

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 504.054:502.53

ПОВЕДЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СИСТЕМЕ “ПОЧВА–КОНДЕНСАТ–РАСТЕНИЯ” НА ОБЪЕКТАХ РАЗМЕЩЕНИЯ ОТХОДОВ г. УЛАН-УДЭ

© 2023 г. Т. В. Чередова^{1,2,*}, С. Г. Дорошкевич¹, С. В. Барганова¹¹ Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН,
ул. Сахьяновой, ба, Улан-Удэ, 670047 Россия² Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,
ул. Ключевская, 40в, Улан-Удэ, 670013 Россия

*E-mail: cheredova-tv@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.10.2022 г.

После доработки 18.11.2022 г.

Принята к публикации 29.11.2022 г.

Исследовано влияние на компоненты окружающей среды объектов захоронения отходов – закрытых и заброшенных свалок бытовых и промышленных отходов г. Улан-Удэ Республики Бурятия. Подробно рассмотрено поведение тяжелых металлов (Pb, Cu, Zn, Ni, Cd, Co, Sb, Sn, Bi, Hg, а также Cr) в почвах, растительности, испаряющейся влаге (конденсате). Выявлено, что почвы, растения и конденсат на свалках обогащены тяжелыми металлами (ТМ) по сравнению с фоновыми участками. В почвах на свалках наблюдаются превышения норм предельно-допустимых концентраций ТМ от 1.1 до 90 раз. Концентрации ТМ в растениях на свалках превышают фоновые показатели от 1.1 до 104 раз. Превышение максимально-допустимого уровня содержания ТМ в растениях выявлено для Zn, Cd, Cr. В конденсате, отобранном на свалках, зафиксированы превышение нормативов ПДК_{рыб-хоз} по Cu, Zn, Hg. Установлен схожий характер распределения ТМ в конденсате и растениях. Более 80% суммарного вклада от содержания ТМ в составе конденсата и растений вносят Zn и Cu, в почве – Zn, Cr, Ni, Cu, Co, Pb. На каждой свалке рассчитаны суммарные индексы (Z_c) загрязнения для почв, конденсата и растительности. На основании Z_c объекты исследования проранжированы по степени их опасности для окружающей среды, что может являться основанием для принятия решения о необходимости рекультивации нарушенных территорий.

Ключевые слова: свалки, бытовые и промышленные отходы, почва, растения, конденсат**DOI:** 10.31857/S0869780923010022, **EDN:** HSAFMS

ВВЕДЕНИЕ

Объекты размещения промышленных и бытовых отходов являются экологической проблемой многих населенных пунктов, как на территории России, так и за ее пределами [9, 12, 13]. В частности, в Республике Бурятия практически каждое муниципальное образование располагает свалкой отходов. По данным территориальной схемы в области обращения с отходами¹ всего в республике насчитывается 5 полигонов, включенных в государственный реестр размещения отходов (ГРОРО) и 18 свалок, не включенных в ГРОРО. Особую опасность представляют собой свалки, открытые

до вступления в силу жестких экологический требований по организации объектов размещения отходов (СП 320.1325800.2017). Такие свалки располагали ранее, как правило, в низинных частях рельефа, поймах рек, оврагах, т.е. в геологической среде наименее устойчивой к загрязнению продуктами разложения свалочного материала [9]. При этом не проводились работы по подготовке основания свалки, контролю состава и объемов захораниваемых отходов, пересыпке отходов изолирующим материалом, что усиливало процессы рассеяния потенциально опасных веществ во всех средах, окружающих свалки. Стоит отметить, что в настоящее время администрациями муниципальных образований республики проводятся работы по ликвидации несанкционированных свалок: они ставятся на учет, разрабатываются проекты их рекультивации. Вместе с тем значительное количество свалок остается на своих местах. На территории городского округа “Город

¹ Приказ министерства природных ресурсов республики Бурятия от 29.04.2020 № 159-ПР “Об утверждении Территориальной схемы в области обращения с отходами, в том числе с твердыми коммунальными отходами, Республики Бурятия” [Электронный ресурс]. URL: <http://ias.burpriroda.ru/ekologiya/tsoo.php> (дата обращения 10.10.2022).

Таблица 1. Характеристика объектов размещения отходов

Местоположение	Тип захороненных отходов	Площадь объекта, га	Объем накопленных отходов, тыс. т	Период функционирования объекта размещения отходов	Расстояние до ближайшего жилого массива, м
п. Сотниково	Бытовые	2.8	97.1	2011–2015	1000
п. Стеклозавод	Бытовые и строительные	65	4898	1960–2006	150
п. Бабасанова	Промышленные	10	Не известно	1960–1989 (вскрыта 2000–2003)	100
п. Площадка	Золошлаковые	4.5	245	2011–2023	10

Улан-Удэ” к таким объектам в частности относятся свалки, расположенные в поселках Сотниково, Восточный, Стеклозавод, Площадка.

Полигоны бытовых и промышленных отходов являются источниками поступления в окружающую среду различных продуктов минерального и органического происхождения [2, 4]. Особую опасность представляет высокая степень загрязненности большинства полигонов тяжелыми металлами (ТМ) [6], вынос которых за пределы полигона может привести к загрязнению ими поверхностных и подземных вод, почв и грунтов, а также к угнетению растительности на примыкающих к полигонам территориях. ТМ обладают различной степенью биогеохимической активности: к примеру, установлено, что Cd, Br, Cs очень легко поглощаются растениями, в то время как Ba, Ti, Pb – чрезвычайно слабо.

