

Некоторые аспекты оценки экологического риска почвоподобного материала со свалок

Н.В. Грачева, В.Ф. Желтобрюхов, Ю.Н. Картушина, О. Хебиева

Волгоградский государственный технический университет

Аннотация: В работе проведена сравнительная оценка уровня загрязнения и экологического риска почвоподобного материала (ППМ) со свалок с использованием результатов количественного химического анализа и биотестирования на двух тест-объектах: *Daphnia magna* и *Scenedesmus quadricauda*. Показано, что оценка уровня загрязнения ППМ на основе показателя Z_c приводит к завышенным результатам. Исследование качества ППМ с помощью биотестирования выявило низкую и умеренную токсичность. Наибольший вклад в токсичность ППМ вносит Cu и Zn, что объясняется высокой чувствительностью тест-организмов. ППМ с низкой токсичностью может быть утилизирован для получения грунта-рекультиванта, с умеренной – должен предварительно пройти детоксикацию. Определено, что тяжелые металлы объясняют значительную долю изменения токсичности.

Ключевые слова: свалка, почвоподобный материал, биотестирование, токсичность, уровень загрязнения.

В соответствии с целью устойчивого развития №11 ликвидация свалок является одним из необходимых условий создания комфортной и экологичной городской среды, поскольку свалки являются источниками загрязнения воздуха, почвы, подземных и поверхностных вод. Согласно Распоряжению Правительства РФ от 25.07.2017 N 1589-р «Об утверждении перечня видов отходов производства и потребления, в состав которых входят полезные компоненты, захоронение которых запрещается», проекты ликвидации свалок в обязательном порядке должны включать мероприятия по выделению компонентов, которые должны быть утилизированы. Как показывают исследования, выделение таких ценных компонентов, как стекло, пластик, металл, бумага, является рентабельным лишь в случае их достаточных количеств и простоты подготовки для дальнейшей утилизации [1], что на практике бывает достаточно редко. Значительно повысить экономическую эффективность процесса переработки свалочных масс может

использование мелкой фракции, доля которой в старых свалках превышает 50%. Эта фракция представлена почвоподобным материалом (ППМ), обладающим потенциалом вторичного материального ресурса [2 – 4]. ППК не классифицирован, как отход, и не внесен в Федеральный классификационный каталог отходов (ФККО),

Учитывая, что почвоподобный материал может содержать токсиканты [5, 6], корректная оценка его экологической безопасности является основополагающим условием эффективного управления ППМ. Поскольку состав загрязняющих веществ разнообразен, химическая идентификация всех поллютантов представляет сложную и дорогостоящую задачу. Определение токсичности среды с использованием тест-объектов является эффективным инструментом решения данной проблемы. Биотестирование позволяет снизить неопределенность оценки экологических рисков и учесть неизвестные компоненты, обладающие токсическим действием [7, 8].

Цель настоящего исследования – оценить уровень загрязнения и связанные с этим экологические риски почвоподобного материала со свалки с использованием метода биотестирования.

Исследуемый почвоподобный материал был отобран со свалки, расположенной в промышленной зоне Заречной части Нижнего Новгорода. В ППМ были определены такие показатели, как pH, валовое содержание тяжелых металлов и мышьяка, бенз(а)пирена (BaP), нефтепродуктов (НП), а также проведено исследование на острую токсичность с помощью двух тест-объектов: рачков *Daphnia magna* и водоросли *Scenedesmus quadricauda*. Исследования проведены испытательной лабораторией ОО по Волгоградской области «Центр Экологического Контроля». В Таблице 1 представлены результаты исследования почвоподобного материала.

Таблица 1

Результаты химического анализа ППМ (мг/кг)

