

Фитоэкстракция свинца и кадмия из почвогрунтов полигонов отходов некоторыми сельскохозяйственными культурами

© 2023. Л. В. Мосина¹, д. б. н., профессор,
Ю. А. Холопов², к. с.-х. н., доцент,

Ю. А. Жандарова³, руководитель организации,

¹Российский государственный аграрный университет – МСХА
имени К. А. Тимирязева,

127434, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49,

²Самарский государственный университет путей сообщения,
443066, Россия, г. Самара, ул. Свободы, д. 2В,

³РОО «Экологический надзор»,

105066, Россия, г. Москва, ул. Нижняя Красносельская, д. 35,

e-mail: mosina.l.v@yandex.ru, kholopov@bk.ru, zhandarova-julia@mail.ru

Представлены результаты исследования аккумуляции Pb и Cd различными сельскохозяйственными культурами, выращенными на почвогрунтах, отобранных с глубины 0–10 см полигона твёрдых коммунальных отходов «Саларьево». В качестве растений-фитоэкстракторов использовали мятлик луговой (*Poa pratensis*), ежу сборную (*Dactylis glomerata*), горчицу белую (*Sinapis alba*), подсолнечник однолетний (*Helianthus annuus*), горох посевной (*Pisum sativum*), кукурузу обыкновенную (*Zea mays*).

Установлено, что при выращивании на почвогрунте полигона сельскохозяйственные культуры аккумулируют примерно вдвое больше тяжёлых металлов (ТМ) по сравнению с контролем. Выявлена различная количественная экстрагирующая способность разных растений по отношению к Pb и Cd. Ряд по увеличению экстрагирующей способности растений для Pb имеет вид: горох посевной – ежа сборная – подсолнечник однолетний – мятлик луговой – горчица белая – кукуруза обыкновенная. Ряд для Cd: горох посевной – горчица белая – мятлик луговой – кукуруза обыкновенная – подсолнечник однолетний – ежа сборная. Таким образом, горох посевной обладает минимальной аккумулирующей способностью к Pb и Cd. По отношению к кадмию наиболее оптимальным фитоэкстрактором является ежа сборная, которая характеризуется ещё и высокой степенью устойчивости к данному элементу. Высокой очищающей способностью также характеризуются культуры подсолнечника однолетнего и кукурузы обыкновенной. Для фитоэкстракции свинца из загрязнённых почв можно рекомендовать кукурузу обыкновенную.

Ключевые слова: биоаккумуляция, полигон твёрдых коммунальных отходов, тяжёлые металлы, устойчивость, фиторемедиация, экологическое состояние окружающей среды.

Phytoextraction of lead and cadmium from soils of landfills by some agricultural crops

© 2023. L. V. Mosina¹ ORCID: 0000-0003-2120-0389

Yu. A. Kholopov² ORCID: 0000-0002-2442-7186

Yu. A. Zhandarova³ ORCID: 0000-0001-8173-4070

¹Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
49, Timiryazevskaya St., Moscow, Russia, 127434,

²Samara State Transport University,

2B, Svobody St., Samara, Russia, 443066,

³NGO “Environmental Supervision”,

35, Nizhnyaya Krasnoselskaya St., Moscow, Russia, 105066,

e-mail: mosina.l.v@yandex.ru, kholopov@bk.ru, zhandarova-julia@mail.ru

The results of the study of the accumulation of heavy metals (Pb and Cd) by various agricultural crops grown on soils selected from a depth of 0–10 cm of the landfill of municipal solid waste (MSW) “Salar’ev” in comparison with the control sod-podzolic soil, as well as their stability within 30 days from the moment of emergence are presented.

The studied phytoextractor plants were meadow bluegrass (*Poa pratensis*), cocksfoot (*Dactylis glomerata*), white mustard (*Sinapis alba*), annual sunflower (*Helianthus annuus*), seed peas (*Pisum sativum*), common corn (*Zea mays*).

