	0,013	0,89	0,0049	0,0033	0,0025	0,0085	

В широких пределах изменяются концентрации элементов в вытяжках. Суммарные содержания растворимых форм металлов (Cu+Zn+Pb) и металлоидов (As+Sb), представленные на рис. 5, свидетельствуют о том, что эксперимент проведён с учётом большого разнообразия состава водной фазы и его результаты в дальнейшем могут применяться для оценки возможности рекультивации техногенных тел самого разного состава.

Вытяжки представлены растворами, которые условно можно разделить на 3 группы: 1) высокие

Общеизвестно, что обеспеченность растений элементами минерального питания зависит от кислотности среды, минерализации жидкой фазы и других условий. Повышению доступности металлов и металлоидов способствуют микроорганизмы, продуцирующие экзополисахариды и образующие с металлами хелатные комплексы, а также сидерофоры микробного происхождения, облегчающие транзит металлов через клеточные корневые оболочки внутрь растения. В растения поступают также водорастворимые формы элементов [32], и для оценки их концентраций нами были получены водные вытяжки из твердого вещества, используемого в экспериментах.

Оказалось, что состав водных вытяжек из вещества экспериментальных проб различается как по физико-химическим характеристикам, так и по концентрациям элементов (табл. 2).

По минерализации большинство проб соответствуют пресным водам ($M_{\text{общ}} < 1$ г/л), 5 – солоноватым водам ($M_{\text{общ}} 1,4–11$ г/л), рис. 4. Разброс значений pH – от 2,82 (сильнокислые воды) до 8,28 (слабощелочные воды).

(>1 мг/л) концентрации и металлов, и металлоидов; 2) высокие концентрации металлов (>0,1 мг/л), но сравнительно низкие металлоидов (<0,1 мг/л); 3) низкие концентрации металлов (<0,01 мг/л), но высокие металлоидов (первые мг/л). Это дало возможность проследить транзит элементов в растения из среды с большими колебаниями составов.

Всхожесть и рост овса посевного

Прорастание семян при наличии исследованных субстратов произошло не в каждой пробе (рис. 6).

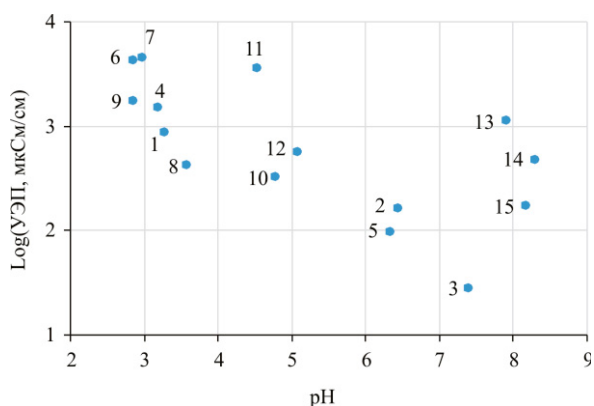


Рис. 4. Физико-химические параметры водных вытяжек из экспериментальных проб

Fig. 4. Physicochemical parameters of water leaching solution from the experimental samples

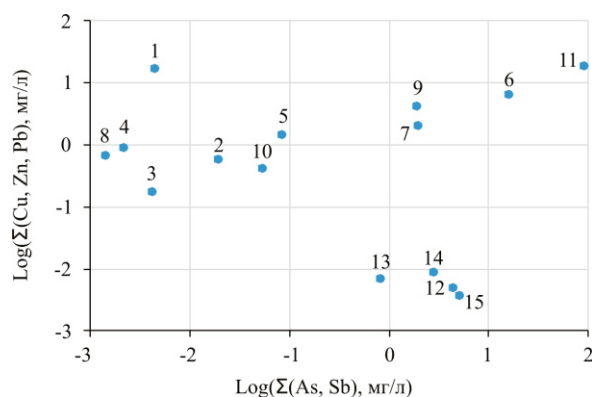
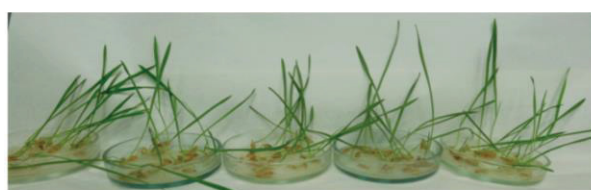
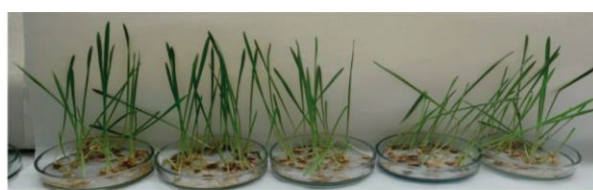


Рис. 5. Содержание металлов $\Sigma(\text{Cu, Zn, Pb})$ и металлоидов $\Sigma(\text{As, Sb})$ в водных вытяжках

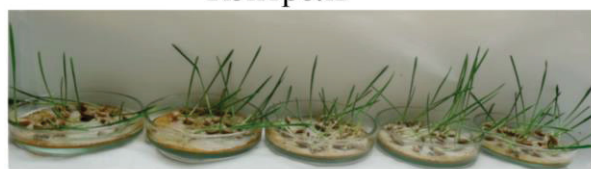
Fig. 5. Content of metals $\Sigma(\text{Cu, Zn, Pb})$ and metalloids $\Sigma(\text{As, Sb})$ in water leaching solution



Контроль



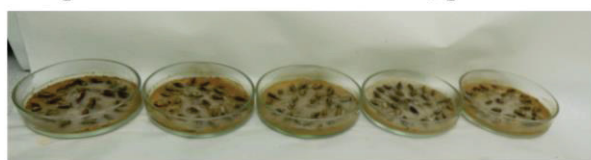
пр. 2 - Талмовские Пески, pH 6.95



пр. 1 - Талмовские Пески, pH 2.47



пр. 4 - Дюков Лог, pH 2.27



пр. 6 - Белоключевской отвал, pH 1.18



пр. 9 - Урской отвал, pH 1.79

Рис. 6. Примеры всхожести семян овса посевного на веществе с разной кислотностью и в контрольном варианте
 Fig. 6. Examples of germination of oat seeds on a substance with different acidity and in the control sample

Семена не взошли в пробах с добавлением вещества, дающего ультра-кислую среду ($\text{pH} < 2$) либо высокую минерализацию жидкой фазы. В веществе отходов с диапазоном pH 2–5 (кислая-слабокислая среда) всходы появились, но масса проростков была существенно меньше, чем в веществе с нейтральной-субщелочной средой (pH 6–8), рис 7, А. Проращивание семян овса посевного при наличии нейтрального вещества Талмовских Песков (проба 2) показало самую высокую массу проростков, за ним следуют пробы отходов с хвостохранилища Дюков лог (проба 3) и почва на поверхности карты захоронения Хову-Аксинских отходов (проба 13). Также в этих же пробах длина побегов овса оказалась больше (рис. 7, Б). Для проб с высоким содержанием Cd, Pb, Zn масса и длина корня овса были выше, чем в других случаях.

Снижение негативного действия высоких концентраций Cd в этих случаях, вероятно, обеспечивается

детоксикацией, как путём связывания металла в корневой зоне, в клеточной стенке и иммобилизации в плазмалемме, так и путём хелатирования кадмия в цитозоле клетки и его транспортирования в вакуоль [33]. Кроме этого, кадмий может повышать активность фермента О-ацетил-серинлиазы, который участвует в образовании цистеина, предшественника глутатиона и фитохелатинов – соединений клетки, связывающих тяжелые металлы. Поэтому повышение активности этого фермента при наличии кадмия рассматривается как адаптивный механизм. Что касается свинца, то он пассивно поглощается корнями, образуя в них нерастворимые комплексы, слабо перемещаемые в другие части растения. Подобное влияние Cd и Pb на массу корня кукурузы было обнаружено ранее [34]. В свою очередь, цинк в диапазоне кислотности pH 5–8 ед. наиболее доступен. В растениях цинк находится в двухвалентной форме, в то время как в корнеобитае-

мом слое – в адсорбированном виде: в кислой среде благодаря катионному обмену, в щелочной среде – благодаря хемосорбции, которая зависит от присутствия органических лигандов. Адсорбция цинка ослабляется при рН ниже 7. К этому приводит конкуренция со стороны других ионов. При повышенных рН и воз-

растении в почвенном растворе концентрации органических соединений цинк-органические комплексы вносят свой вклад в растворимость цинк-содержащих фаз. Большинство растительных генотипов и видов обладают высокой степенью приспособляемости к избыточным значениям цинка [35].

