

УДК 57.044:(631.483+581.524.34)

ФИТОЭКСТРАКЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ТРАВЯНИСТЫМИ РАСТЕНИЯМИ НА ТЕХНОГЕННЫХ ПОЧВАХ

© *О.В. Шергина**, *Т.А. Михайлова*

*Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН,
ул. Лермонтова, 132, Иркутск, 664033 (Россия), sherolga80@mail.ru*

Цель работы – исследовать специфику естественного восстановления растительности на высокотоксичных эмбриоземах (на примере техногенного отвала крупного химического производства «Усольехимпром» в Иркутской области). Показано, что органо-аккумулятивные эмбриоземы являются первой стадией почвообразования и началом заселения травянистыми растениями. Уровень загрязнения техногенных почв тяжелыми металлами оценивался по комплексу показателей: K_c , Z_c , $Z_{c_{tox}}$. Органо-аккумулятивные эмбриоземы были отнесены к категории почв с чрезвычайно опасным уровнем загрязнения ($K_c \geq 25$; интегральный показатель Z_c равен 163.2; $Z_{c_{tox}}$ – 185.6). Обнаружено, что на этих эмбриоземах первыми поселенцами были 9 аборигенных видов травянистых растений: *Melilotus albus* Medikus., *Melilotus officinalis* (L.) Pall., *Trifolium hybridum* L., *Trifolium repens* L., *Trifolium pratense* L., *Vicia cracca* L., *Medicago sativa* L., *Sonchus arvensis* L., *Chamerion angustifolium* (L.) Scop. При изучении растений был выявлен ряд их уникальных особенностей, позволяющих произрастать в условиях очень сильного загрязнения техногенной почвы, – это высокий уровень аккумуляции тяжелых металлов в фитомассе, хорошая адаптация минерального питания к условиям произрастания, увеличение надземной биомассы к концу вегетационного периода, отсутствие визуальных признаков повреждения. Полученные результаты дают все основания рекомендовать эти травянистые растения для использования в качестве фитоэкстракторов тяжелых металлов на техногенных отвалах.

Ключевые слова: техногенный отвал, эмбриоземы, тяжелые металлы, растения-первопоселенцы, фитоэкстракция.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области (проект № 20-44-380016).

Введение

В современный период усиливается тренд значительного распространения техногенных экосистем вследствие отчуждения природных территорий при создании промышленных отвалов. Соответственно, возрастает актуальность изучения естественного восстановления природных функций территорий, трансформированных в ходе техногенеза [1]. При этом первоначальным этапом самовосстановления экосистем на промышленных отвалах следует признать формирование фитоценозов. Сложность этого процесса обусловлена тем, что техногенный отвал в большинстве случаев формируется путем непосредственного погребения естественных почв под пластами твердых отходов промышленного производства – химического, нефтехимического или другого. Это приводит к образованию в пределах отвалов техногенных почв – эмбриоземов, характеризующихся высоким уровнем загрязнения, особенно тяжелыми металлами. Поэтому для решения задачи восстановления растительности на отвалах важен поиск растений, способных не только произрастать на эмбриоземах, но и поглощать техногенные поллютанты и тем самым служить основным фактором детоксикации нарушенных земель [2, 3]. Исследования, касающиеся подходов и методов фиторемедиации загряз-

Шергина Ольга Владимировна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории природных и антропогенных экосистем, e-mail: sherolga80@mail.ru

Михайлова Татьяна Алексеевна – доктор биологических наук, заведующая лабораторией природных и антропогенных экосистем, e-mail: mikh@sifibr.irk.ru

ненных почв, проводятся довольно активно, однако среди них преобладают работы по поиску растений, способствующих очищению сельскохозяйственных почв путем поглощения и накопления техногенных поллютантов в надземной и подзем-

* Автор, с которым следует вести переписку.

ной фитомассе. При этом авторы рекомендуют использовать для восстановления почвы и запуска растительных сукцессий в основном травянистые растения [4–8].

Что касается именно естественного процесса восстановления техногенных отвалов, то он практически не изучен, возможно, потому что крупные отвалы высокотоксичного химического загрязнения считаются в этом отношении неперспективными. Вместе с тем такие исследования нужны, поскольку их результаты представляют большой научный интерес, так как дают возможность проследить особенности динамики восстановления природного фитоценоза на эмбриоземах и выявить виды растений, способных преобразовать и оздоровить сильнозагрязненную техногенную почву. Результаты таких исследований важны и для разработки рекомендаций по использованию выявленных растений в качестве фиторемедиантов для очищения техногенных почв подобного типа.

Наиболее эффективным методом очистки загрязненных почв тяжелыми металлами считается фитоэкстракция [9, 10]. Метод подразумевает поглощение растениями этих поллютантов из почвы и концентрирование их в надземных органах с последующим удалением фитомассы [11]. Биохимические механизмы аккумуляции растениями тяжелых металлов из почв до конца не выяснены, соответственно, такие исследования остаются актуальными [12]. При выборе растений для фитоэкстракции тяжелых металлов большое значение имеет не только толерантность того или иного вида к высоким концентрациям загрязнителей, но и приспособленность его к местным почвенно-климатическим условиям, а также способность к быстрому росту и активному транспорту токсикантов из корневой биомассы в надземную [13]. Поэтому подбор растений, которые бы отвечали всем этим критериям и были способны произрастать в жестких условиях техногенного загрязнения почв, является одной из важных задач биогеохимических исследований, направленных на восстановление техногенных территорий [14–17]. Исходя из изложенного, нами были предприняты исследования накопления тяжелых металлов в травянистой растительности, поселяющейся и произрастающей на высокотоксичном отвале, образованном вблизи крупного химического предприятия. В пределах этого отвала нами проводились многолетние наблюдения за появлением и сменой растительных сообществ на техногенных почвах.