Цель настоящего исследования – анализ комплексной миграции ТМ, обладающих различной биогеохимической активностью, в системе “почва–вода–растение” с оценкой возможности распространения в среде техногенно-нарушенных территорий городского округа г. Улан-Удэ.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объекты исследований – законсервированные свалки бытовых и промышленных отходов, расположенные в окрестностях г. Улан-Удэ (табл. 1).

Свалка бытовых отходов п. Сотниково была организована в 2011 г. и предназначалась для складирования коммунальных отходов г. Улан-Удэ. После заполнения одной из карт свалки на площади 2.77 га выяснилось, что ее местоположение попадает в зону с особыми условиями использования аэропорта г. Улан-Удэ (реестровый номер 03: 00–6.184), и растущая свалка может мешать посадке авиационного транспорта, поэтому официально свалка была закрыта в 2015 г. Проект рекультивации свалки по ряду причин не прошел государственную экологическую экспертизу, и открытая карта свалки оказалась заброшенной. На техногенном грунте свалочного тела

естественным путем начал формироваться почвенно-растительный слой, достигающий в некоторых местах 20 см, появились кустарники (вишня, смородина, ильм) и многолетние травянистые растения. К сожалению, несанкционированный вывоз населением мусора продолжается, что способствует загрязнению и захламлению прилегающей территории свалки.

Свалка бытовых и строительных отходов п. Стеклозавод функционировала на территории г. Улан-Удэ 46 лет (1960–2006 гг.). К настоящему времени объем накопленных отходов составляет около 7.31 млн м³. Свалка продолжает использоваться для складирования снега от уборки городской территории в зимний период. На свалке сформирован устойчивый почвенно-растительный слой, глубина почвенного горизонта достигает 10–30 см. Свалка имеет ограждение и пункт охраны, поэтому прилегающая территория свалки находится в удовлетворительном состоянии.

Свалка п. Площадка размещена на территории отработанного глиняного карьера г. Улан-Удэ и с 2011 г. используется Улан-Удэнским авиационным заводом в качестве площадки рекультивации. Площадь выделенного под складирование отходов участка – 4.5 га. Рекультивация осуществляется в основном золошлаковыми отходами от котельной завода и инертными строительными отходами. На свалке ведется регулярный мониторинг загрязнения подземных вод. К настоящему времени рекультивированная часть карьера засыпана грунтом толщиной 20–40 см. На оставшейся территории рекультивация продолжается до 2023 г.

Свалка в п. Восточный в местности падь Бабасанова (далее п. Бабасанова) была организована ориентировочно в 1960 г. На свалку вывозился широкий ассортимент промышленных отходов: макулатура, ветошь, отходы пластмасс, опилки, шламы гальванических ванн, шламы алюмината, отходы литейного производства, строительный мусор, карбидный ил, шлак и зола котельных, отработанные растворители и другие отходы предприятий города, точный состав которых не уста-

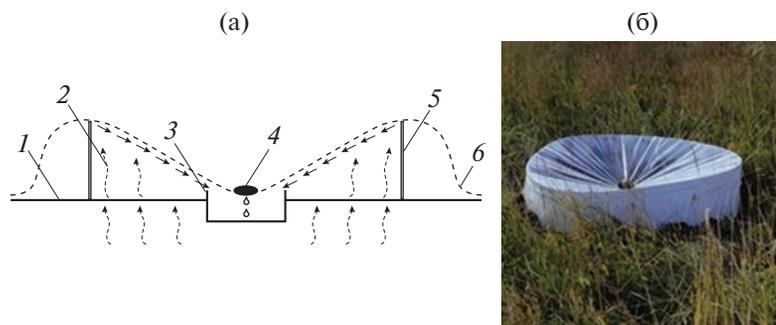


Рис. 1. Схема (а) и общий вид (б) мобильной установки для сбора конденсата: 1 – поверхность почвы; 2 – испаряющаяся влага (конденсат); 3 – емкость для сбора конденсата; 4 – груз; 5 – стенки цилиндра; 6 – полиэтиленовая пленка.

новлен. Известно, что предварительных работ по устранению возможностей дренажа токсичных веществ с дождевыми и снеговыми водами не проведено. Площадь, занятая свалкой, – около 10 га, из них 5 га – основное тело высотой 7–10 м. В 1989 г. свалка была официально закрыта и засыпана золошлаковыми отходами, но в период 2000–2003 гг. вновь вскрыта “охотниками за черным металлом”. К настоящему времени на свалке сформирован растительный слой, встречаются кустарники (ильм, облепиха).

Перечисленные объекты представляют собой потенциальную опасность не только для окружающей среды, но и для населения, так как в силу активной застройки в частном секторе многие из рассматриваемых свалок оказались в окружении жилого массива дачных хозяйств, активно развивающихся на этой территории в течение последнего десятилетия.

Для проведения комплексной геоэкологической оценки на исследуемых объектах размещения промышленных и бытовых отходов г. Улан-Удэ были проведены отборы проб почв/грунтов, растительности и испаряющейся влаги (конденсата) непосредственно на теле свалок и на фоновых площадках. В качестве фона были выбраны незагрязненные участки за границами свалок с учетом розы ветров и орографических особенностей местности. Всего было отобрано 69 проб: 32 почв/грунтов, 27 растений, 10 конденсатов.

Для отбора проб почв/грунтов территория изыскания разбивалась на пробные площадки площадью 25 м², на каждой из которых отбиралось не менее одной объединенной пробы методом конверта в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017²,

² ГОСТ 17.4.3.01-2017. “Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб” (введен в действие Приказом Росстандарта от 01.06.2018 № 302-ст). [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200159508>.

ГОСТ 17.4.4.02-2017³ из поверхностного слоя с погружением на глубину 0.3 м.