№	pH	Pb	Cd	Ni	Cu	Zn	Cr	BaP	нефтепродукты
1	7,70	20,0	0,823	22,2	18,9	87,6	58,3	0,015	5220
2	7,60	21,0	0,922	34,3	15,1	94,4	45,3	0,008	4150
3	7,54	25,0	0,803	31,0	20,10	108	33,0	0,005	2040
4	8,08	21,1	1,31	34,0	84,0	110	94,0	0,019	910
5	7,71	20,1	1,10	28,0	79,0	86,0	51,1	0,011	1180
6	7,62	10,1	0,905	18,0	61,1	71,1	20,0	0,003	570
7	7,33	10,2	2,00	71,0	108	54,0	18,0	0,024	4920
8	7,08	13,0	0,808	52,3	64,1	61,6	14,3	0,003	840
9	7,52	12,6	0,905	61,4	76,30	58,0	19,7	0,003	2210
10	7,03	26,2	21,4	36,1	22,0	52,0	105	0,009	1730
11	7,21	21,0	11,0	30,3	18,0	51,0	88,0	0,002	2160
12	8,01	13,1	8,1	19,0	11,0	50,0	36,0	0,003	700
13	7,15	59,0	30,5	301	456	965	240	0,018	3790
14	7,08	31,0	48,4	280	610	996	159	0,020	6280
15	7,21	20,0	69,9	331	840	2038	105	0,009	8430
16	7,28	16,0	79,9	340	905	1900	73,0	0,003	5950
17	7,32	48,0	31,2	194	301	810	21,6	0,023	3000
18	7,27	31,1	20,4	180	410	950	14,0	0,009	2140
19	7,17	24,0	26,9	383	542	983	11,4	0,003	990
20	7,20	32,0	16,5	75,0	408	708	17,2	0,002	2080
21	7,48	21,0	10,2	80,2	204	600	36,2	0,006	4420
22	7,04	17,0	8,0	64,2	120	490	40,0	0,005	6050
23	7,46	11,3	4,10	32,0	94,2	280	59,1	0,002	2840
24	7,40	10,1	7,4	21,3	88,0	61,3	10,3	0,008	1040
25	7,15	10,3	5,2	29,0	71,3	50,0	5,7	0,005	850
26	7,21	10,9	3,00	17,0	54,3	50,0	5,1	0,002	490
среднее	7,38	21,35	15,8	106,4	218,5	452,5	53,09	0,008	2884

Концентрации Hg и As во всех образцах были ниже нижнего предела обнаружения и в Таблице 1 не представлены. Фоновые значения параметров были определены на следующих уровнях: pH – 7,16, Pb – 3,50 мг/кг, Cd – 0,598 мг/кг, Ni – 3,45 мг/кг, Cu – 5,3 мг/кг, Zn – 7,5 мг/кг, Cr – 1,89 мг/кг, BaP – 0,001 мг/кг, нефтепродукты – 300 мг/кг.

Полученные данные проанализированы на превышение ПДК/ОДК в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Установлено, что Pb и бенз(а)пирен не превышают нормативных значений. Превышения Ni, Cu и Zn находятся в диапазоне от 1,3ОДК до 2,0 ОДК, что соответствует слабому загрязнению. Основной риск ППМ связан с Cd, концентрация которого превышает установленные нормативы в 7,9 раз. Оценить кратность превышения ПДК хромом представляется затруднительным, поскольку согласно СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» нормируется содержание только Cr (VI). Содержание нефтепродуктов в почве не нормируется. Существуют разные подходы к определению референсных уровней нефтепродуктов в почвах, которые изменяются в диапазоне от 50 мг/кг до 4000 мг/кг [9]. В данной работе за референсный уровень принята концентрация, установленная на основе микробиологических данных и равная 600 мг/кг. При этом нефтепродукты превысили референсное значение в 4,8 раза. С учетом содержания нефтепродуктов в ППМ (2883 мг/кг или 0,28%), уровень загрязнения может быть классифицирован от слабого до среднего. Значения pH незначительно отличались от фонового.

Для оценки комплексного загрязнения ППМ согласно СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению

безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» были рассчитаны для всех загрязнителей индексы концентрации и интегральный показатель Z_c , среднее значение которого составило 204. Это означает, что уровень загрязнения характеризуется чрезвычайно опасной категорией.

В Таблице 2 представлены результаты биотестирования с указанием безвредной кратности разведения и токсичности (оказывает острое токсическое действие (ООТД), не оказывает острого токсического действия (НООТД)). Хотя ППМ не классифицирован, как отход, для удобства проведения корреляционного анализа были определены классы опасности на основании кратности разведения водной вытяжки, при которой вредное воздействие на гидробионты отсутствует (Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 31 марта 2025 г. № 158 «Об утверждении критериев отнесения отходов к I-V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду»). Как видно из Таблицы 2, более 65% образцов ППМ (17) могут быть отнесены к материалам, которые представляют малую опасность для окружающей среды и здоровья человека. Они имеют низкий уровень токсичности, но требуют правильных мер утилизации. Часть образцов ППМ (9) характеризуется как умеренно опасные, то есть могут вызывать изменения в экосистеме, требуют значительного времени для восстановления, и способны накапливаться в окружающей среде.

Таким образом, только часть ППМ может быть утилизирована для получения товарного продукта, например, грунта для рекультивации. А использование другой части возможно только при проведении предварительной детоксикации [10].