It was found that when grown on the soil of the landfill, agricultural crops accumulate about twice as much heavy metals as compared to the control soil. A series to increase the extracting ability of plants for Pb has the form: seed peas – cocksfoot – sunflower annual – meadow bluegrass – white mustard – common corn. Row for Cd is seed peas – white mustard – meadow bluegrass – common corn – annual sunflower – cocksfoot. With regard to the extracting ability of the studied heavy metals, the minimum accumulating ability of the pea culture is common. The rest of the cultures exhibit different extractive ability, which does not fit into the general series. In relation to cadmium, the cocksfoot is the best phytoextractor, which is also characterized by a high degree of stability. The crops of annual sunflower and common corn are also characterized by a high cleaning ability. Common corn is also recommended for phytoextraction of lead.

Keywords: bioaccumulation, municipal solid waste landfills, heavy metals, sustainability, phytoremediation, ecological state of the environment.

Размещение твёрдых коммунальных отходов (ТКО) на свалках/полигонах ведёт к отчуждению свободных территорий в пригородных районах и ограничивает их использование для строительства жилых зданий. Совместное захоронение различных видов отходов может вести к образованию опасных соединений и неуправляемой их миграции в окружающую среду (ОС). В результате вокруг полигонов формируются зоны многокомпонентного загрязнения почвы, атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод [1].

Московская область – крупнейший индустриальный центр России с населением около 8 млн человек, принимающий значительную часть ТКО г. Москвы (население 12,5 млн на 2022 г.). В 2020 г. на территории Московской области было размещено 4,07 млн т ТКО. Стоит задача снижения объёмов захоронения отходов на 50% за счёт создания современных комплексов по их переработке [2]. Однако имеющиеся полигоны ТКО представляют существенную угрозу для ОС и здоровья населения.

По данным на 2021 г. в Московской области числятся 45 полигонов: 32 из них уже закрыты, 12 рекультивируются и 1 находится в стадии строительства. Среди рекультивируемых полигонов наибольшую площадь имеют Хметьево (79,4 га), Дмитровский (Икша-2) (63,2 га), Кучино (59 га), Саларьево (59 га), Некрасовка (17,5 га), Долгопрудный (13,9 га); среди закрытых – Щербинка (123,5 га), Тимохово (108,6 га), Сосенки (40 га) и Лесная (32,9 га) [3].

Несмотря на закрытие ряда полигонов, опасность загрязнения территории, в частности, тяжёлыми металлами (ТМ), остаётся, что связано с длительностью пребывания данных поллютантов в этой среде и трудностью их извлечения. Так, период полужизни ТМ из почвы в условиях лизиметров варьирует в зависимости от вида металла: для Zn – от 70 до 510; для Cd – от 13 до 1100; для Cu – от 310 до 1500; для Pb – от 740 до 5900 лет [4].

Высокий уровень загрязнения полигонов ТКО формирует неблагоприятный экологический фон, связанный, например, с накоплением микотоксинов [5], что ещё больше увеличивает опасность функционирования полигона.

Одним из приёмов снижения экологической напряжённости территорий полигонов ТКО является фиторемедиация с привлечением растений-фитоэкстракторов. По достижении определённой фазы, в которой интенсивная аккумуляция поллютантов заканчивается, растения скашиваются, вынося в своей биомассе загрязняющие вещества. Эффективность фиторемедиации зависит от целого ряда факторов, среди которых способность различных растений к аккумуляции металлов, толерантность к их высокому содержанию [6]. Изучению данной проблемы посвящён ряд работ [7–13]. В литературных источниках отмечается невысокий коэффициент биологического поглощения ТМ, повысить который возможно на основе современных технологий [14, 15]. Однако изученность этого вопроса для полигонов ТКО крайне слабой.

Поэтому целью нашей работы явилось выявление наиболее эффективных растений-фитоэкстракторов тяжёлых металлов для обоснования целесообразных путей очистки полигонов твёрдых коммунальных отходов.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования явился один из крупнейших полигонов ТКО в Московском регионе – полигон ТКО «Саларьево». Данный полигон расположен на территории Новой Москвы (Ленинский район на юго-западе Москвы, с 1 июля 2013 г. – территория Москвы). Площадь полигона – 59 га, высота – около 80 м, крутизна склона – 30–35°, длина склона – около 100 м. Полигон расположен вблизи населённых пунктов: посёлка Мосрентген, деревень Дудкино, Румянцево, Картмазово.

На минимальном удалении от полигона (от южной экспозиции склона полигона – всего около 30 м) находится деревня Саларьево, на расстоянии около 8 км находится аэропорт «Внуково».