Пробы растительности отбирались на тех же участках, что и образцы почв/грунтов. Основной критерией при выборе растений – их наличие на всех изучаемых участках. Было выбрано две группы растений [5] – травянистые: пырей ползучий (*Elytrigia repens*), марь белая (*Chenopodium album*), крапива коноплевая (*Urtica cannabina*), полынь пижмолистная (*Artemisia tanacetifolia*), полынь метельчатая (*Artemisia scoparia*), полынь обыкновенная (*Artemisia vulgaris*), и древесные: ильм приземистый (*Ulmus pumila*).

Пробы конденсата были отобраны с использованием мобильной установки по сбору конденсата, разработанной сотрудниками лаборатории гидрогеологии и геоэкологии ГИН СО РАН (А.М. Плюснин, А.В. Залуцкий). Принцип работы установки основан на солнечной дистилляции (рис. 1).

Мобильная установка, состоящая из ПВХ-цилиндра (диаметром 1 м² и высотой 0.5 м), устанавливалась на поверхности почвы/грунта. В центре окружающей ставилась емкость для сбора конденсата. Цилиндр закрывался полиэтиленовой пленкой, в центр которой помещался груз, создающий ребра жесткости. Края пленки выводились за края цилиндра и закреплялись для предотвращения выхода испаряющейся влаги. По мере нагревания поверхности от солнечной энергии, объем установки насыщался испарениями почвенной влаги, которые при наступлении точки росы конденсировались на внутренней стороне пленки (б) и стекали по ребрам жесткости в емкость (3). Объем конденсата варьировался от 10 до 60 см³.

³ ГОСТ 17.4.4.02-2017. “Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа” (введен в действие Приказом Росстандарта от 17.04.2018 № 202-ст). [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200158951>.

Содержание химических элементов в почве определяли в ЦКП “Геоспектр” ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ) методом рентгеноспектрального флуоресцентного анализа на кристалл-дифракционном спектрометре ARL Perform’X 4200 (доверительная вероятность $P = 95\%$) [3]. Анализ элементного состава растений и конденсата был проведен методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ISP-MS) на масс-спектрометре “Agilent 7500 ce” (США) в Лимнологическом институте СО РАН (г. Иркутск). Ошибки измерения оценивали с помощью показателя зависимости коэффициента вариации (RCD, %) от величины аналитического сигнала (N , имп/с), установленного экспериментально: $RSD\% = -125.71N^{-0.33103}$, где $N = 20-20000$ имп/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Методом рентгеноспектрального флуоресцентного анализа получены сведения о содержании в почве 30 химических элементов в основном лито- и халькофильной геохимических групп, прежде всего металлов (Rb, Cs, Sr, Ba, V, Gr, Ni, Cu, Zn и др.), в том числе редкоземельных (Ce) и радиоактивных (U, Th), а также полуметаллов (Sb, As) и неметаллов (S, Cl, Br). По результатам проведенного анализа методом ISP-MS в образцах растительности и конденсата идентифицировано 72 элемента: практически все металлы, включая группу редкоземельных металлов и радиоактивных элементов и неметаллы (P, S, Cl, Se, I, Br). Перечень ТМ, подлежащих более подробному анализу, был составлен на основе классификации Н.Ф. Реймерса [7], к ним было отнесено 11 элементов: Pb, Cu, Zn, Ni, Cd, Co, Sb, Sn, Bi, Hg и Cr.

Для оценки степени химического загрязнения почв были рассчитаны коэффициенты концентрации ТМ (K_{ki}) и суммарный показатель загрязнения почв ($Z_{c(n)}$) по формулам (1), (2).

$$K_{ki} = \frac{C_i}{C_{\phi i}}, \quad (1)$$

где C_i и $C_{\phi i}$ – концентрация и фоновая концентрация i -го элемента в почве соответственно, мг/кг.

$$Z_{c(n)} = \sum_{i=1}^n K_{ki} - (n-1), \quad (2)$$

где K_{ki} – коэффициент концентрации i -го элемента в почве; n – число изучаемых элементов.

При установлении категории химического загрязнения почвы была использована следующая градация: $Z_{c(n)} < 16$ – допустимая; $Z_{c(n)} = 16-32$ – умеренно-опасная; $Z_{c(n)} = 32-128$ – опасная; $Z_{c(n)} > 128$ – чрезвычайно опасная категория за-

грязнения⁴. Результаты представлены в табл. 2. В грунтах на свалке п. Бабасанова выявлен весь спектр изучаемых ТМ, на свалке п. Сотниково в перечне выявленных элементов отсутствовал Sn, на свалках п. Площадка и п. Стеклозавод Cd, Sn, Sb не обнаружены. В большинстве случаев содержание ТМ в почвах/грунтах на свалках было выше фоновых показателей. Концентрация выявленных ТМ в грунтах на свалках превышает нормы ПДК в широком диапазоне: п. Сотниково от 1.3 ПДК (Sb) до 13.2 ПДК (Gr), п. Стеклозавод от 1.6 ПДК (Ni) до 7.3 ПДК (Gr), п. Площадка от 1.1 ПДК (Zn) до 6.0 ПДК (Cr), п. Бабасанова от 1.2 ПДК (Ni) до 90 ПДК (Cd). Особое внимание стоит обратить на свалку п. Бабасанова, в почвах/грунтах которой содержание ТМ превышает нормы ПДК и кларковые значения в десятки раз.

По суммарному показателю загрязнения почвы ТМ грунты частично рекультивированных объектов размещения отходов (п. Площадка и п. Стеклозавод) характеризуются допустимым уровнем загрязнения ($Z_{c(n)} < 2.87$), п. Сотниково – умеренно-опасным ($Z_{c(n)} = 18.4$), п. Бабасанова – чрезвычайно-опасным ($Z_{c(n)} = 536.81$). По показателю $Z_{c(n)}$, рассматриваемые объекты захоронения отходов можно разместить в следующий сравнительный ряд (по уменьшению степени загрязнения почв): п. Бабасанова > п. Сотниково > п. Стеклозавод > п. Площадка.