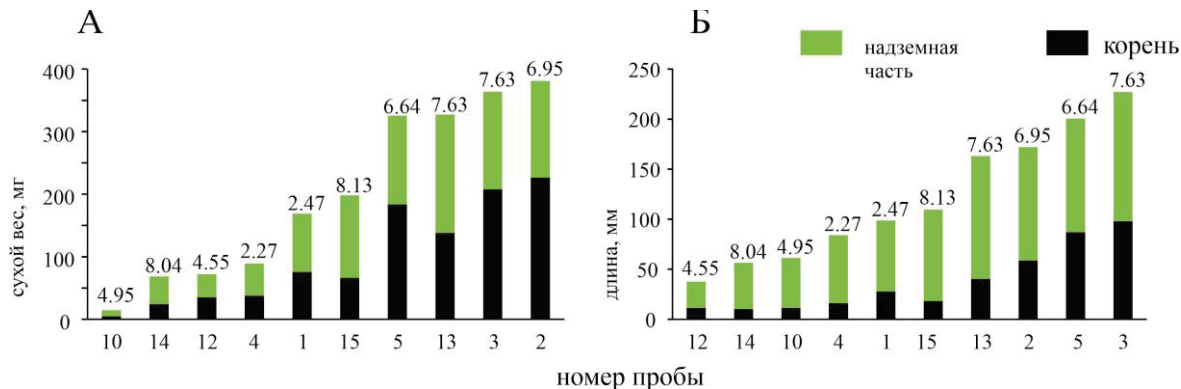


Рис. 7. Сухой вес ростков и корней овса (А), длина корней и высота ростков овса (Б), выращенного на техногенном веществе

Fig. 7. Dry weight of aerial part and roots of oats (A), length of roots and height of aerial part of oats (B) grown on the tailings

Анализ физико-химических параметров техногенного вещества позволил выявить области, соответствующие трём условиям прорастания: 1) полностью непригодные для жизнедеятельности овса (розовая, рис. 8); 2) пригодные, но угнетающие рост (желтая); 3) благоприятные для зарастания овсом и растениями, аналогичными по свойствам (зеленая).

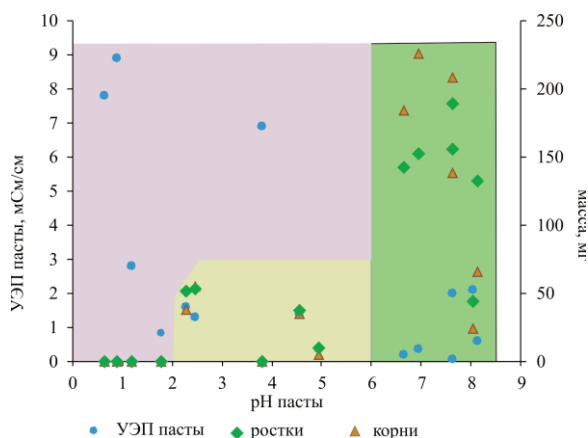


Рис. 8. Масса ростков и корней овса в зависимости от физико-химических параметров субстрата

Fig. 8. Mass of aerial part and roots of oats depending on the physicochemical parameters of the tailings

На всхожесть не влияет соотношение алюмосиликаты/пирит, основное значение имеет наличие карбонатов и степень окисленности вещества (рис. 9).

В целом в большинстве исследованных проб суммарный вес корней превышает суммарный вес ростков либо схож с ним, максимальная высота ростков больше максимальной длины корня. Наибольшие значения биомассы и морфометрических показателей овса обнаружены в пробах с нейтральной средой

(№ 2, 3, 5, 13). Среднее положение занимают пробы № 1, 4 (кислая среда), 15 (субщелочная), минимальные – в пробах № 10, 12 (кислая среда), 14 (субщелочная).

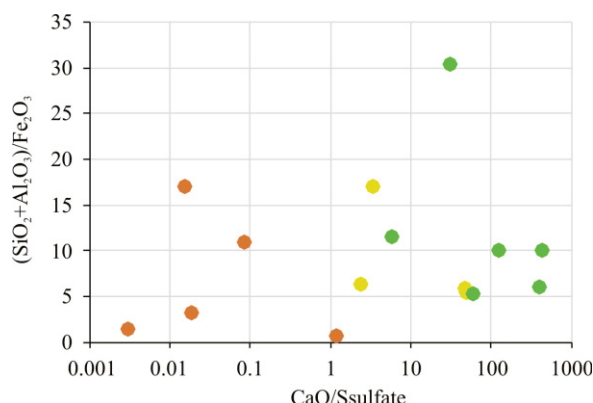


Рис. 9. Зависимость всхожести овса от состава субстрата (красный – не взошли; желтый – угнетенный рост; зеленый – благоприятные условия)

Fig. 9. Oat germination depending on the composition of the tailings (red – did not germinate; yellow – growth-inhibiting; green – favorable conditions)

Поступление элементов в растения происходило в соответствии с геохимическими особенностями субстратов – пробами вещества разного состава. Растения, выращенные на отходах полиметаллических руд, накапливали Al, Si, Mn, Fe и характерные металлы, значительная доля которых была представлена водорастворимыми формами: Cu, Zn, Ag, Cd, Pb (рис. 10). При этом наблюдалось обеднение растений некоторыми биогенными элементами: Na, K, P, S, которые, видимо, замещались поступающими из субстратов металлами и металлоидами.