В качестве растений-фитоэкстракторов использовали мятлик луговой (*Poa pratensis*), ежу сборную (*Dactylis glomerata*), горчицу белую (*Sinapis alba*), подсолнечник однолетний (*Helianthus annuus*), горох посевной (*Pisum sativum*), кукурузу обыкновенную (*Zea mays*).

Исследования проводили в условиях лабораторного вегетационного опыта. Растения выращивали в сосудах объёмом 3 л, которые были заполнены отобранными с глубины 0–10 см и 0–50 см образцами почвогрунтов полигона. Продолжительность периода наблюдений составляла 30 сут с момента появления всходов, по истечении которых определяли высоту растений и содержание в них ТМ. В качестве контроля использовали зональную легкосуглинистую дерново-подзолистую почву (ДП почва), которая служила фоновой. Почву отбирали на территории Лиственничной аллеи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева с глубины верхнего 0–10 см гумусового горизонта. За показатель устойчивости принимали разницу отметок высот растений, произрастающих на почвогрунтах полигона и контрольной почве, выраженную в %. Чем выше различия интенсивности роста растений на контрольной почве и почвогрунтах полигона, тем ниже их устойчивость. Данный критерий предлагается авторами, как более простой в применении.

Для определения содержания ТМ растения срезали, высушивали, навеску 10 г сухой растительной массы сжигали в муфеле в течение 8 ч при температуре 500 °С. Зола смачивали бидистиллятом, растворяли в 2,5 мл 20% HCl, охлаждали. Полученный раствор, не фильтруя, переносили через воронку в мерную колбу на 50 мл, доводили раствор в колбе до метки бидистиллированной водой, содержимое колбы перемешивали и оставляли до осветления и последующего определения свинца и кадмия на атомно-абсорбционном спектрофотометре «Perkin-Elmer-503» в пламени ацетилен-воздух. Параллельно определяли содержание ТМ в почвогрунтах полигона мощностью 0–10 см, 0–50 см и в контрольной почве по общепринятой методике [16]. Определение коэффициента биологического поглощения (КБП) проводили путём отношения содержания ТМ в растениях (золе растений) к его содержанию в почве/почвогрунте. Все ис-

следования выполняли в трёхкратной повторности, достоверность различий в содержании ТМ для разных культур и почв определяли по критерию Стьюдента, в обсуждении используются данные, подтверждённые статистической обработкой с достоверностью при $P \geq 0,95$.

Результаты и обсуждение

Как общая закономерность отмечается более высокое содержание ТМ в растениях, выращенных на грунтах поверхностного слоя полигона, что, вероятно, обусловлено аэральным характером загрязнения, связанного с поступлением загрязняющих веществ с ввозимым городским мусором. Содержание Pb и Cd в верхнем 0–10 см слое почвогрунта полигона соответственно составило 57 ± 4 и $3,51 \pm 0,28$ мг/кг; в слое 0–50 см – $42,9 \pm 3,8$ и $2,52 \pm 0,19$, что значительно выше по сравнению с контрольной ДП почвой, в которой содержание Pb было $23,2 \pm 1,8$, а Cd – $0,49 \pm 0,04$ мг/кг. Данные характеристики превышают значения нормативов (ПДК и ОДК), особенно по содержанию Cd. Его содержание в почвогрунте полигона ($3,51 \pm 0,28$ мг/кг) в 7 раз выше по сравнению с контролем ($0,49$ мг/кг) и ОДК ($0,5$ мг/кг). Установлены также превышения ПДК для Pb, но они менее выражены. Наблюдается превышение концентрации данного ТМ в 2,5 раза в почвогрунтах полигона (57 ± 4 мг/кг) по сравнению с контролем ($23,2 \pm 1,8$ мг/кг) и почти двукратное превышение ПДК (32 мг/кг). При этом в контроле содержание Pb не превышает значение ПДК.

Растения, произрастающие на контрольной почве, аккумулируют значительно меньшее количество ТМ (табл. 1).