Цель работы – на примере крупного отвала химического производства показать возможность и специфику естественного восстановления фитоценозов на высокотоксичных эмбриоземах, выявить травянистые растения-первопоселенцы, способные аккумулировать токсиканты (тяжелые металлы) и преобразовывать эмбриоземы, уменьшая их токсичность.

Материал и методы исследования

Исследования проведены в пределах отвала химического производства крупного предприятия «Усольехимпром» (Иркутская область), прекратившего работу в 2010 г. По данным Федерального экологического оператора – предприятия госкорпорации «Росатом», более 70% твердых промышленных отходов данного химического производства складировалось на полигонах, образуя техногенные отвалы и отстойники [18]. К настоящему моменту накоплено более 1 млрд тонн техногенных отходов, а площадь отвалов составляет более 610 га [19]. В результате на обширных территориях наблюдается деградация природных экосистем, вплоть до полного уничтожения растительных сообществ и истощения земельных ресурсов.

Конкретно нами исследовался отвал общей площадью 3.5 га (координаты местоположения: 52°17'27"N 104°14'27"E, 539 м), созданный почти 40 лет назад, на котором к настоящему времени сформировались техногенные почвы – эмбриоземы разных стадий почвообразования: инициальные (собственно техногенные поверхностные образования, представляющие собой отходы промышленного производства), органо-аккумулятивные, дерновые и гумусово-аккумулятивные. Детально исследовались органо-аккумулятивные эмбриоземы, которые являются первой стадией почвообразования и началом заселения травянистыми растениями. Для характеристики эмбриоземов в полевых условиях определяли ряд параметров их состояния – естественную влажность горизонтов с помощью влагомера (Amitari AM-128P), плотность сложения с использованием пениметра Digital Force Gauge TYD-2 и кислотность среды после увлажнения грунта (Bante PHscan 10F). Определялась также эмиссия CO₂ из органо-аккумулятивного горизонта, поскольку по этому параметру можно, хотя и косвенно, судить об активности биохимических процессов в эмбриоземе. Для измерения эмиссии CO₂ на поверхность органо-аккумулятивного горизонта устанавливались закрытые камеры объемом 5 дм³, которые подключались к газоанализаторам CO₂ и O₂ (PTH, Protmex; Smart sensor Pro AS8901), а также датчи-

кам температуры и влажности (Elitech RC-5 Data Logger GSP-6; Engbird IBS-TH1). Соотношение CO₂/O₂ измеряли в начале и в конце эксперимента с использованием пробоотборного насоса. Результаты измерений *in situ* передавались на переносной компьютер.

Первыми растениями-поселенцами на органо-аккумулятивных эмбриоземах были: *Melilotus albus* Medikus., *Melilotus officinalis* (L.) Pall., *Trifolium hybridum* L., *Trifolium repens* L., *Trifolium pratense* L., *Vicia cracca* L., *Medicago sativa* L., *Sonchus arvensis* L., *Chamerion angustifolium* (L.) Scop. Поэтому логично было определить их аккумулирующую способность по отношению к тяжелым металлам (ТМ), поступающим из почвы. Оценивалась также обеспеченность растений элементами минерального питания (азотом, фосфором, калием, магнием, кальцием, натрием), кроме того, регистрировалось изменение морфологических признаков каждого вида.

В 2020–2021 гг. в середине вегетационного периода на органо-аккумулятивном эмбриоземе техногенного отвала был произведен отбор надземной биомассы 9 видов травянистых растений в фазе цветения. Надземная биомасса срезалась на 25 учетных площадках размером 1×1 м по квадратно-конвертному принципу [20]. В пределах этих же учетных площадок производился линейный отбор образцов почвы из верхних органо-аккумулятивных (0–5 см) и нижних минеральных (5–20, 20–30, 30–40, 40–50 см) горизонтов. В соответствии с классификацией и диагностикой техногенных почв, проводилось их морфологическое описание [21, 22]. Фоновые (эталонные) образцы растений и почв (тип серая лесная) были отобраны в естественном сосново-березовом лесу, расположенном в 40 км от промышленной зоны и не подпадающим под перенос промышленных эмиссий (координаты места отбора: 52°38'37"N 103°14'51"E, 592 м).

В лабораторных условиях растительные образцы тщательно промывали от пылеватых частиц техногенного отвала дистиллированной водой, после чего высушивали до воздушно-сухого состояния и измельчали до порошкообразной массы. Химический анализ биогенных элементов в растительных образцах проводили согласно общепринятым методам [23, 24]. Почвенные образцы также высушивали на воздухе и измельчали с помощью дробильной мельницы. Показатели почв, характеризующие гумусообразовательный процесс и питательный режим, изучались согласно отечественным и международным методикам [25–27]. Исследование накопления ТМ в растениях проводилось после сухого озоления материала в муфельной печи при температуре 450 °С и его растворении в концентрированной HCl, в почвах – с использованием 1 М солянокислой вытяжки. Для аналитических измерений использовались спектрофотометры AAS Vario 6 и Spectrum One FT-IR приборного парка Байкальского аналитического центра коллективного пользования ИЦ СО РАН и сертифицированные методики.

Для оценки уровня накопления ТМ в почвах и растениях рассчитывали коэффициент концентрации (K_c) – отношение содержания токсикантов в исследуемом объекте к их фоновому содержанию [28]. Поскольку при загрязнении почв и растений отмечается высокое содержание многих ТМ, был рассчитан суммарный показатель их концентраций (Z_c), характеризующий интегральное техногенное загрязнение:

$$Z_c = \sum K_c - (n-1),$$

где n – число определяемых элементов. Кроме того, при расчетах суммарного показателя загрязнения вводились соответствующие поправки на токсичность [29]. Это было сделано исходя из того, что степень токсичности (опасности) тяжелых элементов различна, следовательно, при одинаковых значениях концентрации суммарное загрязнение будет опаснее, если в почвах и растениях накапливается больше элементов I класса опасности, чем II и III класса опасности. Формула расчета суммарного показателя загрязнения с поправкой на класс токсичности, имела следующий вид:

$$Z_{c_{tox}} = \sum (K_c \times K_{tox}) - (n-1),$$

где K_{tox} – коэффициент токсичности ТМ, значения которого для ТМ I класса составляли 1.5, для II класса – 1.0 для III класса – 0.5 [30].