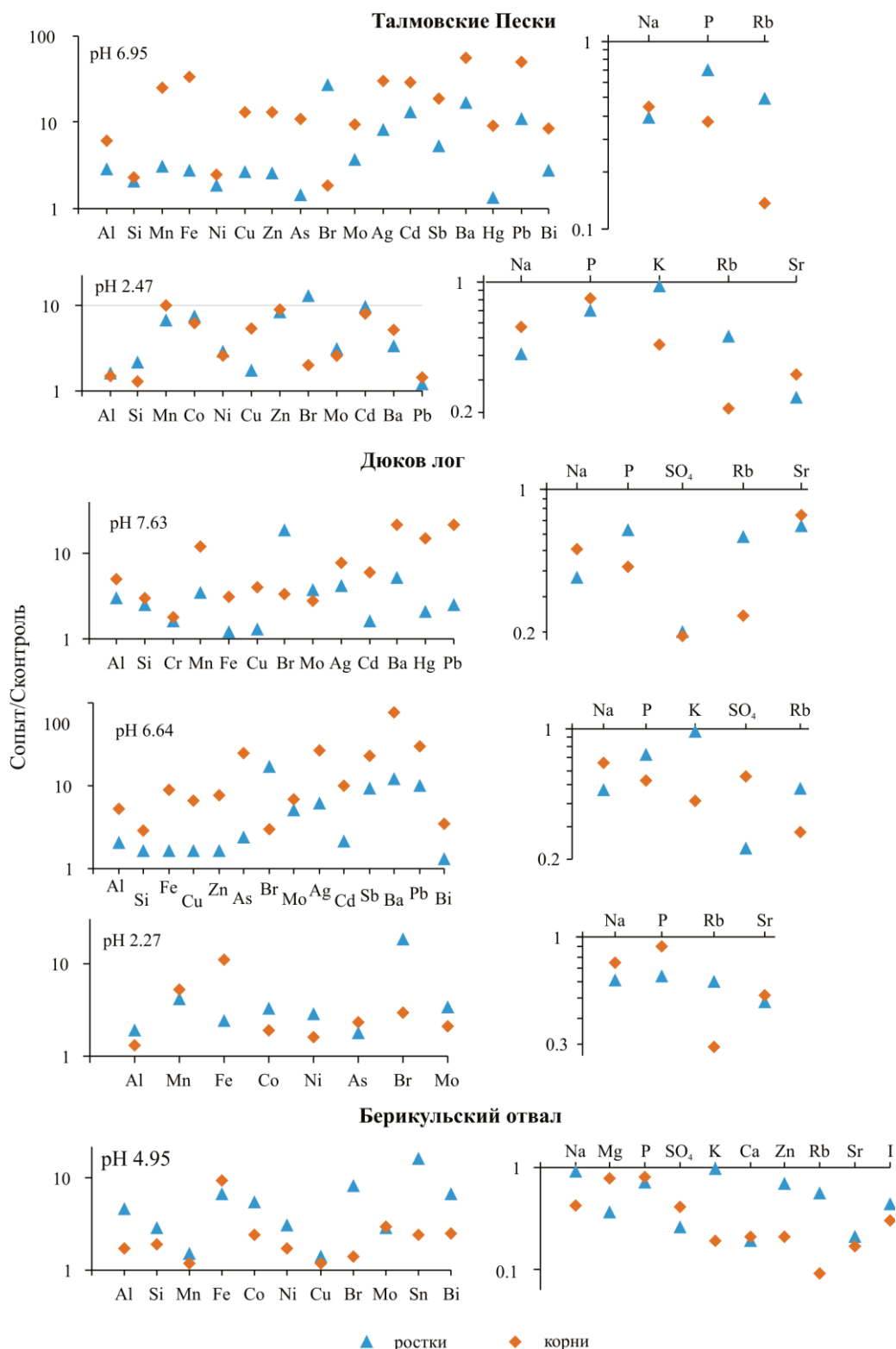


Рис. 10. Накопление/обеднение элементов в растениях, выращенных на субстрате отходов сульфидных руд
Fig. 10. Accumulation/depletion of elements in oat grown on the sulfide tailings

На веществе арсенидных Cu-Co-Ni руд (Хову-Аксинские хранилища) в растениях концентрировался главным образом As (повышение его содержания в корнях достигало 200 раз в сравнении с контролем), а также ряд элементов: Co, Ni, Mo, Bi, Na, Mg (рис. 11). Как видим, в данном случае натрий, присутствующий в подвижных формах (2–7 мг/л в водных вытяжках), в

отличие от полиметаллических отходов, активно поступает в растения. Снижение концентраций по сравнению с контролем наблюдается для P, Fe и ряда металлов, содержание которых в Хову-Аксинских отходах существенно ниже, чем в полиметаллических (Бериккульских кеках, Дюковом логу, Талмовских Песках).

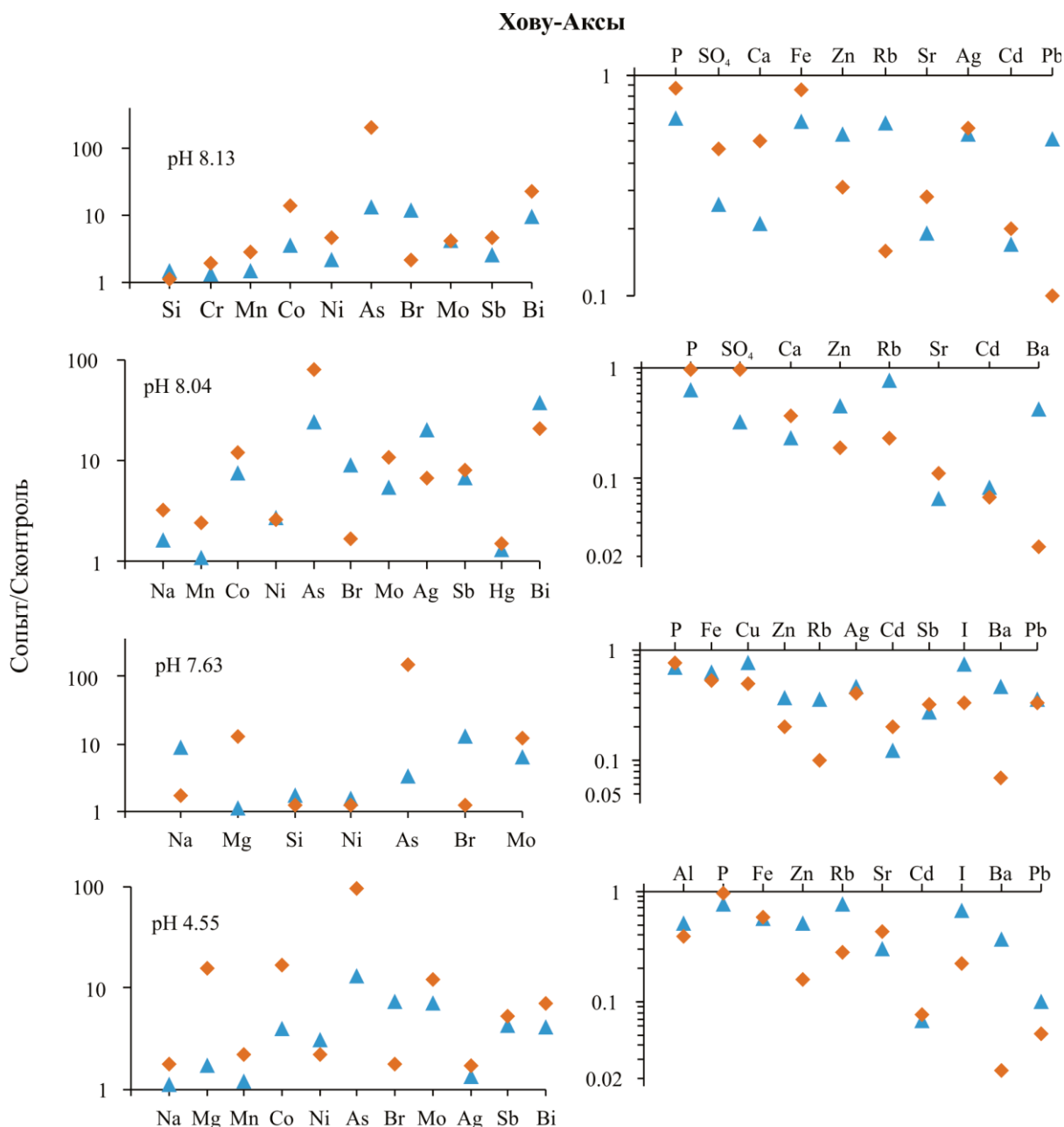


Рис. 11. Накопление/обеднение элементов в растениях, выращенных на субстрате отходов арсенидных руд
Fig. 11. Accumulation/depletion of elements in oat grown on the arsenide tailings

В кислой среде при относительно высоких концентрациях металлов (Fe, Mn, Cu, Zn) в жидкой фазе их доля, поглощаемая растениями, была существенно ниже, чем в нейтральной-субщелочной среде (рис. 12). На проникание в растения As кислотность среды не оказывала влияния: его количество как в подземных, так и в надземных частях зависело от содержания растворимых форм.

Факторы переноса и транслокации

Транслокационный индекс. В контрольных образцах ТИ (формула (1)) для обсуждаемых элементов меньше 1 и варьирует в пределах 0,2–0,7, за исключением Mo, который легко проникает в надземную часть, его ТИ=0,89. В экспериментальных пробах для ряда элементов (Sn, Zn, Ni, Mo, Hg) ТИ оказался зна-

чительно выше 1 или близок к этому значению. Наиболее высокие значения ТИ были для Sn, для остальных перечисленных элементов он заметно ниже. Однако в сравнении с ТИ контрольных проб можно увидеть, что проникание многих элементов из техногенных субстратов, кроме вышеперечисленных, в надземные части идет более интенсивно: Ag, Bi, Cd, Co, Cu, Pb, Sb, Si, Al (рис. 13). Следовательно, в некоторых случаях проявляется ослабление корневых механизмов связывания Ni, Zn, Sn, Mo, Au, Hg, что обеспечивает безбарьерный транзит металлов в надземную часть и их накопление в форме внеклеточных металл-связывающих соединений (хелаторов), или запасание в участках, нечувствительных к металлу, например, таких как вакуоли.