Содержание тяжелых металлов в растениях, отобранных на свалках (табл. 3), находится в пределах естественного диапазона колебаний, принятого на основании работ геохимиков А. Кабата-Пендиас и Х. Пендиаса [11] и не превышает максимально-допустимые уровни (МДУ)⁵.

Исключения составляют Zn, Cd, Cr, превышения МДУ по которым достигают до 25 раз. Максимальные концентрации ТМ были зафиксированы в растениях, отобранных на свалке промышленных отходов п. Бабасанова, характеризующейся чрезвычайно-опасной категорией загрязнения почв, превышения количества ТМ над фоном на этой свалке варьировались от 1.3 (Ni) до 104.2 (Cd). Повышенное содержание ТМ наблюдалось не только в растениях, отобранных на теле свалки п. Бабасанова, но и в зоне ее влияния на расстоянии около 200 м по ходу движения подземных

⁴ Методические указания 2.1.7.730-99. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 1999. 38 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/6/6862/>.

⁵ Временный максимально допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках /утв. Главным управлением ветеринарии Государственного агропромышленного комитета СССР 7 августа 1987 г. № 123-4/281-8. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200086835> (дата обращения 10.10.2022).

Таблица 2. Диапазон содержания тяжелых металлов (числитель, мг/кг), коэффициент концентрации (знаменатель, K_k^{\max}) и суммарный индекс загрязнения почв ($Z_{c(p)}$) на свалках г. Улан-Удэ

Местоположение	Pb	Cu	Zn	Ni	Cd	Co	Sb	Sn	Cr	$Z_{c(p)}$
п. Сотниково	$\frac{18-31}{1.82}$	$\frac{31-53}{2.29}$	$\frac{46-269}{4.64}$	$\frac{19-35}{1.17}$	$\frac{2.8-3.1}{6.24}$	$\frac{9-22}{1.16}$	$\frac{6.0-6.7}{6.70}$	н/о	$\frac{24-79}{1.38}$	18.4
п. Стеклозавод	$\frac{24-75}{2.14}$	$\frac{13-17}{1.21}$	$\frac{40-86}{1.23}$	$\frac{18-20}{1.05}$	н/о	$\frac{9-20}{1.33}$	н/о	н/о	$\frac{34-44}{0.92}$	2.87
п. Площадка	$\frac{20-23}{1.00}$	$\frac{20-21}{0.86}$	$\frac{55-60}{0.87}$	$\frac{18-20}{0.79}$	н/о	$\frac{8-11}{0.65}$	н/о	н/о	$\frac{33-36}{0.67}$	–
п. Бабасанова	$\frac{17-735}{33.41}$	$\frac{22-1447}{76.16}$	$\frac{78-3147}{50.76}$	$\frac{24-46}{6.35}$	$\frac{9.1-45}{189.82}$	$\frac{12-33}{2.20}$	$\frac{5.7-47}{47.11}$	$\frac{13-229}{228.98}$	$\frac{40-451}{0.02}$	536.81
ПДК, мг/кг	32	33	55	20	0.5	5	4.5	–	6	–
Кларк в почве [1], мг/кг	10	20	50	34	0.5	8.9	–	10	190	–

Примечание: н/о – не обнаружено; “–” – не установлено.

Таблица 3. Содержание тяжелых металлов (числитель, мкг/кг), коэффициенты концентрации (знаменатель, K_k) и суммарный индекс загрязнения растений ($Z_{c(p)}$) на свалках г. Улан-Удэ

Местоположение	Pb	Cu	Zn	Ni	Cd	Co	Sb	Sn	Bi	Hg	Cr	$Z_{c(p)}$
п. Сотниково	$\frac{149}{1.2}$	$\frac{5000}{1.5}$	$\frac{13800}{3.2}$	$\frac{320}{2.0}$	$\frac{100}{1.7}$	$\frac{85}{2.1}$	$\frac{10}{2.6}$	$\frac{22}{1.2}$	$\frac{3.8}{2.0}$	$\frac{31}{0.9}$	$\frac{250}{1.1}$	9.5
п. Стеклозавод	$\frac{400}{3.7}$	$\frac{6000}{2.1}$	$\frac{29000}{5.9}$	$\frac{480}{1.1}$	$\frac{500}{6.8}$	$\frac{107}{1.3}$	$\frac{34}{2.6}$	$\frac{14}{1.4}$	$\frac{2.9}{2.4}$	$\frac{42}{7.0}$	$\frac{330}{1.1}$	25.4
п. Площадка	$\frac{820}{1.5}$	$\frac{8100}{1.9}$	$\frac{75000}{7.7}$	$\frac{1020}{1.4}$	$\frac{910}{3.8}$	$\frac{220}{3.1}$	$\frac{24}{1.2}$	$\frac{71}{2.0}$	$\frac{9.3}{3.6}$	$\frac{25}{0.9}$	$\frac{1490}{2.9}$	20.0
п. Бабасанова (тело свалки)	$\frac{1250}{9.1}$	$\frac{14300}{1.9}$	$\frac{76000}{5.1}$	$\frac{780}{1.3}$	$\frac{7400}{104.2}$	$\frac{129}{1.8}$	$\frac{72}{6.5}$	$\frac{65}{3.3}$	$\frac{3.2}{2.1}$	$\frac{29.0}{1.5}$	$\frac{900}{3.0}$	129.8
п. Бабасанова (зона влияния)	$\frac{340}{2.6}$	$\frac{10800}{1.4}$	$\frac{33000}{2.2}$	$\frac{630}{1.1}$	$\frac{260}{3.7}$	$\frac{230}{3.2}$	$\frac{15}{1.4}$	$\frac{20}{1.0}$	$\frac{3.4}{2.3}$	$\frac{25}{1.3}$	$\frac{890}{3.0}$	13.2
Пределы колебаний в травянистых растениях [11], мкг/кг	100–10000	1000–33100	6000–80000	70–4800	30–1260	10–390	до 60	40–100	до 20	0.9–21	110–3400	–
Максимально допустимый уровень, мкг/кг	5000	30000	50000	3000	300	1000	500	–	–	50	500	–

Примечание: “–” – не установлено.