Для надземной биомассы травянистых растений накопление ТМ также оценивалось по значениям K_c, Z_c, Z_{c_{tox}}. Кроме того, исследовалась миграционная способность ТМ из почв в надземную биомассу травянистых растений, для чего вычисляли коэффициент биологического накопления (КБН), его расчет выполнялся по формуле: КБН=A/B, где A – содержание ТМ в золе растений, B – содержание ТМ в почвенной вытяжке

[31]. Для оценки общей аккумулярующей способности растений к ряду ТМ производился расчет средних значений КБН формуле

$$\text{КБН}_{\text{avg}} = \Sigma \text{КБН} / n,$$

где n – число определяемых ТМ.

Для статистической обработки полученных данных использовали компьютерные программы «Среда статистических вычислений R», версия 3.1.1, 2014 [32]. Рассчитывали: коэффициент линейной корреляции Пирсона, коэффициент детерминации функциональной зависимости между показателями, значимость отличий полученных данных от контроля по t -критерию Стьюдента [33].

Результаты и обсуждение

Физико-химические и токсикологические показатели эмбриоземов. В ходе исследований установлено, что на территории промышленного отвала «Усольехимпром» техногенные почвы распределены весьма мозаично. В центре отвала преобладают инициальные эмбриоземы, тогда как ближе к периферической части гумусированность почв постепенно увеличивается и развитие получают дерновые и гумусово-аккумулятивные эмбриоземы. Такое распределение почв в первую очередь обусловлено тем, что отвал имеет форму выпуклой насыпи, выступающей над поверхностью и подверженной интенсивной ветровой и водной эрозии. Это приводит к тому, что атмосферная влага не способна задерживаться в центре отвала, соответственно, там отсутствуют необходимые гидрологический и микробиологический режимы. Однако поскольку процесс формирования эмбриоземов протекал довольно продолжительное время при отсутствии антропогенного вмешательства, почвы находились и находятся в данное время в процессе постоянного саморазвития.

К настоящему моменту доля инициальных эмбриоземов, для которых характерно отсутствие каких-либо органогенных горизонтов, составляет 5% от общей площади отвала; органо-аккумулятивных, где обнаруживается органическая подстилка – 25%; дерновых с хорошо сформированным органо-аккумулятивным горизонтом – 40%; гумусово-аккумулятивных, для которых характерно наличие структурированной гумусированной толщи – 30%. На стадии естественно сформированных органо-аккумулятивных эмбриоземов появляются первые виды травянистых растений, способные выживать в условиях высокого техногенного загрязнения. Для оценки условий произрастания растений были исследованы физические и химические показатели этих эмбриоземов. Полевое определение структуры сложения органо-аккумулятивных эмбриоземов показало, что в их составе преобладают пылеватые (<0.5 см) и мелкокомковатые (от 0.5 до 1 см) частицы техногенного мелкозема. Обнаружена высокая испаряемость с их поверхности, низкая влажность, в летний период составляющая 12–16%. Такие показатели структурного состояния свидетельствуют об очень низкой устойчивости органо-аккумулятивных эмбриоземов к ветровой эрозии. Поэтому закрепление почвенных агрегатов с помощью корневой системы растений является одним из важных моментов в генезисе этих почв.

При определении кислотно-щелочных условий была обнаружена высокая щелочность горизонтов – актуальная кислотность ($\text{pH}_{\text{водн.}}$) составляла 10–12 ед. Такие значения свидетельствуют о наличии сильнощелочных компонентов в составе техногенного грунта. По материалам госкорпорации «Росатом», отвалы образованы техногенным шламом, компонентами которого являются сульфат кальция (преимущественно в виде гипса), известковая и доломитовая крошка, оксиды и гидроксиды железа и алюминия, а также соединения ТМ различной степени растворимости [18]. Несмотря на очень высокую щелочность эмбриоземов, в их верхнем органическом горизонте наблюдается повышенная активность биохимических процессов. Об этом свидетельствуют наши данные о высоком уровне эмиссии CO_2 с поверхности этих почв. Нами зарегистрированы высокие значения поступления углекислого газа из этих эмбриоземов в атмосферный воздух, составляющие 2.5–3.2 г/м²/сут. На фоновых территориях эмиссия CO_2 находилась в пределах 0.8–1.0 г/м²/сут. Полученные данные о скорости продуцирования углекислоты могут указывать как на высокую минерализацию органического вещества, так и на физико-химическое преобразование карбонатов, входящих в состав отвалов. Установлено также, что интенсивность эмиссии O_2 с поверхности эмбриоземов в 2.4–3.3 раза ниже значений для почв фоновых территорий, что, по-видимому, связано с нарушением водно-физических свойств почв и более интенсивным биологическим окислением органического вещества.

Проведенное затем определение содержания гумуса (4.1–5.4%), общего азота (0.43–0.56) и их соотношения C/N показало наличие довольно активных гумификационных процессов, что подтверждается и при определении содержания элементов минерального питания (в мг/кг) и их соотношений. Так, рассчитанное соотношение N : P : K составляет для органо-аккумулятивных эмбриоземов 70 : 80 : 110 и характеризует почвы как среднеобеспеченные этими биогенными элементами.