Содержание ТМ в исследуемых культурах, то есть их аккумулирующая способность, колеблется в зависимости от вида растений и глубины отбора почвогрунтов из тела полигона, используемых для выращивания. Максимальное содержание Pb – $23,6 \pm 2,1$ мг/кг выявлено для кукурузы обыкновенной при выращивании на верхнем 0–10 см слое почвогрунта полигона. Высокой аккумулирующей способностью обладали горчица белая ($11,4 \pm 1,0$), мятлик луговой ($10,3 \pm 0,9$), подсолнечник однолетний ($9,43 \pm 0,8$ мг/кг). Аккумулирующая способность по отношению к Pb у изученных культур, произрастающих на верхнем 0–10 см слое почвогрунтов полигона, может быть представлена следующим рядом (в порядке возрастания): горох посевной ($1,09 \pm 0,09$) – ежа сборная ($2,20 \pm 0,19$) – под-

Таблица 1 / Table 1

Содержание Pb и Cd в 30-суточных сельскохозяйственных культурах, выращенных на почвогрунтах полигона ТКО «Саларьево» (мг/кг сухой массы)
Pb and Cd content in agricultural culture grown during 30 days of growth on soils of the landfill of MSW "Salar'ev" (mg/kg dry masses)

Сельскохозяйственная культура Agricultural crop	Содержание поллютантов в растениях, мг/кг сухой массы The content of pollutants in plants, mg/kg dry masses					
	Pb		Cd		Pb	Cd
	0–10 см 0–10 cm	0–50 см 0–50 cm	0–10 см 0–10 cm	0–50 см 0–50 cm	ДП почва (контроль) Sod-podzolic soil (control)	
Мятлик луговой <i>Poa pratensis</i>	10,3±0,9*	8,7±0,7*	2,15±0,2*0	1,200±0,010*	4,4±0,4	0,310±0,027
Ежа сборная <i>Dactylis glomerata</i>	2,2±0,19*	1,01±0,09*	4,2±0,37*	0,85±0,07*	0,85±0,07	0,360±0,029
Горчица белая <i>Sinapis alba</i>	11,4±1,0*	9,6±0,8*	1,75±0,15*	1,50±0,13*	6,2±0,5	0,280±0,024
Подсолнечник однолетний <i>Helianthus annuus</i>	10,1±0,9*	9,4±0,8*	3,2±0,28*	1,19±0,10*	1,03±0,09	0,320±0,027
Горох посевной <i>Pisum sativum</i>	1,09±0,09*	0,85±0,07*	0,158±0,010*	0,102±0,010	0,102±0,010	0,100±0,009
Кукуруза обыкновенная <i>Zea mays</i>	23,6±2,1*	21,5±1,9*	2,9±0,26*	2,40±0,21*	16,2±1,4	0,330±0,028

Примечание: * – статистически значимые различия при $p < 0,05$.
Note: * – statistically significant differences at $p < 0.05$.

солнечник однолетний (10,1±0,9) – мятлик луговой (10,3±0,9) – горчица белая (11,4±1,2) – кукуруза обыкновенная (23,6±1,2 мг/кг). На контрольной ДП почве ряд аккумуляции Pb в целом сохраняется. Высокая аккумулирующая способность горчицы белой и кукурузы обыкновенной по отношению к Pb, установленная в данном исследовании, совпадает с данными, полученными ранее в работе [17].

По отношению к Cd аккумулирующая способность изученных культур представляет следующий ряд (в порядке возрастания): горох посевной (0,158±0,010) – горчица белая (1,75±0,15) – мятлик луговой (2,15±0,20) – кукуруза обыкновенная (2,90±0,26) – подсолнечник однолетний (3,20±0,28) – ежа сборная (4,20±0,37 мг/кг). В отношении экстрагирующей способности Cd наибольшей аккумулирующей способностью характеризуется ежа сборная, а культуры гороха посевного, кукурузы обыкновенной накапливают его значительно меньше. Имеющиеся различия в экстрагирующей способности изучаемых растений подтверждаются литературными данными [18–20].

В условиях произрастания на ДП почве ряд аккумуляции Cd изученными растениями также имеет аналогичный вид (в порядке возрастания): горох посевной (0,100±0,009) – горчица белая (0,280±0,024) – мятлик луговой

(0,310±0,027) – подсолнечник однолетний (0,320±0,027) – кукуруза обыкновенная (0,330±0,028) – ежа сборная (0,360±0,029 мг/кг). Исключение составляют только культуры подсолнечника и кукурузы. Однако близкие значения аккумулирующей способности этих растений – соответственно 0,320±0,027 и 0,330±0,028 мг/кг могут уравнивать их способность к поглощению данного ТМ из контрольной почвы.