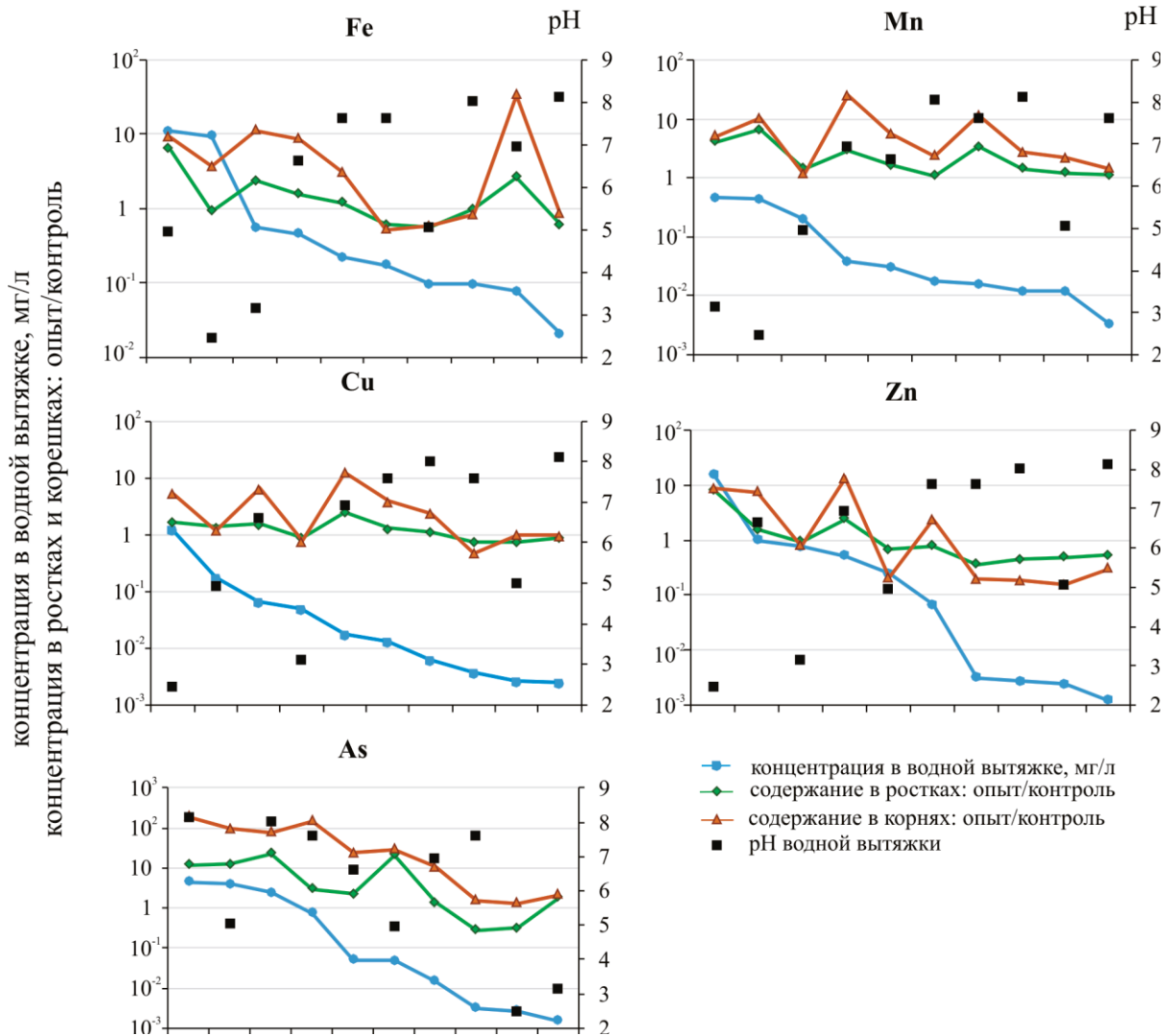


Рис. 12. Сравнение концентраций элементов в водных вытяжках экспериментальных проб и их содержания в растении (Сопыт/Сконтроль). По оси X – отдельные пробы, расположенные в порядке снижения концентраций элемента в водных вытяжках

Fig. 12. Comparison of the concentrations of elements in water extracts of experimental samples and their content in the plant (Stest/Scontrol). Along the X axis, individual samples arranged in order of decreasing concentrations of the element in water leaching solution

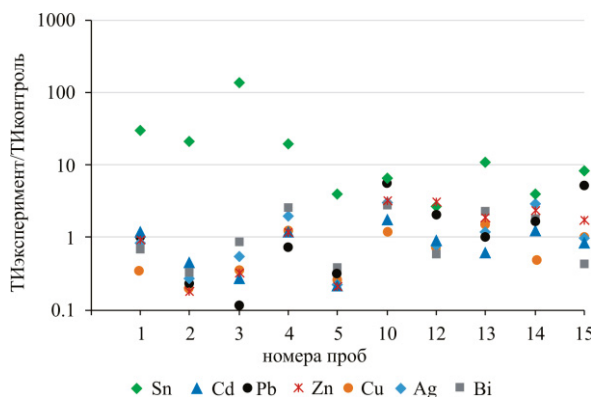


Рис. 13. Сравнение ТИ некоторых элементов в экспериментальных растениях с контрольными

Fig. 13. Comparison of translocation (TF) values of some elements in experimental oat with control ones

Транслокационный фактор. Для надземной части овса посевного минимальные значения ТФ (формула (2)) определены для породообразующих элементов, составляющих основную часть вещества: Fe, Si, Al, максимальные – для металлов Mo, Ni, Zn, Cd, Mn, Co, Ag, Cu (рис. 14). В отдельных пробах ТФ этих элементов достигает значения >1. Металлоиды Sb, As, Bi занимают промежуточную позицию. Отмечается закономерность снижения ТФ в пробах с нейтральной-субщелочной средой по сравнению с кислой-слабокислой. Например, в пробе с рН пасты=2,47 наблюдается активный перенос Cd из корнеобитаемого слоя почвы в растение, что свидетельствует об ослаблении участия корневых хелаторов овса (органических кислот, аминокислот, фенолов и др.) в связывании кадмия, а основную роль в его аккумуляции играют, по-видимому, хелатирующие соединения цитозоля, из которых ионы металла транспортируются в вакуоли.

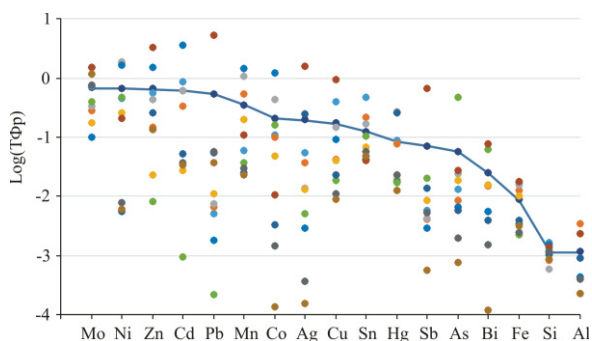


Рис. 14. Значения ТФр элементов в ростках овса. Здесь и далее: кружки разного цвета означают показатель в разных пробах; синяя линия – среднее

Fig. 14. Translocation (TF) values of elements for aerial part of oat. Hereinafter: circles of different colors mean the indicator in different samples; blue line – average

Для подземной части овса посевного значения транслокационного фактора (формула (3)) оказались выше, чем для надземных частей. Элементы Sb, Hg, Mn, Sn, Ag, Co в среднем имеют коэффициент больше 1 (рис. 15).

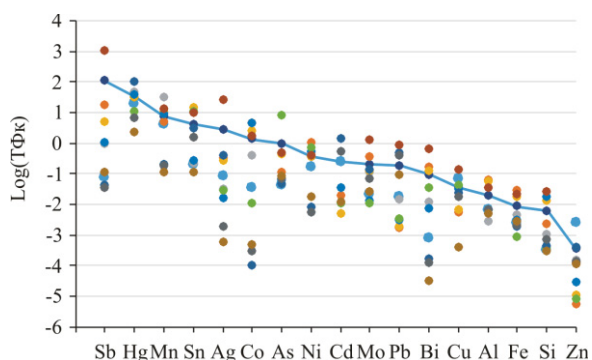


Рис. 15. Значения ТФк элементов в корнях овса

Fig. 15. Translocation (TF) values of elements for roots of oat

Биоконцентрационный фактор. Элементы Ag, Bi, Hg во всех пробах характеризуются значениями БКФ > 1000 (формула (4)), что означает их высокую аккумуляцию из водной фазы вещества с разным составом (рис. 16). Для остальных элементов в некоторых случаях относительно низкие значения БКФ (< 1000), видимо, обусловлены достижением предела их накопления в растениях из минерализованных растворов, как, например, мышьяк в Хову-Аксинских отходах, медь, цинк, алюминий, железо в Талмовских Песках и Берикольском отвале. Только для сурьмы и кремния в большинстве проб БКФ существенно ниже 1000, видимо, эти элементы извлекаются из растворов растениями в небольшой степени. Следует отметить, As, Bi, Hg, Pb, Cd не являются жизненно необходимыми для овса, как и для большинства растений. Высокие значения БКФ – это результат безбарьерного накопления элементов, характерного для фазы проростков, когда нет дифференциации надземных ча-

стей на различные органы [36]. Безбарьерный тип накопления проявляется и в заключительные фазы вегетации, а также в период зимнего покоя, когда оно сопровождается выделением избыточных количеств химических элементов.