Оценка загрязнения техногенных почв ТМ была выполнена по комплексу показателей: Кс, Zc, Zc_{тох.}, которые рассчитывались как относительно региональных фоновых значений, так и с учетом шкалы классов опасности элементов (ГОСТ 17.4.102-83). Использование методических указаний (МУ.4266-87; МУ 2.1.7.730-99) и экологических рекомендаций [28, 34] позволило отнести органо-аккумулятивные эмбриоземы к категории почв с чрезвычайно опасным уровнем загрязнения. Для этих почв максимальные значения Кс ТМ ≥ 25; интегральный показатель Zc равен 163.2; Zc_{тох.} – 185.6. При этом содержание ТМ 1–3 класса опасности в эмбриоземах достигает очень высоких значений (табл. 1).

Вместе с тем нами показано, что даже при таких высоких концентрациях ТМ в эмбриоземах существуют механизмы, которые снижают миграционную способность токсикантов в почвенной толще. Среди этих механизмов – процесс хемосорбции загрязняющих элементов в составе комплексных соединений с гумусовыми кислотами с образованием таких соединений, как K₂[Zn(OH)₄], K₂[Pb(OH)₄], Na₂[Cu(OH)₄], Na₂[Pb(OH)₄], Na₂[Cd(OH)₄] и других. Соответственно, определенное количество ТМ остается в почве в связанном состоянии в составе химических комплексов, что снижает их поступление в корневые системы растений. Кроме того, высокая щелочность эмбриоземов способствует повышенной адсорбции растворимых форм ТМ минеральной илистой фракцией почв, что также уменьшает их доступность для растений. Однако, эти барьеры не могут полностью ограничить поступление ТМ в растения вследствие чрезвычайно высокого уровня загрязнения органо-аккумулятивных эмбриоземов.

Накопление ТМ в надземной биомассе травянистых растений, параметры их минерального питания, морфологические признаки. Разнообразие растительного сообщества на техногенных почвах, в частности, на органо-аккумулятивном эмбриоземе, представлено девятью аборигенными видами: *Melilotus albus* Medikus., *Melilotus officinalis* (L.) Pall., *Trifolium hybridum* L., *Trifolium repens* L., *Trifolium pratense* L., *Vicia cracca* L., *Medicago sativa* L., *Sonchus arvensis* L., *Chamerion angustifolium* (L.) Scop. При этом каждый из видов создает значительное по площади проективное покрытие и, что важно, растения не имеют внешних признаков повреждения, например, хлорозов и некрозов листьев.

Таблица 1. Значения коэффициентов концентрации тяжелых металлов I, II, III класса опасности в органо-аккумулятивных эмбриоземах

Тяжелые металлы	Класс опасности	Коэффициент токсичности (K _{тох.})	Коэффициент концентрации (K _с)
Cr	I	1.5	17.5
Pb	I	1.5	10.3
Zn	I	1.5	9.8
Cd	I	1.5	8.5
Hg	I	1.5	8.3
Se	I	1.5	6.9
As	I	1.5	5.8
Th	II	1.0	19.7
Mo	II	1.0	19.3
Cu	II	1.0	18.9
Ni	II	1.0	18.7
Co	II	1.0	9.2
Sb	II	1.0	5.2
Sr	III	0.5	25.3
Mn	III	0.5	20.5
Ba	III	0.5	8.3
La	III	0.5	7.6
V	III	0.5	4.9
W	III	0.5	3.7
Bi	III	0.5	2.9

При количественном определении ТМ в надземной биомассе растений были выявлены высокие их концентрации. Так, максимальные значения Кс обнаруживаются для Sr (22.5), Mn (19.9), Th (19.3), Mo (18.7), Cu (18.3), Ni (18.0). Содержание ТМ I класса опасности также значительно превышены в надземной биомассе растений (табл. 2). Эти данные указывают на выраженную способность исследованных видов травянистых растений к аккумулярованию ТМ из техногенных почв. Наиболее высокие значения Кс ТМ I класса опасности обнаружены для трех видов клевера, двух видов донника и для осота полевого. Другие виды характеризуются несколько меньшими значениями аккумуляции токсикантов, исходя из чего можно говорить об определенной видоспецифичности в аккумуляции металлов надземной биомассой растений.

Были рассчитаны коэффициенты Z_c и $Z_{c_{tox}}$ для всего проанализированного ряда ТМ I – III классов опасности (20 элементов) и установлено, что для всех этих элементов характерен значительный уровень аккумуляции в исследованных травянистых растениях (рис. 1). Например, в надземной биомассе *Trifolium hybridum* L., *Trifolium pratense* L., *Sonchus arvensis* L., *Melilotus officinalis* (L.) Pall. и *Melilotus albus* Medikus. обнаружены самые высокие значения суммарных коэффициентов загрязнения: $Z_c \geq 115 \pm 6.5$; $Z_{c_{tox}} \geq 132 \pm 7.6$. Судя по полученным данным, можно утверждать, что исследованные растения обладают высокой аккумулярующей способностью к ТМ при полиэлементном техногенном загрязнении почв. Чтобы показать значимость растений как фитоэкстракторов ТМ из загрязненных почв, были вычислены также и коэффициенты биологического накопления (КБН), на основании которых можно судить об интенсивности поступления (миграции) ТМ из почв в органы растений. Величина КБН варьирует от 0 до 1.0 [35]. Чем выше значение КБН, тем активнее поступает тот или иной ТМ в надземную биомассу. Для органо-аккумулятивного эмбриозема с полиэлементным загрязнением нами был рассчитан $K_{BN_{avg}}$. Выявлено, что для большинства видов исследованных растений средние значения $K_{BN_{avg}}$ ТМ составляют 0.8–0.9. Исключение составляют: *Chamerion angustifolium* (L.) Scop., *Medicago sativa* L. и *Vicia cracca* L., для которых $K_{BN_{avg}}$ составляет 0.6–0.7. Таким образом, полученные данные указывают на высокую экстрагирующую способность травянистых растений по отношению к ТМ.