вод. На свалке п. Сотниково превышения концентрации ТМ над фоном варьировались от 1.1 (Cr) до 3.2 (Zn), на свалках п. Стеклозавод и п. Площадка – от 1.1 (Cr, Ni) до 7.7 (Zn). Очевидно, что на химический состав растений оказали влияние захороненные отходы, размещенные не только в зоне питания корней растений, но и в более глубоких горизонтах. На свалке п. Площадка – это золошлаковые отходы, на свалке п. Стеклозавод – бытовые отходы, накапливающиеся в течение многих лет. Немаловажным фактором поступления химических элементов в растения является возраст свалки: на более старых свалках наблюдаются более высокие концентрации тяжелых ме-

таллов, чем на относительно “молодых”. Для составления ранжирующего ряда, отражающего содержание тяжелых элементов в растениях на разных свалках, по аналогии с суммарным показателем загрязнения почв был рассчитан суммарный показатель загрязнения растений ($Z_{c(p)}$). Рассматриваемые объекты захоронения отходов можно разместить в следующий сравнительный ряд (по уменьшению $Z_{c(p)}$): п. Бабасанова (129.8) > п. Стеклозавод (25.4) > п. Площадка (20.0) > п. Сотниково (9.5). Полученный сравнительный ряд отличается от аналогичного ряда, составленного для почв, в частности свалка п. Сотниково характеризуется повышенным уровнем загрязнения

Таблица 4. Содержание тяжелых металлов (числитель, мкг/дм³), коэффициенты концентрации (знаменатель, К_к) и суммарный индекс загрязнения конденсата (Z_{с(к)}) на свалках г. Улан-Удэ

Местоположение	Pb	Cu	Zn	Ni	Cd	Co	Sb	Sn	Bi	Hg	Cr	Z _{с(к)}
п. Сотниково	$\frac{0.69}{1.53}$	$\frac{6.8}{1.45}$	$\frac{13.2}{1.81}$	$\frac{0.97}{1.45}$	$\frac{0.056}{1.24}$	$\frac{0.124}{1.43}$	$\frac{0.095}{1.34}$	$\frac{0.15}{0.94}$	$\frac{0.007}{2.12}$	$\frac{0.1}{3.23}$	$\frac{0.7}{0.97}$	7.51
п. Стеклозавод	$\frac{1.63}{2.40}$	$\frac{5.8}{1.93}$	$\frac{23}{1.42}$	$\frac{1.15}{1.39}$	$\frac{0.07}{1.00}$	$\frac{0.153}{2.43}$	$\frac{0.21}{0.72}$	$\frac{0.046}{0.96}$	$\frac{0.008}{1.54}$	$\frac{0.11}{1.10}$	$\frac{0.93}{1.00}$	5.89
п. Площадка	$\frac{0.84}{0.92}$	$\frac{3.3}{1.00}$	$\frac{8.2}{1.34}$	$\frac{1.02}{0.96}$	$\frac{0.051}{1.59}$	$\frac{0.22}{1.69}$	$\frac{0.22}{2.89}$	$\frac{0.047}{0.34}$	$\frac{0.007}{1.89}$	$\frac{0.08}{0.89}$	$\frac{0.86}{1.00}$	4.51
п. Бабасанова	$\frac{1.79}{2.63}$	$\frac{7.8}{1.86}$	$\frac{26}{2.60}$	$\frac{1.7}{2.39}$	$\frac{0.18}{4.29}$	$\frac{0.23}{2.32}$	$\frac{0.25}{3.42}$	$\frac{0.096}{0.82}$	$\frac{0.009}{0.56}$	$\frac{0.09}{0.69}$	$\frac{1.09}{1.65}$	13.23
ПДК _{сан-гиг}	10	1000	5000	20	1	100	5	2000	100	0.5	50	—
ПДК _{рыб-хоз}	6	1	10	10	5	10	—	112	—	0.01	20	—

Примечание: “—” — не установлено.

почв, но пониженным уровнем содержания ТМ в растениях по сравнению с фоном.

Геохимическая миграция тяжелых металлов в теле свалки может осуществляться за счет различных процессов: в результате прессования отходов, за счет фильтрации с нисходящей влагой атмосферных осадков, посредством перемещения живых организмов, населяющих свалку (черви, микроорганизмы), и др. В рамках настоящего исследования особое внимание уделено миграции ТМ с капиллярной влагой, образование которой возможно внутри техногенного грунта. Биогеохимические процессы в теле полигона способствуют переходу ТМ, содержащихся в составе отходов, в подвижную водорастворимую форму и их миграции в результате испарения к поверхности тела полигона.