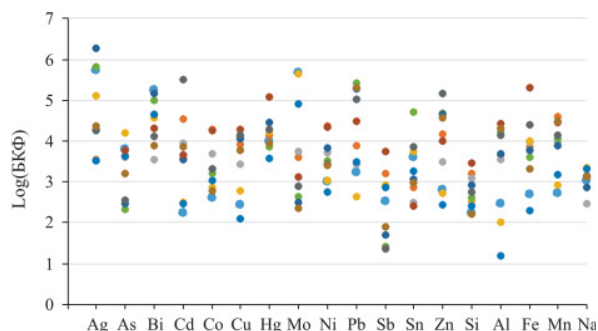


Рис. 16. Биоконцентрационный фактор элементов в эксперименте

Fig. 16. Bioconcentration factor (BCF) of elements for oat

Выводы

В результате экспериментов по проращиванию овса посевного (*Avena sativa*) на веществе отходов с широким диапазоном кислотности и концентраций химических элементов определены области физико-химических параметров и минерализации жидкой фазы, соответствующие трём условиям прорастания: 1) полностью непригодные для жизнедеятельности овса; 2) пригодные, но угнетающие рост; 3) благоприятные для зарастания овсом.

Экспериментальным путём доказано, что овёс посевной (*Avena sativa*) на ранних стадиях развития проявляет разные механизмы связывания металлов и металлоидов: корневого и цитозольного.

Высокие концентрации Cd в корнеобитаемом слое овса посевного не оказали губительного воздействия на проростки, что обусловлено, по-видимому, присутствием корневых хелаторов.

Транслокационный индекс указывает на то, что многие металлы в эксперименте аккумулировались не в корнях, а в надземных органах, поэтому овёс посевной (*Avena sativa*) можно отнести к видам-накопителям металлов.

Высокие значения БКФ для большинства элементов означают детоксикацию поллютантов с участием растения и позволяют рассматривать овёс посевной в качестве возможного участника фиторемедиации.

На аккумуляцию большинства элементов кислотность среды не оказывала влияния, их накопление в подземных и в надземных частях зависело от содержания их растворимых форм. Для мышьяка и висмута прослеживается повышение их содержания в проростках овса с повышением pH водной вытяжки.

Работа выполнена в рамках проектов ИНГГ СО РАН № 0266-2022-0028 и ИПА СО РАН № 1210311700316-9 и при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-05-00336).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pilon-Smits E., LeDuc D.L. Phytoremediation of selenium using transgenic plants // *Current Opinion in Biotechnology*. – 2009. – V. 20. – P. 207–212. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19269806/#:~:text=Owing%20to%20the%20similarity%20of,pollution%20and%20as%20fortified%20foods> (дата обращения 15.08.2022).
2. Ecological potential of plants for phytoremediation and ecorestoration of fly ash deposits and mine wastes / G. Gajić, L. Djurdjević, O. Kostić, S. Jarić, M. Mitrović, P. Pavlović // *Frontiers in Environmental Science*. – 2018. – V. 6. – P. 124. URL: https://www.researchgate.net/publication/328907776_Ecological_Potential_of_Plants_for_Phytoremediation_and_Ecorestoration_of_Fly_Ash_Deposits_and_Mine_Wastes (дата обращения 15.08.2022).
3. Raskin I., Smith R.D., Salt D.E. Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment // *Current Opinion in Biotechnology*. – 1997. – V. 8. – P. 22–26. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958166997801061> (дата обращения 15.08.2022).
4. Ernst W.H. Phytoextraction of mine wastes – options and impossibilities // *Chemie der Erde – Geochemistry*. – 2005. – V. 65. – P. 29–42. URL: https://www.researchgate.net/publication/223774756_Phytoextraction_of_Mine_Wastes_-_Options_and_Impossibilities (дата обращения 15.08.2022).
5. Marques A.P., Rangel A.O., Castro P.M. Remediation of heavy metal contaminated soils: phytoremediation as a potentially promising clean-up technology // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. – 2009. – V. 39. – P. 622–654. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10643380701798272> (дата обращения 15.08.2022).
6. Emelyanova E.V. Effect of cultivation conditions on the growth of the basidiomycete *Coriolus hirsutus* in a medium with pentose wood hydrolysate // *Process Biochemistry*. – 2005. – V. 40. – № 3–4. – P. 1119–1124. URL: https://www.researchgate.net/publication/229188403_Effects_of_cultivation_conditions_on_the_growth_of_the_basidiomycete_Coriolus_hirsutus_in_a_medium_with_pentose_wood_hydrolysate (дата обращения 15.08.2022).
7. Душенков В., Раскин И. Фиторемедиация – зеленая революция в экологии // *Химия и Жизнь* 21 век. – 1999. – № 11–12. – P. 48–49. URL: <http://www.chem.msu.ru/rus/journals/chemlife/fito.html> (дата обращения 15.08.2022).
8. Rai P.K. Heavy metals/metalloids remediation from wastewater using free floating macrophytes of a natural wetland // *Environmental Technology & Innovation*. – 2019. – V. 15. – P. 100393. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352186418306151> (дата обращения 15.08.2022).
9. Meagher R.B. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants // *Current Opinion in Plant Biology*. – 2000. – V. 3. – P. 153–162. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10712958/> (дата обращения 15.08.2022).
10. A global database for plants that hyperaccumulate metal and metalloid trace elements / R.D. Reeves, A.J. Baker, T. Jaffré, P.D. Erskine, G. Echevarria, A. van der Ent // *New Phytologist*. – 2018. – V. 218. – № 2. – P. 407–411. URL: <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/nph.14907> (дата обращения 15.08.2022).
11. Ali H., Khan E., Sajad M.A. Phytoremediation of heavy metals-concepts and applications // *Chemosphere*. – 2013. – V. 91. – P. 869–881. URL: https://www.researchgate.net/publication/235880244_Phytoremediation_of_heavy_metals-Concepts_and_applications (дата обращения 15.08.2022).
12. Heavy metal pollutions: state of the art and innovation in phytoremediation / G. DalCorso, E. Fasani, A. Manara, G. Visioli, A. Furini // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2019. – V. 20. – P. 3412. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6679171/> (дата обращения 15.08.2022).
13. Aken B.V., Correa P.A., Schnoor J.L. Phytoremediation of polychlorinated biphenyls: new trends and promises // *Environmental Science & Technology*. – 2009. – V. 44. – P. 2767–2776. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3025541/> (дата обращения 15.08.2022).
14. Wuana R.A., Okieimen F.E. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation // *Isrn Ecology*. – 2011. – P. 402647. URL: <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2011/402647/> (дата обращения 15.08.2022).
15. Biological approaches to tackle heavy metal pollution: a survey of literature / J.M. Jacob, C. Karthik, R.G. Saratale, S.S. Kumar, D. Prabakar, K. Kadirvelu // *The Journal of Environmental Management*. – 2018. – V. 217. – P. 56–70. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29597108/> (дата обращения 15.08.2022).
16. Rhizomediation potential of spontaneous grown *Typha latifolia* on fly ash basins: study from the field / V.C. Pandey, N. Singh, R.P. Singh, D.P. Singh // *Ecological Engineering*. – 2014. – V. 71. – P. 722–727.
17. Gajic G., Pavlović P. The role of vascular plants in the «phytoremediation of fly ash deposits» // *Phytoremediation: Methods, Management and Assessment* / ed. by V. Matichenkov. – New York, NY: Nova Science Publishers, Inc., 2018. – P. 151–236.
18. Study of uptake of Pb and Cd by three nutritionally important Indian vegetables grown in artificially contaminated soils of Mumbai, India / S.S. Rangnekar, S.K. Sahu, G.G. Pandit, V.B. Gaikwad // *International Research Journal of Environmental Sciences*. – 2013. – V. 2. – P. 1–5. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Study-of-Uptake-of-Pb-and-Cd-by-Three-Nutritionally-Rangnekar-Pandit/00f69bb62d87e01a814a49822654aeb043558bde> (дата обращения 15.08.2022).
19. Accumulation and translocation of nickel and cobalt in nutritionally important Indian vegetables grown in artificially contaminated soil of Mumbai, India // S.S. Rangnekar, S.K. Sahu, G.G. Pandit, V.B. Gaikwad // *Research Journal of Agricultural and Forest Sciences*. – 2013. – V. 1. – P. 15–21. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1078.3247&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения 15.08.2022).
20. Lazareva E.V. Peculiarities of mineral association in oxidized zone of polystage Salair deposit (Pb-Zn-Cu-Au-Ag) (West Siberia) // *Abstracts I CAM'96*. – Warsaw, Poland, 1996. – P. 162.
21. Mineralogical forms of precious metals in oxidized ores of the Salair mine, West Siberia, and their importance in the metallurgical treatment / S.B. Bortnikova, A.A. Airijants, E.V. Lasareva, S.B. Karlova // *Process Mineralogy XIII: Applications to Beneficiation Problems, Pyrometallurgical Products, Advanced Mineralogical Techniques and Other Industrial Problems*. – Rolla: Missouri, 1995. – P. 213–223.
22. Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Айриянц А.А. Техногенные озера. – Новосибирск: Академ. Изд-во «Гео», 2003. – 120 с. URL: https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_60747 (дата обращения 15.08.2022).
23. Mechanisms of low-temperature vapor-gas streams formation from sulfide mine waste / S. Bortnikova, N. Yurkevich, A. Devyatova, O. Saeva, O. Shuvaeva, A. Makas, M. Troshkov, N. Abrosimova, M. Kirillov, T. Korneeva, N. Kremleva, N. Fefilov, G. Shigabaeva // *Science of the Total Environment*. – 2019. – V. 647. – P. 411–419. URL: https://www.researchgate.net/publication/326807664_Mechanisms_of_low-temperature_vapor-gas_streams_formation_from_sulfide_mine_waste (дата обращения 15.08.2022).
24. Лебедев В.И. Хову-Аксынское месторождение арсенидных кобальтовых руд (Республика Тыва, Россия): новые взгляды на проблему возобновления добычи и переработки // *Геология рудных месторождений*. – 2021. – Т. 63. – № 3. – С. 236–264. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46120198> (дата обращения 15.08.2022).
25. Field and laboratory methods applicable to overburden and mine soils, US EPA 600/2-78-054 / A.A. Sobek, W.A. Schuller, J.R. Freeman, R.M. Smith. – 1978. URL: <https://nepis.epa.gov/Exec/QueryNET.exe/91017FGB.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1976+Thru+1980&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czfiles%5CIndex%20Data%5C76thru80%5CTxt%5C00000025%5C91017FGB.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeek>

