

Новый подход к оценке уровня загрязнения тяжёлыми металлами почвоподобной фракции со свалок

Н.В. Грачева¹, Н.О. Сиволобова¹, Ю.Н. Картушина¹, В.М. Грачев²,
В.В. Люшина¹, Е.В. Балбекина¹

¹Волгоградский государственный технический университет

²Волгоградский государственный аграрный университет

Аннотация: В работе представлен новый подход к оценке уровня загрязнения тяжёлыми металлами почвоподобной фракции со свалок с использованием моделирования методом Монте-Карло на примере свалок, расположенных в границах Волгограда. Установлено, что с вероятностью 36,2% уровень загрязнения почвоподобной фракции со свалки, расположенной в Ворошиловском районе, будет соответствовать умеренно опасному, а с вероятностью 63,8% - опасному. Экономически обоснованно выделение почвоподобной фракции с меньшим уровнем загрязнения с целью ее детоксикации и дальнейшего использования при рекультивации территории. Для почвоподобной фракции со свалки, расположенной в Тракторозаводском районе, уровень загрязнения определен, как чрезвычайно опасный и опасный с вероятностью 87,1% и 3,1%, соответственно. Показано, что из почвоподобной фракции нельзя выделить полезную и возможную к использованию часть. Данная почвоподобная фракция должна быть обезврежена и размещена на объектах размещения отходов. Представленный подход позволяет повысить точность оценок уровня загрязнения и эффективность управления почвоподобной фракцией при ликвидации свалок.
Ключевые слова: свалка, почвоподобная фракция, тяжёлые металлы, уровень загрязнения, метод Монте-Карло, моделирование.

В настоящее время в рамках инженерно-экологических изысканий при подготовке проектной документации по ликвидации свалок, согласно СП 502.1325800.2021 «Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ» химическое загрязнение грунтов оценивают в соответствии с СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (пункт 22) по суммарному показателю химического загрязнения Z_c , характеризующему уровень неблагоприятного воздействия на здоровье населения.

Поскольку на сегодняшний день в нормативно-технической документации отсутствуют рекомендации по расчету суммарного показателя химического загрязнения грунтов, обычно используют детерминированные методы. При этом за основу в расчетах берут наиболее вероятные значения - средние значения концентраций тяжелых металлов [1 – 3]. Однако распределение металлов в свалочных массах характеризуется высокой неопределенностью и неравномерностью, что обусловлено составом и глубиной залегания отходов, возрастом свалки, гидрологическими и метеорологическими условиями [4 – 6]. Отсутствие учета этих факторов может привести к ошибочному (завышенному или заниженному) результату, и как следствие, к принятию неэффективных или опасных решений относительно обращения с грунтом (почвоподобной фракцией) при ликвидации свалок.

Вероятностный подход позволит учесть изменчивость и неопределенность распределения химических элементов. Широкие возможности в оценке неопределенности и изменчивости, связанные с оценками риска для загрязненных участков, предоставляет анализ Монте-Карло [7 – 9]. Метод Монте-Карло – один из широко применяемых статистических методов моделирования, основанный на генерации случайных чисел, который позволяет оценить вероятности и свойства сложных систем.

При вероятностном подходе с помощью моделирования методом Монте-Карло для каждого сгенерированного «случайного» входного параметра из заранее определенного диапазона его значений рассчитывается выходное значение оцениваемого параметра. Эта операция повторяется многократно, в результате чего генерируется распределение вероятности для выходного параметра вместо точечного значения [7]. Оценка загрязнения

почвоподобной фракции со свалок с помощью метода Монте-Карло позволит определить вероятность превышения реперных значений загрязнения, указанных в нормативно-технической документации.

Цель настоящего исследования – оценка уровня загрязнения грунта (почвоподобной фракции) со свалок с помощью моделирования методом Монте-Карло и определение возможности его применения для рекультивации территории.

Для расчетов были использованы исходные данные, представленные в работах Калинина и др. (2021) и Селезневой и др. (2023) [3, 10]. В соответствии с СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания», показатель Z_c рассчитывали только по элементам, имеющим превышения предельно допустимых или ориентировочно допустимых концентраций: Cd, Cu и Ni. Для каждого химического элемента, используемого при расчете индекса Z_c , определяли минимальное и максимальное значение концентрации для определения диапазона генерации «случайных» чисел (таблица 1). Моделирование методом Монте-Карло было выполнено за 100 000 итераций с использованием надстройки «Моделирование Монте – Карло» в Microsoft Excel 2019.

Значение Z_c рассчитывали по формуле:

$$Z_c = \sum K_{ki} - (n - 1) \quad (1)$$

где K_{ki} - коэффициент концентрации $K_{ki} = C_i/C_{iф}$; C_i и $C_{iф}$ - фактическое и фоновое содержание в почве i -го элемента; n - число элементов.