Помимо исследования аккумулярующей способности растений по отношению к ТМ немаловажно было оценить состояние их надземной биомассы по таким параметрам, как содержание элементов-биогенов, изменение морфологических признаков. Уже при визуальном обследовании травянистых растений, произрастающих на эмбриоземе, обращало на себя внимание увеличение ряда морфологических параметров в сравнении с фоновыми образцами. Например, для растений рода *Trifolium* возрастали: площадь листьев – на 35–45%, высота растений – на 60–70%, объем фотосинтезирующей фитомассы – на 65–70%, сухая масса отдельных экземпляров – на 70–80%. Было предположено, что одним из факторов интенсивности роста растений послужило увеличение содержания N, P, K в надземной биомассе. Это нашло подтверждение при проведении корреляционного анализа между данными о содержании в отдельных видах растений N, P, K (в мг/кг) и весовыми значениями их сухой биомассы (в граммах), при этом был выявлен высокий уровень коэффициентов корреляции ($r=0.87-0.94$).

Питательный режим почв определяется, главным образом, содержанием в них гумуса, азота и соотношением C/N [36]. В наших исследованиях установлена прямая связь между уровнем гумуса, соотношением C/N, с одной стороны, и содержанием N, P, K в тканях растений – с другой ($r=0.78-0.82$). Этим подтверждается, что основным источником минерального питания растений на техногенных почвах является органо-аккумулятивный горизонт эмбриозема. Кроме того, обнаружено, что легкорастворимые соли кальция, магния и натрия, содержащиеся в почвенном растворе эмбриоземов, легко поступают в надземную биомассу растений и накапливаются в ней. По полученным данным было рассчитано процентное увеличение долей элементов-биогенов (азота, фосфора, калия, магния, кальция, натрия) в надземной биомассе травянистых растений, произрастающих на органо-аккумулятивном эмбриоземе, в сравнении с фоновыми растениями (рис. 2). Судя по этим данным, в элементном составе надземной биомассы исследованных видов имеют место изменения в сторону увеличения содержания элементов. Так, уровень кальция повышается в среднем на 18%, азота – на 16%, натрия – на 14%, магния – на 8%, калия – на 5%, фосфора – на 4%. По-видимому, можно говорить о достаточной обеспеченности растений элементами минерального питания.

Таким образом, исследованные травянистые растения, произрастающие на сильнозагрязненном эмбриоземе, обладают рядом особенностей, включая высокую аккумуляцию тяжелых металлов, адаптацию минерального питания к условиям произрастания, отсутствие визуальных признаков повреждения, что дает основание рекомендовать их для использования в качестве фитоэкстракторов ТМ на техногенных отвалах.

Таблица 2. Значения коэффициентов концентрации (Кс) тяжелых металлов I класса опасности в надземной биомассе травянистых растений

Название вида	Кс Cr	Кс Pb	Кс Zn	Кс Cd	Кс Hg	Кс Se	Кс As
<i>Melilotus albus</i>	10.2	8.7	11.2	7.0	5.3	4.8	9.3
<i>Melilotus officinalis</i>	11.2	8.9	11.6	7.2	5.6	5.0	9.6
<i>Trifolium hybridum</i>	15.5	9.5	13.6	7.5	7.6	6.3	9.4
<i>Trifolium repens</i>	11.5	8.8	12.1	7.3	6.8	5.6	8.3
<i>Trifolium pratense</i>	14.1	7.6	13.1	6.5	6.9	5.3	8.7
<i>Vicia cracca</i>	10.6	7.2	9.7	5.0	5.8	6.2	8.2
<i>Medicago sativa</i>	12.1	7.5	10.5	4.7	5.2	5.4	9.5
<i>Sonchus arvensis</i>	13.7	9.1	14.5	7.8	5.8	6.0	9.8
<i>Chamerion angustifolium</i>	10.1	6.9	8.6	4.5	4.8	4.8	8.0

Рис. 1. Коэффициенты концентрации ТМ в надземной биомассе травянистых растений, произрастающих на органо-аккумулятивном эмбриоземе

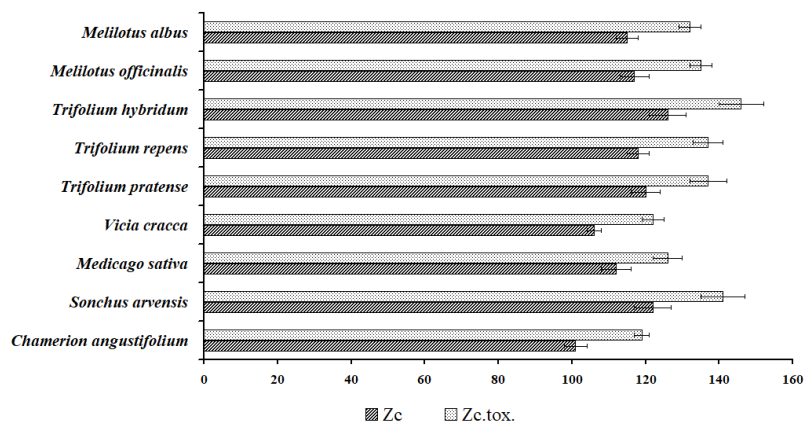
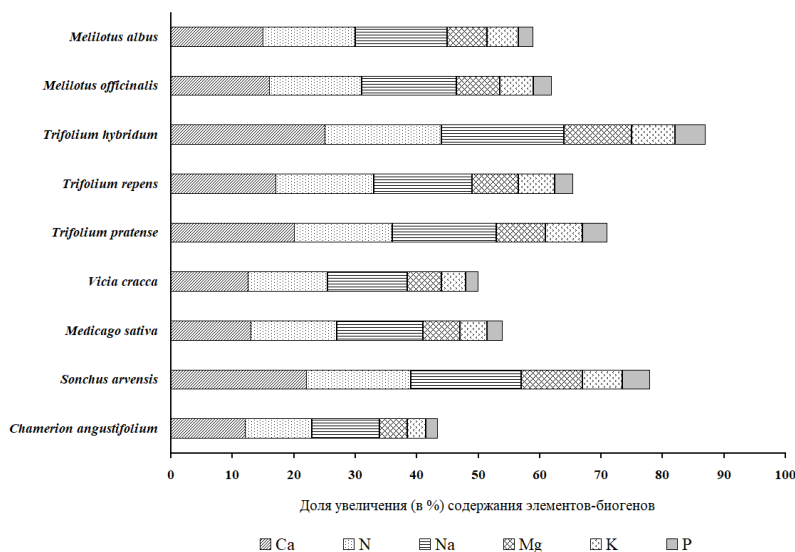