Попадая в зону питания корней, капиллярная влага, обогащенная ТМ, становится питательной средой для растений, произрастающих на полигоне. В табл. 4 показано содержание ТМ в конденсате, отобранном на объектах захоронения отходов, и рассчитанный по аналогии с Z_{с(п)} и Z_{с(р)} суммарный показатель загрязнения конденсата (Z_{с(к)}). В связи с отсутствием установленных экологических нормативов для конденсата в качестве эталона сравнения были выбраны санитарно-гигиенические и рыбохозяйственные нормы предельно-допустимых концентраций (ПДК_{сан-гиг}, ПДК_{рыб-хоз}).

В конденсате, отобранном на свалках, наблюдается превышение норм ПДК_{рыб-хоз} по Cu, Zn, Hg. Наиболее высокие концентрации ТМ в конденсате наблюдаются на свалке промышленных отходов п. Бабасанова, где отмечены максимальные концентрации для Pb (1.79 мкг/дм³), Cu (7.8 мкг/дм³), Zn (26 мкг/дм³), Ni (1.7 мкг/дм³), Cr (1.09 мкг/дм³) и других элементов. Превышения концентраций

загрязняющих веществ в конденсате над фоновыми показателями на свалке п. Бабасанова варьируются от 1.65 (Cr) до 4.29 (Cd). К следующим по уровню загрязнения относятся конденсаты: п. Сотниково (K_к = 0.94–3.23), п. Стеклозавод (K_к = 0.72–2.43), п. Площадка (K_к = 0.34–2.89). По содержанию ТМ в конденсате рассматриваемые объекты можно разместить в следующий сравнительный ряд (по убыванию Z_{с(к)}): п. Бабасанова (13.23) > п. Сотниково (7.51) > п. Стеклозавод (5.89) > п. Площадка (4.51).

Для всех изученных свалок характерно схожее распределение тяжелых металлов в исследуемых средах. В качестве примера на рис. 2 представлены графики распределения ТМ в почве, конденсате и растениях на свалке и фоновом участке п. Сотниково.

Для более подробного анализа распределения ТМ в системе “почва–вода–растение” были составлены сравнительные геохимические ряды распределения вклада ТМ, основываясь на % массовой концентрации содержания элемента в каждой из изучаемых сред (рис. 3). В частности, для свалки п. Сотниково сравнительные геохимические ряды распределения имеют следующий вид:

- в растениях – Zn > Cu > Cr > Ni > Pb > Cd > Co > Hg > Sn > Bi;
- в конденсате – Zn > Cu > Ni > Cr > Pb > Sn > Co > Hg > Sb > Cd > Bi;
- в почве – Zn > Cr > Cu > Ni > Pb > Co > Sb = Sn > Cd.

Анализ геохимических рядов (см. рис. 3) показал схожий характер распределения ТМ в конденсате и растениях. Более 80% суммарного вклада от содержания ТМ в составе конденсата и растений вносят Zn и Cu, относящиеся к халькофильным элементам (по классификации В.М. Гольдшмид-

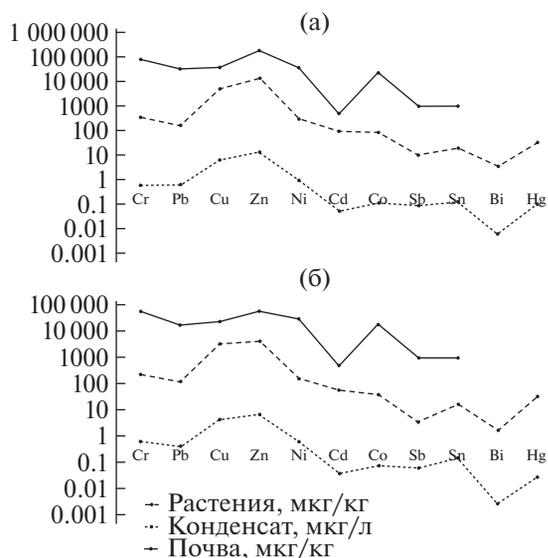


Рис. 2. Распределение ТМ в системе “почва – вода – растение” на: а – свалке, б – фоновом участке (п. Сотниково).

та). Вероятно, эти элементы обладают схожим механизмом поглощения корневой системой растений, что подтверждается многими исследованиями [8, 10, 13]. К ТМ, содержание которых в конденсате и растениях варьируется от 1 до 10%, относятся Cr, Ni, Pb, остальные элементы находятся в рассматриваемых средах в количестве <1%.

В почве же основными вкладчиками являются халькофильный Zn и литофильный Cr, суммарный вклад которых составляет >50%. К следующей группе можно отнести Ni, Cu, Co, Pb, их со-

держание в почве составляет >1%. К элементам, содержание которых в почве составляет <1%, относятся Sb, Sn, Cd.

В целом наблюдается корреляция между содержанием ТМ в почве, конденсате и растениях. Однако растения могут выступать не только пассивным рецептором микроэлементов (захватывая пыль и/или поглощая корнями), но и обладают способностью контролировать поступление или удаление некоторых элементов посредством соответствующих физиологических реакций. К примеру, в растениях, отобранных на всех исследуемых участках, наблюдается повышенная концентрация Cd, несмотря на его относительно низкое содержание в почве и конденсате, что наглядно видно при анализе геохимических рядов. Считается, что Cd не входит в число необходимых для растений элементов, однако он эффективно поглощается как корневой системой, так и листьями [13]. Поскольку растения легко извлекают Cd как из почвенных, так и из воздушных источников, его концентрация в них быстро возрастает в районах с повышенным загрязнением атмосферного воздуха, что характерно для всех исследуемых участков, так как они расположены в зоне влияния городской застройки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Объекты размещения промышленных и бытовых отходов после закрытия продолжают оказывать значительное влияние на окружающую среду. Содержание тяжелых металлов во всех изучаемых средах, контактирующих со свалочным телом (почвы, растения, конденсат), превышает фоновые показатели, во многих случаях наблю-