- Page=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL (дата обращения 15.08.2022).
26. Transfer of heavy metals from soils to vegetables and associated human health risks at selected sites in Pakistan / U. Rehman, S. Khan, M.T. Shah, M.L. Brusseau, S.A. Khan, J. Mainhagu // *Pedosphere*. – 2018. – V. 28. – № 4. – P. 666–679. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6527332/> (дата обращения 15.08.2022).
 27. Bioaccumulation and translocation efficacy of heavy metals by *Rhizophora mucronata* from tropical mangrove ecosystem, Southeast coast of India / A. Ganeshkumar, G. Arun, S. Vinothkumar, R. Rajaram // *Ecology & Hydrobiology*. – 2019. – V. 19. – № 1. – P. 66–74. URL: https://www.researchgate.net/publication/328835165_Bioaccumulation_and_translocation_efficiency_of_heavy_metals_by_Rhizophora_mucronata_from_tropical_mangrove_ecosystem_Southeast_coast_of_India (дата обращения 15.08.2022).
 28. Trace metals in soil and leaves of *Jacaranda mimosifolia* in Tshwane area / J.O. Olowoyo, E. Van Heerden, J.L. Fischer, C. Baker // *South Africa Atmospheric Environment*. – 2010. – V. 44. – P. 1826–1830. URL: https://www.researchgate.net/publication/229421613_Trace_metals_in_soil_and_leaves_of_Jacaranda_mimosifolia_in_Tshwane_area_South_Africa (дата обращения 15.08.2022).
 29. Chandra R., Yadav S., Yadav S. Phytoextraction potential of heavy metals by native wetland plants growing on chlorolignin containing sludge of pulp and paper industry // *Journal of Ecological Engineering*. – 2017. – V. 98. – P. 134–145. URL: https://www.researchgate.net/publication/309545962_Phytoextraction_potential_of_heavy_metals_by_native_wetland_plants_growing_on_chlorolignin_containing_sludge_of_pulp_and_paper_industry (дата обращения 15.08.2022).
 30. Effects of compost and technosol amendments on metal concentrations in a mine soil planted with *Brassica Juncea* / L.R. Forján, A. Rodríguez-Vila, B. Cerqueira, E.F. Covelo // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2018. – V. 25. – P. 19713–19727. URL: https://www.researchgate.net/publication/325003592_Effects_of_compost_and_technosol_amendments_on_metal_concentrations_in_a_mine_soil_planted_with_Brassica_juncea (дата обращения 15.08.2022).
 31. Alleviation of cadmium (Cd) toxicity and minimizing its uptake in wheat (*Triticum aestivum*) by using organic carbon sources in Cd-spiked soil / M.Z. Rehman, M. Rizwan, A. Hussain, M. Saqib, S. Ali, M.I. Sohail // *Environmental Pollution*. – 2018. – V. 241. – P. 557–565. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29885626/> (дата обращения 15.08.2022).
 32. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site / J. Yoon, X. Cao, Q. Zhou, L.Q. Ma // *Science of the total environment*. – 2006. – V. 368. – № (2–3). – P. 456–464. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16600337/> (дата обращения 15.08.2022).
 33. Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. Устойчивость растений к кадмию (на примере семейства злаков). – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2012. – 55 с. URL: <http://elibrary.krc.karelia.ru/394/> (дата обращения 15.08.2022).
 34. Accumulation of Pb and Cd and its effect on Ca distribution in maize seedlings (*Zea mays L.*) / E. Małkowski, R. Kurtyka, A. Kita, W. Karcz // *Polish Journal of Environmental Studies*. – 2005. – V. 14. – № 2. – P. 203. URL: <http://www.pjoes.com/Accumulation-of-Pb-and-Cd-and-its-Effect-on-Ca-Distribution-in-Maize-Seedlings-Zea,87749,0,2.html> (дата обращения 15.08.2022).
 35. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях / Перевод с английского. – М.: Мир, 1989. – 439 с. URL: https://www.studmed.ru/kabata-pendias-a-pendias-x-mikroelementy-v-pochvah-i-rasteniyah_44c0b3dae34.html (дата обращения 15.08.2022).
 36. Ковалевский А.Л. Биогеохимия растений. – Новосибирск: Наука, 1991. – 294 с. URL: <https://www.biosoil.ru/files/publications/00015321.pdf> (дата обращения 15.08.2022).

Поступила 05.09.2022 г.

Прошла рецензирование 27.09.2022 г.

Информация об авторах

Бортникова С.Б., доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующая лабораторией геоэлектрoхимии, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Артамонова В.С., доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт почвоведения и агрохимии СО РАН.

Абросимова Н.А., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Юркевич Н.В., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Хвощевская А.А., кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующая лабораторией гидрогеохимии Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.47:550.73

RESULTS OF PHYTOREMEDIATION EXPERIMENTS WITH SOWING OATS (*AVENA SATIVA*) ON DIFFERENT TYPES OF MINE TAILINGS

Svetlana B. Bortnikova¹,
BortnikovaSB@ipgg.sbras.ru

Valentina S. Artamonova²,
artamonovavs@yandex.ru; artamonova@issa-siberia.ru

Natalya A. Abrosimova¹,
AbrosimovaSB@ipgg.sbras.ru

Nataliya V. Yurkevich¹,
YurkevichNV@ipgg.sbras.ru

Albina A. Khvachevskaya³,
unpc_voda@mail.ru

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3, Koptuyg avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

² Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 8/2, Lavrentyev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

³ National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance. The increase in concentrations of metals and metalloids in terrestrial ecosystems as a result of the activities of the mining and metallurgical industries is a serious problem for the environment – it leads to the accumulation of elements in soils, wild and agricultural plants and accompanies the pollution of food chains.