Рис. 2. Увеличение содержания (в %) элементов-биогенов в надземной биомассе растений, произрастающих на органо-аккумулятивном эмбриоземе, в сравнении с фоновыми растениями



Заключение

Показана возможность и специфика естественного восстановления растительности на техногенных отвалах химического производства. Установлено, что первые виды травянистых растений, способные выживать в условиях высокого техногенного загрязнения, появляются на стадии естественно сформированных органо-аккумулятивных эмбриоземов. Видами-первопоселенцами были: *Melilotus albus* Medikus., *Melilotus officinalis* (L.) Pall., *Trifolium hybridum* L., *Trifolium repens* L., *Trifolium pratense* L., *Vicia cracca* L., *Medicago sativa* L., *Sonchus arvensis* L., *Chamerion angustifolium* (L.) Scop. Выявлено, что эти растения проявляли ряд специфических особенностей, что дает основание рекомендовать их для использования в качестве фитоэкстракторов тяжелых металлов на техногенных отвалах. Помимо высокого аккумуляирования тяжелых металлов в фитомассе, эти виды характеризовались отсутствием визуальных признаков повреждения, хорошей

адаптацией минерального питания к условиям произрастания, увеличением надземной биомассы к концу вегетационного периода. Поскольку метод фитоэкстракции предполагает очищение техногенных почв путем скашивания надземной биомассы растений с накопленными в ней токсикантами, исследованные травянистые растения вполне соответствуют использованию их в этих целях.

Список литературы

1. Андроханов В.А., Курачев В.М. Почвенно-экологическое состояние техногенных ландшафтов: динамика и оценка. Новосибирск, 2010. 224 с.
2. Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment. New York, 2000. 304 p.
3. Macnair M.R. The hyperaccumulation of metals by plants // *Adv. Bot. Res.* 2003. Vol. 40. Pp. 63–105. DOI: 10.1016/S0065-2296(05)40002-6.
4. Линдиман А.В., Шведова Л.В., Тукумова Н.В., Невский А.В. Фиторемедиация почв, содержащих тяжелые металлы // *Экология и промышленность России.* 2008. №9. С. 45–47.
5. Левкин Н.Д., Мухина Н.Е. Фиторемедиация почв, загрязненных тяжелыми металлами // *Известия ТулГУ. Науки о земле.* 2012. Вып. 1. С. 9–14.
6. Гул К., Турметова Г.Ж., Убайдуллаева А.К., Бабаева Г.А. Применение метода фитоэкстракции для очистки загрязненных тяжелыми металлами почв // *Manas Journal of Agriculture and Life Science.* 2015. Vol. 5. N1. Pp. 87–91.
7. Высоцкий С.П., Фрунзе О.В. Фиторемедиация загрязненных тяжелыми металлами почв с помощью злаков // *Вестник Академии гражданской защиты.* 2019. Т. 3. №19. С. 117–123.
8. Бекузарова С.А., Ханиева И.М., Азубеков Л.Х. Фиторемедиация токсических почв // *Успехи современного естествознания.* 2018. №12. С. 345–352.
9. Verbruggen N., Hermans C., Schat H. Molecular mechanisms of metal hyperaccumulation in plants // *New Phytol.* 2009. Vol. 181. Pp. 759–776. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2008.02748.x.
10. Kramer U. Metal hyperaccumulation in plants // *Annu. Rev. Plant Biol.* 2010. Vol. 61. Pp. 517–534. DOI: 10.1146/annurev-arplant-042809-112156.
11. Копчик Г.Н. Проблемы и перспективы фиторемедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) // *Почвоведение.* 2014. №9. С. 1113–1130.
12. Уфимцева М.Д. Закономерности накопления химических элементов высшими растениями и их реакция в аномальных биогеохимических провинциях // *Геохимия.* 2015. №5. С. 450–465.
13. Андреева И.В., Байбеков Р.Ф., Злобина М.В. Фиторемедиация почв, загрязнённых тяжёлыми металлами // *Природообустройство.* 2009. №5. С. 5–11.
14. Галиулин Р.В., Галиулина Р.А. Фитоэкстракция тяжелых металлов из загрязненных почв // *Агрохимия.* 2003. №3. С. 77–85.
15. Ghosh M., Singh S.P. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts // *Appl. Ecol. Environ. Res.* 2005. Vol. 3. N1. Pp. 1–18. DOI: 10.15666/aeer/0301_001018.
16. Badr N., Fawzy M., Al-Qahtani K.M. Phytoremediation: an economical solution to heavy-metal-polluted soil and evaluation of plant removal ability // *Word Appl. Sci. J.* 2012. Vol. 16. N9. Pp. 1292–1301. DOI: 10.1.1.389.6852.
17. Ali H., Khan E., Sajad M. A. Phytoremediation of heavy metals-concepts and applications // *Chemosphere.* 2013. Vol. 91. Pp. 869–881. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.01.075.
18. Отчет по экологической безопасности федерального государственного унитарного предприятия «Федеральный экологический оператор» за 2020 год. М., 2021. 44 с.
19. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2020 год. М., 2021. 205 с.
20. Методы изучения лесных сообществ. СПб., 2002. 240 с.
21. Андроханов В.А., Овсянникова С.В., Курачев В.М. Техноземы: свойства, режимы, функционирование. Новосибирск, 2000. 200 с.
22. Андроханов В.А., Куляпина Е.Д., Курачев В.М. Почвы техногенных ландшафтов: генезис и эволюция. Новосибирск, 2004. 205 с.
23. Ермаков А.И., Арасимович В.В., Смирнова-Иконникова М.И., Мурри И.К. Методы биохимического исследования растений. Л., 1972. 456 с.
24. Гужвин С.А., Кумачева В.Д., Каменев Р.А. Физиология и биохимия растений. Персиановский, 2019. 172 с.
25. Воробьева Л.А. Химический анализ почв. М., 1998. 272 с.
26. Soil survey laboratory methods manual. Soil Survey Laboratory Investigations Report N 42. Lincoln, 2004. 701 p.
27. Carter M.R., Gregorich E.G. Soil sampling and methods of analysis. Florida, 2007. 1224 p.
28. Сагт Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. Геохимия окружающей среды. М., 1990. 335 с.
29. Водяницкий Ю.Н. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах. М., 2008. 85 с.
30. Большаков В.А., Водяницкий Ю.Н., Борисочкина Т.И., Кахнович З.Н. Мясников В.В. Методические рекомендации по оценке загрязненности городских почв и снежного покрова тяжелыми металлами. М., 1999. 31 с.
31. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М., 1999. 762 с.
32. Шипунов А.Б., Балдин Е.М., Волкова П.А., Коробейников А.И., Назарова С.А., Петров С.В., Суфиянов В.Г. Наглядная статистика. Используем R! М., 2014. 298 с.