По сравнению с контрольной почвой эти различия следующие: максимальные у ежи сборной (4,20±0,37 и 0,320±0,027), что составляет более чем десятикратное превышение, минимальные – у гороха посевного (0,158±0,010 и 0,100±0,009). Ежа сборная максимально извлекает из верхнего слоя полигона Cd, способствуя его очищению, горох посевной практически не реагирует на качество почвогрунтов полигона.

Исследуемые культуры характеризуются различными физиолого-биохимическими свойствами, что обуславливает неоднозначную биоаккумуляцию Pb и Cd. Кроме того, у растений отмечается большая аккумулирующая способность по отношению к Cd, чем по отношению к Pb.

Результаты определения содержания Pb и Cd в растениях позволили рассчитать КБП (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Коэффициент биологического поглощения Pb и Cd 30-суточными растениями, выращенными на верхнем 0–10 см слое почвогрунтов полигона и фоновой почве / The coefficient of biological absorption of Pb and Cd by plants grown during 30 days of growth on the upper 0–10 cm layer of landfill soils and background sod-podzolic soil

Сельскохозяйственная культура Agricultural crop	Почвогрунт, 0–10 см Soil-ground, 0–10 cm		Фоновая почва (контроль), 0–10 см Sod-podzolic soil (control), 0–10 cm	
	Pb	Cd	Pb	Cd
Мятлик луговой <i>Poa pratensis</i>	0,18	0,61	0,2	4,7
Ежа сборная <i>Dactylis glomerata</i>	0,04	1,19	0,1	4,3
Горчица белая <i>Sinapis alba</i>	0,20	0,50	0,35	1,42
Подсолнечник однолетний <i>Helianthus annuus</i>	0,18	0,91	0,44	2,7
Горох посевной <i>Pisum sativum</i>	0,02	0,42	0,004	0,3
Кукуруза обыкновенная <i>Zea mays</i>	0,42	0,83	0,97	3,7

Таблица 3 / Table 3

Высота 30-суточных растений, выращенных в условиях почвогрунта полигона ТКО «Саларьево» и фоновой почвы / The height of 30-days-old plants growing in the soil-ground of the landfill MSW “Salar’evo” and sod-podzolic (SP) soil

Сельскохозяйственная культура Agricultural crop	Почвогрунт Soil-ground	Фоновая почва SP soil (control)	Снижение высоты Lowering the height	
			см / cm	%
Мятлик луговой <i>Poa pratensis</i>	10,0±0,9	17,0±1,5	7,0	70
Ежа сборная <i>Dactylis glomerata</i>	27,0±2,4	32,2±2,8	5,2	19
Горчица белая <i>Sinapis alba</i>	20,0±1,8	22,8±2,1	2,8	14
Подсолнечник однолетний <i>Helianthus annuus</i>	22,0±1,9	28,4±2,5	6,4	29
Горох посевной <i>Pisum sativum</i>	15,0±1,4	17,0±1,5	2,0	13,3
Кукуруза обыкновенная <i>Zea mays</i>	23,0±2,1	51,0±4,5	28,0	122

Фиторемедиационная способность по отношению к ТМ определяется не только степенью их аккумуляции, но в значительной степени зависит от устойчивости растений к загрязняющим веществам. При этом за показатель устойчивости принимали разницу отметок высоты культур, произрастающих на почвогрунтах полигона и фоновой почве. При большей разнице отметок высоты устойчивость признавалась менее выраженной, и наоборот, меньшая амплитуда различий характеризовала более устойчивые растения.

Как показали исследования, наряду с разной биоаккумулирующей способностью изменялась и устойчивость растений, что выражалось в различной интенсивности роста

в опытных вариантах по сравнению с контролем. Разные культуры по-разному реагируют на свойства почвогрунтов, т. е. качество субстрата. Различия при этом составляют от 13,3 до 122% для 30-суточных растений, произрастающих в условиях почвогрунта, по сравнению с фоновой почвой (табл. 3).