Таблица 2

Результаты токсикологического анализа ППМ

	<i>Daphnia magna</i>			<i>Scenedesmus quadricauda</i>		
	Кратность разведения	Токсичность	Класс опасности	Кратность разведения	Токсичность	Класс опасности
1	100	ООТД	4	50	ООТД	4
2	100	ООТД	4	50	ООТД	4
3	100	ООТД	4	50	ООТД	4
4	100	ООТД	4	50	ООТД	4
5	100	ООТД	4	100	ООТД	4
6	100	ООТД	4	100	ООТД	4
7	100	ООТД	4	50	ООТД	4
8	100	ООТД	4	100	ООТД	4
9	100	ООТД	4	100	ООТД	4
10	100	ООТД	4	100	ООТД	4
11	100	ООТД	4	100	ООТД	4
12	0	НООТД	5	0	НООТД	5
13	1000	ООТД	3	1000	ООТД	3
14	1000	ООТД	3	1000	ООТД	3
15	1000	ООТД	3	1000	ООТД	3
16	1000	ООТД	3	1000	ООТД	3
17	1000	ООТД	3	1000	ООТД	3
18	1000	ООТД	3	1000	ООТД	3
19	1000	ООТД	3	1000	ООТД	3
20	1000	ООТД	3	1000	ООТД	3
21	1000	ООТД	3	1000	ООТД	3
22	100	ООТД	4	50	ООТД	4
23	100	ООТД	4	50	ООТД	4
24	100	ООТД	4	50	ООТД	4
25	100	ООТД	4	50	ООТД	4
26	0	НООТД	5	0	НООТД	5

Сравнение оценок опасности почвоподобного материала, полученных по результатам химического анализа и биотестирования, показало их значительное отличие. Рассчитанные значения Z_c очень высоки по сравнению с результатами биотестирования.

Корреляционный анализ выявил положительную корреляционную зависимость концентраций Cd, Ni, Zn, Cu ($r=0,85-0,97$) и Cr и Pb ($r=0,59$) (Таблица 3). Также отмечается умеренная корреляционная зависимость между Cd, Ni, Zn, Cu и нефтепродуктами ($r=0,49-0,61$). Это может быть связано с общим носителем этих веществ в ППМ, например – гумусом. Умеренную корреляцию показали также свинец и бенз(а)пирен ($r=0,59$).

Таблица 3

Корреляционная матрица Пирсона (уровень значимости $p=0,05$)

	pH	Pb	Cd	Ni	Cu	Zn	Cr	BaP	НП	Класс опасности
pH	1	-0,24	-0,39	-0,41	-0,39	-0,36	-0,14	0,09	-0,26	0,40
Pb	-0,24	1	0,34	0,49	0,36	0,39	0,59	0,49	0,18	-0,61
Cd	-0,39	0,34	1	0,85	0,93	0,93	0,45	0,13	0,61	-0,66
Ni	-0,41	0,49	0,85	1	0,92	0,89	0,43	0,21	0,49	-0,77
Cu	-0,39	0,36	0,93	0,92	1	0,97	0,36	0,12	0,57	-0,78
Zn	-0,36	0,39	0,93	0,89	0,97	1	0,36	0,09	0,64	-0,78
Cr	-0,14	0,59	0,45	0,43	0,36	0,36	1	0,41	0,42	-0,33
BaP	0,09	0,49	0,13	0,21	0,12	0,09	0,41	1	0,33	-0,27
НП	-0,26	0,18	0,61	0,49	0,57	0,64	0,42	0,33	1	-0,48
Класс опасности	0,40	-0,61	-0,66	-0,77	-0,78	-0,78	-0,33	-0,27	-0,48	1

Все металлы, за исключением Cr, имели умеренную и высокую отрицательную корреляционную зависимость с установленным классом опасности: Cd ($r=-0,66$), Ni ($r=-0,77$), Zn ($r=-0,78$), Cu ($r=-0,78$) и Cr и Pb ($r=-0,61$), то есть чем выше концентрация металла, тем выше класс опасности и выше токсичность ППМ. Наибольший вклад в токсичность вносят Cu

($R^2=0,611$) и Zn ($R^2=0,601$), что объясняется высокой чувствительностью тест-организмов *Daphnia magna* и *Scenedesmus quadricauda* к этим металлам. Эти элементы проявляют выраженную токсичность по отношению к тест-организмам даже при умеренных концентрациях. Никель ($R^2=0,592$) также показал значительное влияние. Более низкие значения коэффициента детерминации для Cd ($R^2=0,435$) могут быть связаны с его ограниченной биодоступностью, обусловленной нахождением элемента в связанном состоянии. Низкий вклад в токсичность Pb ($R^2=0,375$) обусловлен его низкой концентрацией, которая не превышает ОДК, и связанным состоянием. Значения коэффициента детерминации в диапазоне 0,6 указывают на то, что 60% изменений токсичности объясняются изменениями концентрации металлов, а 40% изменений зависит от других факторов.