33. Schabenberger O., Pierce F.J. Contemporary statistical models for the plant and soil sciences. Florida, 2001. 738 p.
34. Выборов С.Г., Павелко А.И., Щукин В.Н., Янковская Э.В. Оценка степени опасности загрязнения почв по комплексному показателю нарушенного геохимического поля // Современные проблемы загрязнения почв: материалы Международной научной конференции. М., 2004. С. 195–197.
35. Перельман А.И. Геохимия. М., 1979. 423 с.
36. Орлов Д.С. Химия почв. М., 1992. 399 с.

Поступила в редакцию 17 февраля 2022 г.

Принята к публикации 15 сентября 2022 г.

Для цитирования: Шергина О.В., Михайлова Т.А. Фитоэкстракция тяжелых металлов травянистыми растениями на техногенных почвах // Химия растительного сырья. 2022. №4. С. 311–320. DOI: 10.14258/jcrpm.20220411012.

*Shergina O.V.**, *Mikhailova T.A.* PHYTOEXTRACTION OF HEAVY METALS BY HERBAL PLANTS ON TECHNOGENIC SOILS

Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lermontova st., 132, Irkutsk, 664033 (Russia), e-mail: sherolga80@mail.ru

The purpose of the work is to study the specifics of the natural restoration of vegetation on highly toxic embryozems (on the example of the technogenic dump from the large chemical production «Usoliekhimprom», Irkutsk region). It was shown that organo-accumulative embryozem is the first stage of soil formation and the beginning of plant colonization. The level of technogenic soils pollution with heavy metals was assessed by a set of indicators, based on them, organo-accumulative embryozems were classified as soils with an extremely dangerous level of pollution. It was found that the first pioneers on these embryozems were 9 aboriginal species of herbaceous plants: *Melilotus albus* Medikus., *Melilotus officinalis* (L.) Pall., *Trifolium hybridum* L., *Trifolium repens* L., *Trifolium pratense* L., *Vicia cracca* L., *Medicago sativa* L., *Sonchus arvensis* L., *Chamerion angustifolium* (L.) Scop. A number of their unique features allow them to grow in conditions of very strong soil pollution – this is a high level heavy metals accumulation in phytomass, good adaptation of mineral nutrition to hard growing conditions, an increase in biomass during the growing season, and the absence of visual signs of damage. The obtained results give every reason to recommend these herbaceous plants for use as phytoextractors of heavy metals on technogenic dumps.

Keywords: technogenic dump, embryozems, heavy metals, pioneer plants, phytoextraction.

References

1. Androkhanov V.A., Kurachev V.M. *Pochvenno-ekologicheskoye sostoyaniye tekhnogennykh landshaftov: dinamika i otsenka*. [Soil-ecological state of technogenic landscapes: dynamics and assessment]. Novosibirsk, 2010, 224 p. (in Russ.).
2. *Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000, 304 p.
3. Macnair M.R. *Advances of Botanical Research*, 2003, vol. 40, pp. 63–105. DOI: 10.1016/S0065-2296(05)40002-6.
4. Lindiman A.V., Shvedova L.V., Tukumova N.V., Nevsky A.V. *Ecology and Industry of Russia*, 2008, no. 9, pp. 45–47. (in Russ.).
5. Levkin N.D., Mukhina N.E. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle*, 2012, no. 1, pp. 9–14. (in Russ.).

* Corresponding author.