Высота изучаемых растений значительно различается в зависимости от вида культур и условий произрастания и составляет от 10,0±0,9 до 27,0±2,4 см при выращивании на отобранном на полигоне почвогрунте и от 17,0±1,5 см до 51,0±4,5 см на фоновой почве. Разница отметок высот по вариантам опыта составляет от 13,3 до 122%. Корреляционный анализ показал устойчивую отрицательную

связь между содержанием Pb и Cd в почве/почвогрунте и высотой растений для мятлика лугового (-0,915 и -0,935 соответственно), кукурузы обыкновенной (-0,946 и -0,962 соответственно). Аналогичная корреляция выявлена между содержанием Pb и Cd в фитомассе и высотой побегов растений: для мятлика лугового (-0,899 и -0,930 соответственно) и кукурузы обыкновенной (-0,849 и -0,961 соответственно).

Различная интенсивность роста исследуемых культур в опытных вариантах по сравнению с контролем, принимаемая за устойчивость изучаемых растений, представляет следующий вид (в порядке снижения): горох посевной, горчица белая > ежа сборная > подсолнечник однолетний > мятлик луговой > кукуруза обыкновенная.

Минимальные различия в интенсивности роста в этот период отмечены у гороха посевного и горчицы белой – соответственно 13,3 и 14,0%. Максимальное различие (122%) – у растений кукурузы обыкновенной.

У кукурузы отмечена чёткая связь между степенью устойчивости и содержанием Pb в фитомассе. Максимальное среди испытанных культур снижение ростового показателя 122% сопровождается максимальным накоплением Pb ($23,6 \pm 2,1$ мг/кг сухой массы) в фитомассе данной культуры.

Таким образом, максимальной способностью очищать от загрязнения свинцом верхний слой полигона обладают растения кукурузы обыкновенной и горчицы белой, что делает их предпочтительными для целей фиторемедиации загрязнённых почвогрунтов полигонов.

По отношению к загрязнению кадмием на первых этапах развития наиболее оптимальной выступает ежа сборная, высокой очищающей способностью также характеризуются растения подсолнечника однолетнего, кукурузы обыкновенной.

Принимая во внимание достаточно высокую биоаккумулирующую способность ежи сборной в отношении Cd и возможность сохранять при этом ростовой показатель (снижение высоты растения под воздействием фактора лишь около 19%), можно рекомендовать эту культуру для целей фиторемедиации загрязнённого почвогрунта полигона.

Отобранные для фиторемедиации растения рекомендуются высаживать на почвогрунтах полигонов, выращивать в течение не менее 30 дней, скашивать надземную биомассу и вывозить для утилизации.

Выводы

1. Для целей фиторемедиации почвогрунтов, загрязнённых соединениями свинца, в условиях полигона ТКО «Саларьево» можно использовать 30-дневные растения кукурузы обыкновенной и горчицы белой. Аккумулирующая способность по отношению к Pb у изученных культур, выращенных на верхнем 10-см слое почвогрунтов полигона, может быть представлена следующим рядом (в порядке возрастания): ежа сборная – горох посевной – подсолнечник однолетний – мятлик луговой – горчица белая – кукуруза обыкновенная.

2. По отношению к кадмию высокой аккумуляющей способностью характеризуется ежа сборная, которая обладает ещё и высокой степенью устойчивости. Высокая очищающая способность отмечается также для подсолнечника однолетнего и кукурузы обыкновенной. Аккумулирующая способность изученных культур возрастает в следующем ряду: горох посевной – горчица белая – мятлик луговой – кукуруза обыкновенная – подсолнечник однолетний – ежа сборная.

3. Устойчивость растений к ТМ в условиях опыта возрастала в ряду: кукуруза обыкновенная < мятлик луговой < подсолнечник однолетний < ежа сборная < горох посевной, горчица белая.

Литература

1. Чекушина Е.В., Каминская А.А. Мониторинг свалок и полигонов // Твёрдые бытовые отходы. 2006. № 11. С. 10–11.
2. Информационный выпуск «О состоянии природных ресурсов и окружающей среды Московской области в 2020 году» [Электронный ресурс] <https://mer.mosreg.ru/download/document/10132535> (Дата обращения: 19.01.22).
3. Список свалок в Москве и Московской области [Интернет-ресурс] <https://musoreco.ru/problemu/svalkimusora.htm> (Дата обращения: 12.10.21).
4. Jimura K., Jto H., Chino M., Morishita T., Hirata H. Behavior of contaminants heavy metals in soil plant system // Proc. Inst. Sem. SEF MIA. Tokyo, 1977. 357 p.
5. Mosina L.V., Chupakina G.N., Maslennikov P.V., Zhandarova J.A., Dovletyarova E.A. Municipal solid waste landfills as a source of mycotoxins contamination in soil // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2020. V. 548. No. 2. Article No. 022063.
6. Кошчик Г.Н. Проблемы и перспективы фиторемедиации почв, загрязнённых тяжёлыми металлами (обзор литературы) // Почвоведение. 2014. № 9. С. 1113–1130.