Таким образом, показано, что оценка уровня загрязнения ППМ на основе показателя Zс приводит к завышенным результатам. Исследование качества ППМ с помощью биотестирования на 2 тест-объектах выявило низкую и умеренную токсичность. Часть ППМ с низкой токсичностью может быть утилизирована для получения грунта-рекультиванта. Другая часть – с умеренной токсичностью, должна предварительно пройти детоксикацию. Установлено, что наибольший вклад в токсичность ППМ вносит Cu и Zn, что объясняется высокой чувствительностью тест-организмов. Определено, что тяжелые металлы объясняют значительную долю изменения токсичности, но не всю. Биотестирование является необходимым компонентом исследования при принятии решения о использовании ППМ.

Литература

1. Rosendal, R., 2009. Process, Feasibility, Economy, Benefits and Limitations. København: RenoSam, pp: 1-52.
2. Chandana N., Goli V. S. N. S., Mohammad A., Singh D. N. Characterization

and Utilization of Landfill-Mined-Soil-Like-Fractions (LFMSF) for Sustainable Development: A Critical Appraisal // Waste and Biomass Valorization. 2021. №12. pp. 641– 662.

3. Datta M., Somani M., Ramana G. V., Sreekrishnan, T. R. Feasibility of re-using soil-like material obtained from mining of old MSW dumps as an earth-fill and as compost // Process Safety and Environmental Protection. 2021. №147. pp. 477 – 487.

4. Rawat P., Mohanty S. Parametric study on dynamic characterization of municipal solid waste fine fractions for geotechnical purpose // Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 2022, №26(1), 04021047. URL: 10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000659

5. Somani M., Datta M., Ramana G., Sreekrishnan T. Investigations on fine fraction of aged municipal solid waste recovered through landfill mining: Case study of three dumpsites from India // Waste Management & Research. 2018. №36 (8). pp. 744 –755.

6. Калинин А.А., Грачева Н.В., Сиволобова Н.О., Селезнева Н.А. Исследование мелкой фракции свалочных масс свалки в границах г. Волгограда // Инженерный вестник Дона, 2021, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2021/7378.

7. Orupõld K., Somani M., Kaczala F, Hogland M., Bhatnagar A., Hogland W., Saaremäe E., Kriipsalu M. Ecotoxicity Assessment of Fine Fractions Obtained from Landfill Mining // Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 2022, № 26(4), 04022030. URL: 10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000715

8. Masi S., Caniani D., Grieco E., Lioi D.S., Mancini I.M. Assessment of the possible reuse of MSW coming from landfill mining of old open dumpsites // Waste management, 2014. №34(3). pp. 702-710.

9. Pikovskii Yu.I., Gennadiev, A.N., Chernyanskii S., Sakharov, G.N. The

problem of diagnostics and standardization of soil contamination with petroleum hydrocarbons // Eurasian Soil Science. 2003. №36. pp. 1010-1017.

10. Zheltobryukhov V.F., Tuzhikhov O.O., Khantimirova S.B. Reclamation of an unauthorized dump of production and consumption waste with the receipt of soil-recultivator from the screening of landfill masses // AIP Conference Proceedings. VII International Conference «Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures». Ural Federal University. – [USA: AIP Publishing], 2023. Article 020037 URL: 10.1063/5.0121409.

References

1. Rosendal, R., 2009. Process, Feasibility, Economy, Benefits and Limitations. København: RenoSam, pp. 1-52.

2. Chandana N., Goli V. S. N. S., Mohammad A., Singh D. N. Waste and Biomass Valorization. 2021. №12. pp. 641– 662.

3. Datta M., Somani M., Ramana G. V., Sreekrishnan, T. R. Process Safety and Environmental Protection. 2021. №147. pp. 477 – 487.

4. Rawat P., Mohanty S. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 2022, №26 (1), 04021047. URL: 10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000659

5. Somani M, Datta M, Ramana G, Sreekrishnan T. Waste Management & Research. 2018. №36 (8). pp. 744 –755.

6. Kalinin A.A., Gracheva N.V., Sivolobova N.O., Selezneva N.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, № 12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2021/7378.

7. Orupõld K., Somani M., Kaczala F, Hogland M., Bhatnagar A., Hogland W., Saaremäe E., Kriipsalu M. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 2022, № 26(4), 04022030. URL: 10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000715

8. Masi S., Caniani D., Grieco E., Lioi D.S., Mancini I.M. Waste management, 2014. №34 (3). pp. 702-710.



9. Pikovskii Yu.I., Gennadiev, A.N., Chernyanskii S., Sakharov, G.N. Eurasian Soil Science. 2003. №36. pp. 1010-1017.

10. Zheltobryukhov V.F., Tuzhikhov O.O., Khantimirova S.B. AIP Conference Proceedings. VII International Conference «Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures». Ural Federal University, USA: AIP Publishing, 2023. Article 020037 URL: 10.1063/5.0121409.

Дата поступления: 5.08.2025

Дата публикации: 25.09.25