Фоновые значения концентраций тяжелых металлов с учетом зональных типов почвы определены в соответствии с Письмом Минприроды РФ № 04-25 и Роскомзема № 61-5678 от 27.12.93 «О порядке определения

размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами»: для Cd – 0,16 мг/кг, Cu – 20 мг/кг и Ni – 35 мг/кг.

Таблица №1

Минимальные и максимальные концентрации Cd, Cu и Ni в почвоподобной фракции со свалок в границах Волгограда (мг/кг)

Элемент	Концентрация	Свалка, расположенная в Ворошиловском районе [3]	Свалка, расположенная в Тракторозаводском районе [10]
Cd	минимальная	2,30	0,001
	максимальная	8,90	86,50
Cu	минимальная	2,37	5,30
	максимальная	89,44	132,00
Ni	минимальная	0,12	0,20
	максимальная	123,02	142,00

В таблице 2 представлены реперные значения уровней загрязнения почвы по суммарному показателю Z_c в соответствии с СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

Таблица 2

Реперные значения уровня загрязнения почвы по суммарному показателю Z_c

Уровень загрязнения	Значение показателя
Допустимый	$Z_c < 16$
Умеренно опасный	$16 < Z_c < 32$
Опасный	$32 < Z_c < 128$
Чрезвычайно опасный	$Z_c > 128$

На рисунке 1 представлено гипотетическое кумулятивное распределение вероятностей значений суммарного показателей Z_c , полученных методом Монте-Карло для почвоподобной фракции со свалок, расположенных в Ворошиловском и Тракторозаводском районах Волгограда.

Полученные данные указывают на то, что с вероятностью 36,2%, уровень загрязнения почвоподобной фракции со свалки, расположенной в Ворошиловском районе, будет соответствовать умеренно опасному (рис. 1а). Согласно данным, полученным при расчете суммарного показателя Z_c по средним значениям концентраций тяжелых металлов, уровень загрязнения почвоподобной фракции также отнесен к умеренному ($Z_c=30,03$) [3].

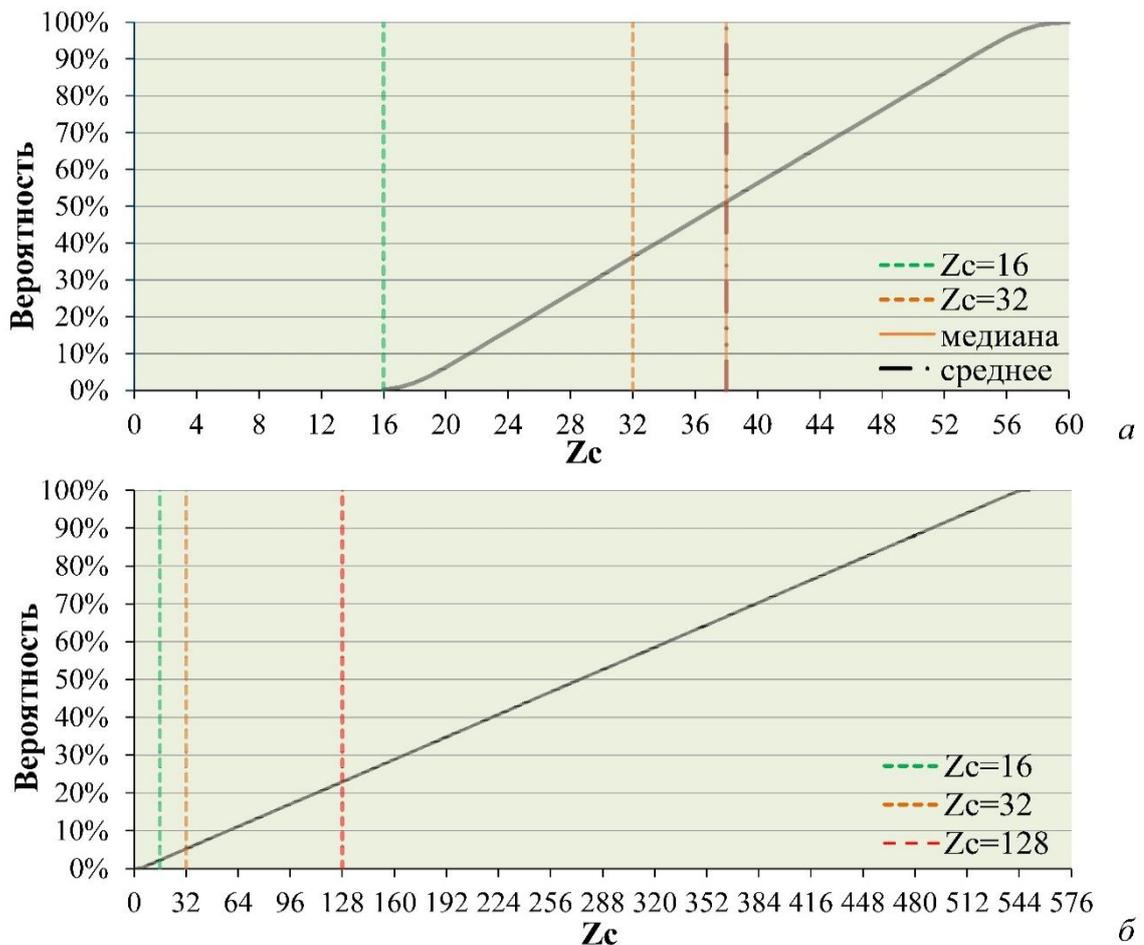


Рис. 1. – Гипотетическое кумулятивное распределение вероятностей значений суммарного показателей Z_c , полученных методом Монте-Карло для почвоподобной фракции со свалок, расположенных в Ворошиловском (а) и Тракторозаводском (б) районах Волгограда