7. Киреева Н.А., Григориади А.С., Багаутдинов Ф.Я. Фиторемедиация как способ очищения почв, загрязнённых тяжёлыми металлами // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 3. С. 4–10.

8. Янкевич М.И., Хадеева В.В., Мурыгина В.П. Биоремедиация почв: вчера, сегодня, завтра // Биосфера. 2015. Т. 7. № 2. С. 199–208.

9. Хужжиев С.О., Бахрамов И.З., Сайфуллаев А.Ф. Фиторемедиация почв, загрязнённых тяжёлыми металлами // Естественные науки. 2022. № 2 (7). С. 37–45.

10. Маджугина Ю.Г., Кузнецов В.В., Шевякова Н.И. Растения полигонов захоронения бытовых отходов мегаполисов как перспективные виды для фиторемедиации // Физиология растений. 2008. Т. 55. № 3. С. 453–463.

11. Галиулин Р.В., Галиулина Р.А., Кочуров Б.И. Фиторемедиация почв, загрязнённых тяжёлыми металлами // Теоретическая и прикладная экология. 2009. № 4. С. 71–75.

12. Линдиман А.В., Шведова Л.В., Тукумова Н.В., Невский А.В. Фиторемедиация почв, содержащих тяжёлые металлы // Экология и промышленность России. 2008. № 9. С. 45–47.

13. Заболотских В.В., Васильев А.В., Танких С.Н., Карпович Е.Е. Экспериментальные исследования эффективности фиторемедиации почв, загрязнённых нефтью, нефтепродуктами и тяжёлыми металлами // Академический вестник ЕЛПИТ. 2020. Т. 5. № 2 (12). С. 25–47.

14. Гладков Е.А., Гладкова О.В. Экобиоготехнологические подходы для повышения коэффициента биологического поглощения растений в фиторемедиации // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. № 4. С. 32–40.

15. Ольшанская Л.Н., Собгайда Н.А., Валиев Р.Ш. Влияние энергии внешних физических полей на кинетику и механизм фиторемедиации ионов металлов из загрязнённых стоков // Экология и промышленность России. 2014. № 1. С. 13–17.

16. Зырин Н.Г., Обухов А.И., Ковнацкий Е.Ф., Росляков Н.Н. Инструментальные методы в экологическом мониторинге педосферы // Вопросы контроля загрязнения природной среды. Л.: Гидрометеиздат, 1981. С. 144–150.

17. Сираждинов Р.Ж., Кухтин П.В., Левов А.А., Морозов В.Ю., Семкина О.С. Управление в городском хозяйстве. М.: Компания КноРус, 2009. 352 с.

18. Постников Д.А., Кузнецов С.В. Аккумуляция тяжёлых металлов растениями белой горчицы в условиях вегетационного опыта // Экологический вестник Московского региона. 2003. № 2. С. 91–95.

19. Галиулин Р.В., Галиулина Р.А. Особенности фитоэкстракции тяжёлых металлов из загрязнённых почв // Агрохимия. 2010. № 11. С. 80–84.

20. Коротченко И.С., Львова В.А. Миграция кадмия и никеля в растениях-фиторемедиантах // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 11. Часть 2. С. 251–254.

References

1. Chekushina E.V. Monitoring of landfills and landfills // Tverdye bytovye otkhody. 2006. No. 11. P. 10–11 (in Russian).

2. Information issue “On the state of natural resources and the environment of the Moscow Region in 2020” [Internet resource] <https://mep.mosreg.ru/download/document/10132535> (Accessed: 19.01.22) (in Russian).

3. List of landfills in Moscow and the Moscow Region [Internet resource] <https://musoreco.ru/problemsy/svalki-musora.htm> (Accessed: 12.10.21) (in Russian).