The main aim of this study is to determine and evaluate the phytoremediation ability of oats *Avena sativa* to accumulate metals and metalloids from tailings with different physicochemical parameters.

Objects of the study are the material of tailings (Dyukov Log, Talmovskiy Sands, Khovu-Aksy) and waste heaps (Ursk, Beloklyuch, Berikul).

Methods. Root and shoot samples were analyzed for the content of a wide range of elements by ICP-MS on a NexION 300D mass spectrometer (PerkinElmer, USA) (PNL «Voda» GGC ISHPR TPU). The selection of solid samples was carried out in accordance with generally accepted methods. The solid samples were analyzed for the content of oxides of the silicate group by XRF on an X-ray fluorescence spectrometer ARL-9900-XP (Thermo Electron Corporation) at the Laboratory of X-ray Spectral Analysis Methods of the Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; analysis of trace elements concentration was carried out by ICP-MS on an ELAN-9000 DRC-e instrument, Perkin Elmer, USA (HAC Plasma).

Results. Experiments were carried out with the germination of seeds of a monocotyledonous plant – oats (*Avena sativa*) on the substrates of tailings located in Western Siberia and the Republic of Tuva. This plant belongs to the list of hosted tests of phytotoxicity and green manure, but its development on the presented technogenic objects has not been studied before. It is shown for the first time that on average, the concentration of metals and metalloids in oat seedlings exceeded the concentration of these elements in all samples compared to the control. The effect of acidity/alkalinity of tailings on the extraction of elements by plants was evaluated. It was shown that oat seeds did not germinate in samples with the addition of a substance that gives an acidic environment (pH<2) or high mineralization of the liquid phase. In the tailings with a pH range of 2–5 (acidic and slightly acidic environments), the seeds germinated, but the mass of seedlings was significantly less than in the material with a neutral-subalkaline environment (pH 6–8). Germination is not affected by the ratio of aluminosilicates minerals/pyrite, the main is the presence of carbonates and the degree of oxidation. In an acidic medium, at relatively high concentrations of metals (Fe, Mn, Cu, Zn) in the liquid phase, their proportion absorbed by plants was significantly lower than in a neutral subalkaline medium. The acidity of the environment did not affect the accumulation of most elements, their accumulation in the underground and above-ground parts depended on the content of their soluble forms. For arsenic and Bi, there is an increase in their content in oat seedlings with an increase in the pH of the aqueous extract. The influence of high concentrations of elements in the plant nutrition environment is ambiguous. For example, for a substance with a high content of mobile forms of Cd, Pb, Zn, the biomass and root length of oat seedlings were higher than for oats grown on another substance. The translocation index indicates that the accumulation of most metals and metalloids is higher in the roots than in the aerial parts of oats.

Key words:

Tailings, metals and metalloids, mobile forms of elements, phytoremediation, oats (*Avena sativa*).

The work was carried out within the framework of projects no. 0266-2022-0028 of the IPGG SB RAS, no. 1210311700316-9 of the IPA SB RAS and with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (grant no. 20-05-00336).

REFERENES

- Pilon-Smiths E., LeDuc D.L. Phytoremediation of selenium using transgenic plants. *Current Opinion in Biotechnology*, 2009, vol. 20, pp. 207–212. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19269806/#:~:text=Owing%20to%20the%20similarity%20of,pollution%20and%20as%20fortified%20foods> (accessed 15 August 2022).
- Gajić G., Djurdjević L., Kostić O., Jarić S., Mitrović M., Pavlović P. Ecological potential of plants for phytoremediation and ecorestoration of fly ash deposits and mine wastes. *Frontiers in Environmental Science*, 2018, vol. 6, pp. 124. Available at: https://www.researchgate.net/publication/328907776_Ecological_Potential_of_Plants_for_Phytoremediation_and_Ecorestoration_of_Fly_Ash_Deposits_and_Mine_Wastes (accessed 15 August 2022).
- Raskin I., Smith R.D., Salt D.E. Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment. *Current Opinion in Biotechnology*, 1997, vol. 8, pp. 22–26. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958166997801061> (accessed 15 August 2022).
- Ernst W.H. Phytoextraction of mine wastes—options and impossibilities. *Chemie der Erde – Geochemistry*, 2005, vol. 65, pp. 29–42. Available at: https://www.researchgate.net/publication/223774756_Phytoextraction_of_Mine_Wastes_-_Options_and_Impossibilities (accessed 15 August 2022).
- Marques A.P., Rangel A.O., Castro P.M. Remediation of heavy metal contaminated soils: phytoremediation as a potentially promising clean-up technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2009, vol. 39, pp. 622–654. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10643380701798272> (accessed 15 August 2022).
- Emelyanova E.V. Effect of cultivation conditions on the growth of the basidiomycete *Coriolus hirsutus* in a medium with pentose wood hydrolysate. *Process Biochemistry*, 2005, vol. 40, no. 3–4, pp. 1119–1124. Available at: https://www.researchgate.net/publication/229188403_Effects_of_cultivation_conditions_on_the_growth_of_the_basidiomycete_Coriolus_hirsutus_in_a_medium_with_pentose_wood_hydrolyzate (accessed 15 August 2022).
- Dushenkov V., Raskin I. Fitoremediatsiya – zelenaya revolyutsiya v ekologii [Phytoremediation – green revolution in ecology]. *Chemistry and Life 21st century*, 1999, no. 11–12, pp. 48–49. Available at: <http://www.chem.msu.ru/rus/journals/chemlife/fito.html> (accessed 15 August 2022).
- Rai P.K. Heavy metals/metalloids remediation from wastewater using free floating macrophytes of a natural wetland. *Environmental Technology & Innovation*, 2019, vol. 15, pp. 100393. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352186418306151> (accessed 15 August 2022).
- Meagher R.B. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants. *Current Opinion in Plant Biology*, 2000, vol. 3, pp. 153–162. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10712958/> (accessed 15 August 2022).
- Reeves R.D., Baker A.J., Jaffré T., Erskine P.D., Echevarria G., Van der Ent A. A global database for plants that hyperaccumulate metal and metalloid trace elements. *New Phytologist*, 2018, vol. 218, no. 2, pp. 407–411. Available at: <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/nph.14907> (accessed 15 August 2022).
- Ali H., Khan E., Sajad M.A. Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications. *Chemosphere*, 2013, vol. 91, pp. 869–881. Available at: https://www.researchgate.net/publication/235880244_Phytoremediation_of_heavy_metals-Concepts_and_applications (accessed 15 August 2022).
- DalCorso G., Fasani E., Manara A., Visioli G., Furini A. Heavy metal pollutions: state of the art and innovation in phytoremediation. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, vol. 20, pp. 3412. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6679171/> (accessed 15 August 2022).
- Aken B.V., Correa P.A., Schnoor J.L. Phytoremediation of polychlorinated biphenyls: new trends and promises. *Environmental Science & Technology*, 2009, vol. 44, pp. 2767–2776. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3025541/> (accessed 15 August 2022).
- Wuana R.A., Okieimen F.E. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *Isrn Ecology*, 2011, pp. 402647. Available at: <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2011/402647/> (accessed 15 August 2022).
- Jacob J.M., Karthik C., Saratale R.G., Kumar S.S., Prabakar D., Kadirvelu K. Biological approaches to tackle heavy metal pollution: a survey of literature. *The Journal of Environmental Management*, 2018, vol. 217, pp. 56–70. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29597108/> (accessed 15 August 2022).
- Pandey V.C., Singh N., Singh R.P., Singh D.P. Rhizomediation potential of spontaneous grown *Typha latifolia* on fly ash basins: study from the field. *Ecological Engineering*, 2014, vol. 71, pp. 722–727.
- Gajić G., Pavlović P. The role of vascular plants in the «phytoremediation of fly ash deposits». *Phytoremediation: Methods, Management and Assessment*. Ed. by V. Matichenkov. New York, NY, Nova Science Publishers, Inc., 2018. pp. 151–236.
- Rangnekar S.S., Sahu S.K., Pandit G.G., Gaikwad V.B. Study of uptake of Pb and Cd by three nutritionally important Indian vegetables grown in artificially contaminated soils of Mumbai, India. *International Research Journal of Environmental Sciences*, 2013, vol. 2, pp. 1–5. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Study-of-Uptake-of-Pb-and-Cd-by-Three-Nutritionally-Rangnekar-Pandit/00f69bb62d87e01a814a4922654aeb043558bde> (accessed 15 August 2022).
- Rangnekar S.S., Sahu S.K., Pandit G.G., Gaikwad V.B. Accumulation and translocation of nickel and cobalt in nutritionally important Indian vegetables grown in artificially contaminated soil of Mumbai, India. *Research Journal of Agricultural and Forest Sciences*, 2013, vol. 1, pp. 15–21. Available at: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1078.3247&rep=rep1&type=pdf> (accessed 15 August 2022).
- Lazareva E.V. Peculiarities of mineral association in oxidized zone of polystage Salair deposit (Pb-Zn-Cu-Au-Ag) (West Siberia). *Abstracts I CAM'96*. Warsaw, Poland, 1996. pp. 162.
- Bortnikova S.B., Airijants A.A., Lasareva E. V., Karlova S.B. Mineralogical forms of precious metals in oxidized ores of the Salair mine, West Siberia, and their importance in the metallurgical treatment. *Process Mineralogy XIII: Applications to Beneficiation Problems, Pyrometallurgical Products, Advanced Mineralogical Techniques and Other Industrial Problems*. Rolla, Missouri, 1995. pp. 213–223.
- Bortnikova S.B., Gaskova O.L., Ayriyants A.A. *Tekhnogennye ozera* [Technogenic lakes]. Novosibirsk, Geo Academ. Publ. house, 2003. 120 p. Available at: https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_60747 (accessed 15 August 2022).
- Bortnikova S., Yurkevich N., Devyatova A., Saeva O., Shuvaeva O., Makas A., Troshkov M., Abrosimova N., Kirillov M., Korneeva T., Kremleva T., Fefilov N., Shigabaeva G. Mechanisms of low-temperature vapor-gas streams formation from sulfide mine waste. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 647, pp. 411–419. Available at: https://www.researchgate.net/publication/326807664_Mechanisms_of_low-temperature_vapor-gas_streams_formation_from_sulfide_mine_waste (accessed 15 August 2022).
- Lebedev V.I. Khovu-Aksynskoe mestorozhdenie arsenidnykh kobaltovykh rud (Respublika Tyva, Rossiya): novye vzglyady na problem vozobnovleniya dobychi i pererabotki [Khovu-Aksy deposit of arsenide cobalt ores (Tuva Republic, Russia): new views on the problem of renewal of mining and processing]. *Geology of Ore Deposits*, 2021, vol. 63, no. 3, pp. 236–264. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46120198> (accessed 15 August 2022).
- Sobek A.A., Schuller W.A., Freeman J.R., Smith R.M. *Field and laboratory methods applicable to overburden and mine soils*, US EPA 600/2-78-054. Available at: <https://nepis.epa.gov/Exec/Query/ZyNET.exe/91017FGB.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EP&Index=1976+Thru+1980&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CInd ex%20Data%5C76thru80%5CTxt%5C00000025%5C91017FGB.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%67C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL> (accessed 15 August 2022).
- Rehman U., Khan S., Shah M.T., Brusseau M.L., Khan S.A., Mainhagu J. Transfer of heavy metals from soils to vegetables and