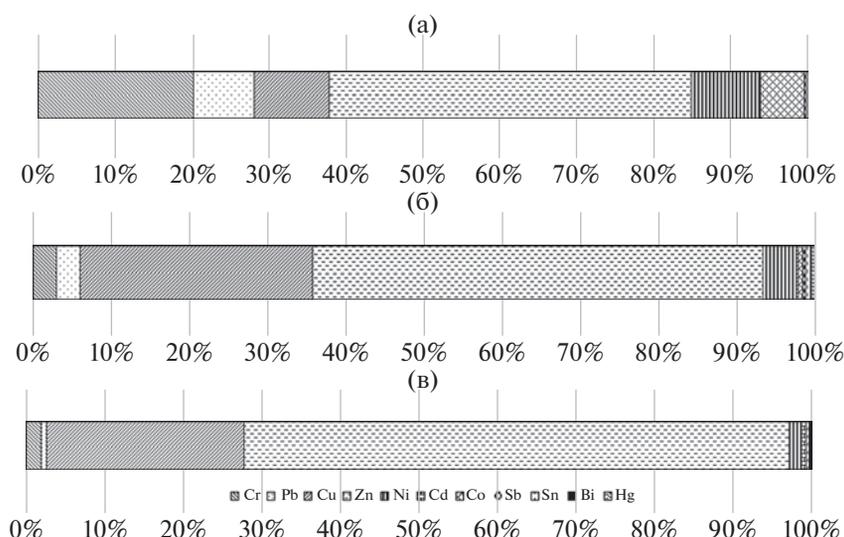


Рис. 3. Распределение тяжелых металлов в почве (а), конденсате (б) и растениях (в) на примере свалки п. Сотниково.

даются превышения норм предельно-допустимых концентраций и кларковых значений.

Степень загрязнения почв на объектах размещения отходов зависит от степени их рекультивации и варьируется от допустимого уровня загрязнения для частично рекультивированных свалок до чрезвычайно-опасной категории загрязнения для нереккультивированных объектов.

Суммарные показатели загрязнения почв, растений и конденсата позволили проранжировать изучаемые объекты размещения отходов по степени их влияния на окружающую среду. Учитывая работу барьерных механизмов растений при накоплении тяжелых металлов, рассмотренные объекты можно составить в следующий ряд по уменьшению степени загрязнения: п. Бабасанова > п. Сотниково > п. Стеклозавод > п. Площадка. Указанная последовательность может являться основанием для принятия решения о необходимости рекультивации нарушенных территорий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградов А.П.* Полное собрание трудов в 18 т. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. Т. 4 / Е.М. Коробова (ред.) Л.Д. Виноградова (сост.). М.: РАН, 2021. 298 с.
2. *Гуман О.М.* Эколого-геологические условия полигонов твердых бытовых отходов среднего Урала: автореф. дис. докт. геол.-мин. наук. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2008. 43 с.
3. *Жалсараев Б.Ж., Кутовой А.Н., Цыгуев В.Г.* Рентгеновский спектрометр Пат. 2397481, РФ // Б.И. 2010. № 23. 9 с.
4. *Зайцева Т.А.* Закономерности изменения микробиоценозов на полигонах депонирования твердых бытовых отходов в процессе деструкции органических веществ: автореф. дис. докт. биол. наук. Пермь: ПГУ, 2006. 36 с.
5. *Корсун О.В.* Природа Забайкалья: растения. Чита: Экспресс-издательство, 2009. 512 с.
6. *Куриленко В.В., Подлинский И.И., Осмоловская Н.Г.* Эколого-геологическая и биогеохимическая оценка воздействия полигонов бытовых отходов на состояние окружающей среды // Экология и промышленность России. 2012. № 11. С. 28–32.
7. *Реймерс Н.Ф.* Экология. Теории, законы, правила, принципы и гипотезы. М.: Россия молодая, 1994. 366 с.
8. *Ринькис Г.Я.* Оптимизация минерального питания растений. Рига: Зинанте, 1972. 355 с.
9. *Филиппова Л.А., Юркова И.В.* Геохимическое влияние малых свалок на окружающую среду // Известия Сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2009. № 1 (34). С. 92–106.
10. *Jarvis S.C., Robson A.D.* Absorption and Distribution of Copper in Plants with Sufficient or Deficient Supplies // *Annals of Botany*. 1982. V. 50, № 2. P. 151–160.
11. *Kabata-Pendias A.* Trace Elements in Soils and Plants. London, New York: CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, 2011. 505 p.
12. *Schiopu A.-M., Gavrilesco M.* Municipal solid waste landfilling and treatment of resulting liquid effluents // *Environmental Engineering and Management Journal*. 2010. V. 9. № 7. P. 993–1019.
13. *Vaverkova M.D., Adamcova D., Zloch J., Radziemska M. et al.* Impact of municipal solid waste landfill on environment – a case study // *Journal of Ecological Engineering*. 2018. V. 19. Iss. 4. P. 55–68.