6. Gul K., Turmetova G.Zh., Ubaidullaeva A.K., Babaeva G.A. *Manas Journal of Agriculture and Life Science*, 2015, vol. 5, no. 1, pp. 87–91. (in Russ.).
7. Vysotskii S.P., Frunze O.V. *Vestnik Akademii grazhdanskoj zashchity*, 2019, vol. 3, no. 19, pp. 117–123. (in Russ.).
8. Bekuzarova S.A., Khanieva I.M., Azubekov L.Kh. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2018, no. 12-2, pp. 345–352. (in Russ.).
9. Verbruggen N., Hermans C., Schat H. *New Phytologist*, 2009, vol. 181, no. 4, pp. 759–776. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2008.02748.x.
10. Kramer U. *Annual Review of Plant Biology*, 2010. vol. 61, no. 1, pp. 517–534. DOI: 10.1146/annurev-arplant-042809-112156.
11. Koptsik G.N. *Pochvovedenie*, 2014, no. 9, pp. 923–939. (in Russ.).
12. Ufimtseva M.D. *Geokhimiya*, 2015, vol. 53, no. 5, pp. 441–455. (in Russ.).
13. Andreeva I.V., Baibekov R.F., Zlobina M.V. *Prirodoobustrojstvo*, 2009, no. 5, pp. 5–11. (in Russ.).
14. Galiulin R.V., Galiulina R.A. *Agrokhimiya*, 2003, no. 3, pp. 77–85. (in Russ.).
15. Ghosh M., Singh S.P. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2005, vol. 3, no. 1, pp. 1–18. DOI: 10.15666/aer/0301_001018.
16. Badr N., Fawzy M., Al-Qahtani K.M. *World Applied Sciences Journal*, 2012, vol. 16, no. 9, pp. 1292–1301. DOI: 10.1.1.389.6852.
17. Ali H., Khan E., Sajad M. A. *Chemosphere*, 2013, vol. 91, no. 7, pp. 869–881. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.01.075.
18. *Otchet po ekologicheskoy bezopasnosti federal'nogo gosudarstvennogo unitarnogo predpriyatiya «Federal'nyy ekologicheskij operator» za 2020 god.* [Report on environmental safety of the federal state unitary enterprise «Federal Environmental Operator» for 2020]. Moscow, 2021, 44 p. (in Russ.).
19. *Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchey sredy v Rossiyskoy Federatsii za 2020 god.* [Review of the state and pollution of the environment in the Russian Federation for 2020]. Moscow, 2021, 205 p. (in Russ.).
20. *Metody izucheniya lesnyh soobshchestv.* [Methods for studying forest communities]. St. Petersburg, 2002, 240 p. (in Russ.).
21. Androkhonov V.A., Ovsyannikova S.V., Kurachev V.M. *Tekhnosemy: svoystva, rezhimy, funkcionirovaniye.* [Technozems: properties, modes, functioning]. Novosibirsk, 2000, 200 p. (in Russ.).
22. Androkhonov V.A., Kulyapina E.D., Kurachev V.M. *Pochvy tekhnogennykh landshaftov: genezis i evolyutsiya.* [Soils of technogenic landscapes: genesis and evolution]. Novosibirsk, 2004, 205 p. (in Russ.).
23. Ermakov A.I., Arasimovich V.V., Smirnova-Ikonnikova M.I., Murri I.K. *Metody biokhimicheskogo issledovaniya rasteniy.* [Methods of biochemical research of plants]. Leningrad, 1972, 445 p. (in Russ.).
24. Guzhvin S.A., Kumacheva V.D., Kamenev R.A. *Fiziologiya i biokhimiya rastenij.* [Plant Physiology and Biochemistry]. Persianovsky, 2019, 172 p. (in Russ.).
25. Vorobieva L.A. *Khimicheskij analiz pochv.* [Chemical analysis of soils]. Moscow, 1998, 272 p. (in Russ.).
26. *Soil survey laboratory methods manual. Soil Survey Laboratory Investigations Report N 42.* Soil Survey Staff, Lincoln, 2004, 701 p.
27. Carter M.R., Gregorich E.G. *Soil sampling and methods of analysis.* Boca Raton, Florida, 2007, 1224 p.
28. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy.* [Geochemistry of the environment]. Moscow, 1990, 335 p. (in Russ.).
29. Vodyanitsky Yu.N. *Tyazhelye metally i metalloidy v pochvakh.* [Heavy metals and metalloids in soils]. Moscow, 2008, 85 p. (in Russ.).
30. Bolshakov V.A., Vodyanitsky Yu.N., Borisochkina T.I., Kakhnovich Z.N., Myasnikov V.V. *Metodicheskiye rekomendatsii po otsenke zagryaznennosti gorodskikh pochv i snezhnogo pokrova tyazhelymi metallami.* [Guidelines for assessing the contamination of urban soils and snow cover with heavy metals]. Moscow, 1999, 31 p. (in Russ.).
31. Perelman A.I., Kasimov N.S. *Geokhimiya landshafta.* [Geochemistry of the landscape]. Moscow, 1999, 762 p. (in Russ.).
32. Shipunov A.B., Baldin E.M., Volkova P.A., Korobeinikov A.I., Nazarova S.A., Petrov S.V., Sufiyarov V.G. *Naglyadnaya statistika. Ispol'zuyem R!* [Visual statistics. Let's use R!]. Moscow, 2014, 298 p. (in Russ.).
33. Schabenberger O., Pierce F. J. *Contemporary statistical models for the plant and soil sciences.* Boca Raton, Florida, 2001, 738 p.
34. Vyborov S.G., Pavelko A.I., Shchukin V.N., Yankovskaya E.V. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Sovremennyye problemy zagryazneniya pochv».* [Collection of reports of the international scientific conference «Modern problems of soil pollution»]. Moscow, 2004, pp. 195–197. (in Russ.).
35. Perelman A.I. *Geokhimiya.* [Geochemistry]. Moscow, 1979, 423 p. (in Russ.).
36. Orlov D.S. *Himiya pochv.* [Soil chemistry]. Moscow, 1992, 399 p. (in Russ.).

Received February 17, 2022

Accepted September 15, 2022