4. Jimura K., Jto H., Chino M., Morishitaa T., Hirata H. Behavior of contaminants heavy metals in soil plant system // Proc. Inst. Sem. SEF MIA. Tokyo, 1977. 357 p.

5. Mosina L.V., Chupakina G.N., Maslennikov P.V., Zhandarova J.A., Dovletyarova E.A. Municipal solid waste landfills as a source of mycotoxins contamination in soil // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2020. V. 548. No. 2. Article No. 022063. doi: 10.1088/1755-1315/548/2/022063

6. Koptsik G.N. Problems and prospects of phytoremediation of soils contaminated with heavy metals (literature review) // Soil Science. 2014. No. 9. P. 1113–1130 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X1409007X

7. Kireeva N.A., Grigoriadi A.S., Bagautdinov F.Ya. Phytoremediation as a method of purification of soils contaminated with heavy metals // Theoretical and Applied Ecology. 2011. No. 3. P. 4–10 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2011-3-004-010

8. Yankevich M.I., Khadeeva V.V., Murygina V.P. Bioremediation of soils: yesterday, today, tomorrow // Biosfera. 2015. V. 7. No. 2. P. 199–208 (in Russian).

9. Khuzhzhiev S.O., Bahramov I.Z., Sayfullaev A.F. Phytoremediation of soils contaminated with heavy metals // Estestvennye nauki. 2022. No. 2 (7). P. 37–45 (in Russian). doi: 10.54398/1818507X_2022_2_37

10. Majugina Yu.G., Kuznetsov V.V., Shevyakova N.I. Plants of landfills of municipal waste disposal of megacities as promising species for phytoremediation // Fiziologiya rasteniy. 2008. V. 55. No. 3. P. 453–463 (in Russian).

11. Galiulin R.V., Galiulina R.A., Kochurov B.I. Phytoremediation of soils contaminated with heavy metals // Theoretical and Applied Ecology. 2009. No. 4. P. 71–75 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2009-4-071-075

12. Lindiman A.V., Shvedova L.V., Tukumova N.V., Nevsky A.V. Phytoremediation of soils containing heavy metals // Ekologiya i promyshlennost Rossii. 2008. No. 9. P. 45–47 (in Russian).

13. Zabolotskikh V.V., Vasiliev A.V., Tankikh S.N., Karpovich E.E. Experimental studies of the effectiveness of phytoremediation of soils contaminated with oil, petroleum products and heavy metals // Akademicheskij vestnik ELPIT. 2020. V. 5. No. 2 (12). P. 25–47 (in Russian).

14. Gladkov E.A., Gladkova O.V. Ecobiogotekhnological approaches for increasing the coefficient of biological

absorption of plants in phytoremediation // Proceedings of Tula State University. Earth Sciences. 2019. No. 4. P. 32–40 (in Russian).

15. Olshanskaya L.N., Sobgaida N.A., Valiev R.S. Influence of the energy of external physical fields on the kinetics and mechanism of phytoremediation of metal ions from polluted effluents // *Ekologiya i promyshlennost Rossii*. 2014. No. 1. P. 13–17 (in Russian).

16. Zyrin N.G., Obukhov A.I., Kovnatsky E.F., Roslyakov N.N. Instrumental methods in ecological monitoring of the pedosphere // *Issues of environmental pollution control*. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1981. P. 144–150 (in Russian).

17. Sirazhdinov R.Zh., Kukhtin P.V., Levov A.A., Morozov V.Yu., Semkina O.S. Management in urban economy. Moskva: KnoRus Company, 2009. 352 p. (in Russian).

18. Postnikov D.A., Kuznetsov S.V. Accumulation of heavy metals by white mustard plants in the conditions of vegetation experience // *Ecological Bulletin of the Moscow Region*. 2003. No. 2. P. 91–95 (in Russian).

19. Galiulin R.V., Galiulina R.A. Features of phytoextraction of heavy metals from polluted soils // *Agrokhi-miya*. 2010. No. 11. P. 80–84 (in Russian).

20. Korotchenko I.S., Lvova V.A. Migration of cadmium and nickel in phytoremediant plants // *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*. 2015. No. 11. Part 2. P. 251–254 (in Russian).