BEHAVIOR OF HEAVY METALS IN SOIL-CONDENSATE-PLANTS SYSTEM IN THE ULAN-UDE LANDFILLS

T. V. Cheredova^{a,b,#}, S. G. Doroshkevich^a, and S. V. Bartanova^a

^a*Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, ul. Sakhyanovoi, 6a, Ulan-Ude, 670047 Russia*

^b*East Siberian State University of Technology and Management, ul. Klyuchevskaya, 40b, Ulan-Ude, 670013 Russia*

[#]*E-mail: cheredova-tv@yandex.ru*

The impact of waste dumps on environmental components, i.e., soil, evaporating soil water (condensate) and plants is studied. It has been revealed that industrial and municipal waste dumps continue to affect significantly the environment after their closure. The behavior of heavy metals (Pb, Cu, Zn, Ni, Cd, Co, Sb, Sn, Bi, Hg, and Cr) in soils, plants, and condensate in landfill areas and beyond them (the background) has been studied in detail. It has been found out that soils, plants and condensate at landfills are enriched in heavy metals as compared to the background sites. The degree of soil contamination at waste dumps depends on the reclamation stage of the latter. The landfill soils exceed the norms of maximum permissible concentrations for heavy metals by 1.1–90 times. Concentrations of heavy metals in plants exceed the background values from 1.1 to 104 times at all dumps. The maximum level of heavy metals in plants is exceeded for Zn, Cd, Cr. In the condensate sampled at the dumps, MPC is exceeded for Cu, Zn, and Hg. Based on the analysis results, the geochemical rows of heavy metal distribution in different landfill environments were compiled: in plants – Zn > Cu > Cr > Ni > Pb > Cd > Co > Hg > Sn > Bi; in condensate – Zn > Cu > Ni > Cr > Pb > Sn > Co > Hg > Sb > Cd > Bi; in the soil – Zn > Cr > Cu > Ni > Pb > Co > Sb = Sn > Cd. The distribution of heavy

metals in the condensate and plants is similar. In these environments, contribution of Zn and Cu is more than 80%, contribution of Cr, Ni, Pb varies from 1 to 10%; contribution of Cd, Co, Sb, Sn, Bi, Hg is less than 1%. Heavy metals are distributed in soil according to a different pattern: the main contributors are Zn and Cr (their input is more than 50%), then go Ni, Cu, Co, and Pb (their content in soil varies from 1 to 50%), followed by Sb, Sn, and Cd (their content is less than 1%). Total pollution indices (Z_c) of the soil, condensate and plants have been calculated for each landfill. Based on Z_c , the landfills were grouped in a ranking series, which can form the basis for assigning the sequence of landfill reclamation measures.

Keywords: *dumps, municipal and industrial waste, soil, plants, condensate*

REFERENCES

1. Vinogradov, A.P. *Geokhimiia redkikh i rasseyannykh elementov v pochvakh. Polnoe sobranie trudov v 18 t. T. 4* [Geochemistry of rare and scattered elements in soils. The complete works in 18 volumes. Vol. 4.]. E.M. Korobova, L.D. Vinogradova, Eds. Moscow, RAS Publ., 2021, 298 p. (in Russian)
2. Guman, O.M. *Ekologo-geologicheskie usloviya poligonov tverdykh bytovykh otkhodov srednego Urala* [Ecological and geological conditions of solid waste landfills in the Middle Urals.]. Extended abstract of Doctoral (Geol.-Min.) disseration. Yekaterinburg, UGGU Publ., 2008, 43 p. (in Russian)
3. Zhalsaraev, B.Zh., Kutovoi, A.N., Tsynguev, V.G. *Rentgenovskii spektrometr* [X-ray spectrometer]. Patent RF, no. 2397481, 2010. (in Russian)
4. Zaitseva, T.A. *Zakonomernosti izmeneniya mikrobiotsenozov na poligonakh deponirovaniya tverdykh bytovykh otkhodov v protsesse destruktivii organicheskikh veshchestv* [Patterns of changes in microbiocenoses at landfills of solid household waste deposition in the process of destruction of organic substances]. Extended abstract of Doctoral (Biol.) disseration. Perm, PSU Publ., 2006, 36 p. (in Russian)
5. Korsun, O.V. *Priroda Zabaikal' ya: rasteniya* [Nature of Transbaikalia: plants]. Chita, Express Publ., 2009, 512 p. (in Russian)
6. Kurilenko, V.V., Podplinskii, I.I., Osmolovskaya, N.G. *Ekologo-geologicheskaya i bio-geokhimicheskaya otsenka vozdeistviya poligonov bytovykh otkhodov na sostoyanie okruzhayushchei sredy* [Ecological geological and bio-geochemical assessment of the impact of municipal solid waste landfills on the environment]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2012, no. 11, pp. 28–32. (in Russian)
7. Reimers, N.F. *Ekologiya. Teorii, zakony, pravila, printsipy i gipotezy* [Ecology. Theories, laws, rules, principles and hypotheses]. Moscow, Rossiya molodaya Publ., 1994, 366 p. (in Russian)
8. Rin'kis, G.Ya. *Optimizatsiya mineral'nogo pitaniya rastenii* [Optimization of mineral nutrition of plants]. Riga, Zinante Publ., 1972, 355 p. (in Russian)
9. Filippova, L.A. Yurkova, I.V. *Geokhimicheskoe vliyanie malykh svalok na okruzhayushchuyu sredu* [Geochemical impact of small landfills on the environment]. *Izvestiya SO RAEN. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii*, 2009, no. 34, pp. 92–106. (in Russian)
10. Jarvis, S.C., Robson, A.D. Absorption and distribution of copper in plants with sufficient or deficient supplies. *Annals of Botany*, 1982, vol. 50, no. 2, pp. 151–160.
11. Kabata-Pendias, A. Trace elements in soils and plants. London, New York, CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, 2011, 505 p.
12. Schiopu, A.-M., Gavrilesco, M. Municipal solid waste landfilling and treatment of resulting liquid effluents. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2010, vol. 9, no. 7, pp. 993–1019.
13. Vaverkova, M.D., Adamcova, D., Zloch, J., Radziemska, M., et al. Impact of municipal solid waste landfill on environment – a case study. *Journal of Ecological Engineering*, 2018, vol. 19, no. 4, pp. 55–68.