- associated human health risks at selected sites in Pakistan. *Pe-dosphere*, 2018, vol. 28, no. 4, pp. 666–679. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6527332/> (accessed 15 August 2022).
27. Ganeshkumar A., Arun G., Vinothkumar S., Rajaram R. Bioaccumulation and translocation efficacy of heavy metals by *Rhizophora mucronata* from tropical mangrove ecosystem, Southeast coast of India. *Ecology & Hydrobiology*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 66–74. Available at: https://www.researchgate.net/publication/328835165_Bioaccumulation_and_translocation_efficacy_of_heavy_metals_by_Rhizophora_mucronata_from_tropical_mangrove_ecosystem_Southeast_coast_of_India (accessed 15 August 2022).
 28. Olowoyo J.O., Van Heerden E., Fischer J.L., Baker C. Trace metals in soil and leaves of *Jacaranda mimosifolia* in Tshwane area. *South Africa Atmospheric Environment*, 2010, vol. 44, pp. 1826–1830. Available at: https://www.researchgate.net/publication/229421613_Trace_metals_in_soil_and_leaves_of_Jacaranda_mimosifolia_in_Tshwane_area_South_Africa (accessed 15 August 2022).
 29. Chandra R., Yadav S., Yadav S. Phytoextraction potential of heavy metals by native wetland plants growing on chlorolignin containing sludge of pulp and paper industry. *Journal of Ecological Engineering*, 2017, vol. 98, pp. 134–145. Available at: https://www.researchgate.net/publication/309545962_Phytoextract_potential_of_heavy_metals_by_native_wetland_plants_growing_on_chlorolignin_containing_sludge_of_pulp_and_paper_industry (accessed 15 August 2022).
 30. Forján L.R., Rodríguez-Vila A., Cerqueira B., Covelo E.F. Effects of compost and technosol amendments on metal concentrations in a mine soil planted with *Brassica juncea*. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, vol. 25, pp. 19713–19727. Available at: https://www.researchgate.net/publication/325003592_Effects_of_compost_and_technosol_amendments_on_metal_concentrations_in_a_mine_soil_planted_with_Brassica_juncea_L (accessed 15 August 2022).
 31. Rehman M.Z., Rizwan M., Hussain A., Saqib M., Ali S., Sohail M.I. Alleviation of cadmium (Cd) toxicity and minimizing its uptake in wheat (*Triticum aestivum*) by using organic carbon sources in Cd-spiked soil. *Environmental Pollution*, 2018, vol. 241, pp. 557–565. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29885626/> (accessed 15 August 2022).
 32. Yoon J., Cao X., Zhou Q., Ma L.Q. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of the total environment*, 2006, vol. 368, no. (2–3), pp. 456–464. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16600337/> (accessed 15 August 2022).
 33. Titov A.F., Kaznina N.M., Talanova V.V. *Ustoychivost rasteny k kadmiyu (na primere semeystva zlakov)* [Plant resistance to cadmium (on the example of the cereal family)]. Petrozavodsk, Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Publ., 2012. 55 p. Available at: <http://elibrary.krc.karelia.ru/394/> (accessed 15 August 2022).
 34. Malkowski E., Kurtyka R., Kita A., Karcz W. Accumulation of Pb and Cd and its effect on Ca distribution in maize seedlings (*Zea mays L.*). *Polish Journal of Environmental Studies*, 2005, vol. 1, no. 2, pp. 203. Available at: <http://www.pjoes.com/Accumulation-of-Pb-and-Cd-and-its-Effect-on-Ca-Distribution-in-Maize-Seedlings-Zea.87749,0,2.html> (accessed 15 August 2022).
 35. Kabata-Pendias A., Pendias H. *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh* [Trace elements in soils and plants]. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1989. 439 p. Available at: https://www.studmed.ru/kabata-pendias-a-pendias-x-mikroelementy-v-pochvah-i-rasteniyah_44c0b3dae34.html (accessed 15 August 2022).
 36. Kovalevsky A.L. *Biogeokhimiya rasteny* [Biogeochemistry of plants]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1991. 294 p. Available at: <https://www.biosoil.ru/files/publications/00015321.pdf> (accessed 15 August 2022).

Received: 5 September 2022.

Reviewed: 27 September 2022.

Information about the authors

Svetlana B. Bortnikova, Dr. Sc., professor, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Valentina S. Artamonova, Dr. Sc., associate professor, leading researcher, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Natalya A. Abrosimova, Cand. Sc., researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Nataliya V. Yurkevich, Cand. Sc., leading researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Albina A. Khvachevskaya, Cand. Sc., associate professor, head of the laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University.