Однако, необходимо отметить, что с вероятностью 63,8% загрязнение почвоподобной фракции будет соответствовать опасному уровню и будет

оказывать значительное негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека. Для приведения почвоподобной фракции с опасным уровнем загрязнения к допустимому уровню загрязнения, необходимы значительные материальные и временные затраты, что экономически нецелесообразно. Поскольку медианное (38,00) и среднее (38,01) значение показателя Z_c , определенное методом Монте-Карло, также свидетельствуют об опасном, а не умеренно-опасном уровне загрязнения почвоподобной фракции в целом, целесообразно выделение почвоподобной фракции с меньшим уровнем загрязнения с целью ее детоксикации и дальнейшего использования при рекультивации территории. Почвоподобная фракция с опасным уровнем загрязнения должна быть обезврежена, например, методом капсулирования, и может быть использована в качестве пересыпного материала на объектах размещения отходов.

Для почвоподобной фракции со свалки, расположенной в Тракторозаводском районе, уровень загрязнения определен, как чрезвычайно опасный и опасный с вероятностью 87,1% и 3,1%, соответственно (рис. 1б). Это, в целом, согласуется с данными, полученными при расчете Z_c по средним значениям концентраций тяжелых металлов [10].

Однако вероятностная оценка уровня загрязнения в данном случае показывает, что из почвоподобной фракции нельзя выделить полезную и возможную к использованию часть, а непосредственное использование данной почвоподобной фракции при рекультивации не допустимо. Проведение детоксикации с целью применения для рекультивации территории является экономически нецелесообразным, поэтому почвоподобная фракция должна быть обезврежена и размещена на объектах размещения отходов.

Таким образом, предложенный вероятностный подход к оценке уровня загрязнения почвоподобной фракции тяжелыми металлами с использованием моделирования методом Монте-Карло позволяет повысить точность выводов и эффективность управления почвоподобной фракции при ликвидации свалок с последующей рекультивацией земельных участков. Этот метод может быть применен также при оценке уровня загрязнения почвоподобной фракции со свалок и другими поллютантами.

Литература

1. Хантимирова С.Б. Мониторинг загрязнения почвы на объекте размещения отходов Ворошиловского района города Волгограда // Инженерный вестник Дона, 2021, № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2021/7149
2. Хантимирова С.Б., Мишустин О.А., Желтобрюхов В.Ф. Инженерно-экологические изыскания на объекте размещения отходов на территории г. Нижний Новгород // Инженерный вестник Дона, 2022, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7520
3. 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
4. Hogland W. Remediation of an old landfill: soil analysis, leachate quality and gas production // Environmental Science & Pollution Research International. 2002. Vol. 1. P. 49–54.
5. Kurian J., Esakku S., Palanivelu K., Selvam A. Studies on landfill mining at solid waste dumpsites in India // Ninth International Waste Management and Landfill Symposium. In Proceedings Sardinia, Sardinia, Italy, 2003. Vol. 3, pp.



248-255. URL:
researchgate.net/publication/242238271_Studies_on_landfill_mining_at_solid_waste_dumpsites_in_India (accessed 12/12/23).

6. Zhao, Y., Song, L., Huang, R. et al. Recycling of aged refuse from a closed landfill // Waste Management and Research. 2007. 25(2). P. 130–138.

7. Hayse J. Using Monte Carlo Analysis in Ecological Risk Assessments URL:
researchgate.net/publication/228836732_Using_Monte_Carlo_Analysis_in_Ecological_Risk_Assessments (accessed 12/12/23).

8. Hommen U., Dülmer U., Ratte H.T. Monte-Carlo Simulations in Ecological Risk Assessment / Grasman J., van Straten G. (eds) // Predictability and Nonlinear Modelling in Natural Sciences and Economics. Springer, Dordrecht. URL: doi.org/10.1007/978-94-011-0962-8_39

9. Pawełczyk A., Božek F., Zuber M. Environmental risk - case studies. CZECH-POL TRADE: Prague, 2018. 125 p.

10. Селезнева Н.А., Желтобрюхов В.Ф., Грачева Н.В., Хантимирова С.Б., Мишустин О.А., Околелова А.А., Дородникова И.М. Оценка уровня загрязнения тяжёлыми металлами почвоподобной фракции свалки в границах северного промышленного узла Волгограда // Инженерный вестник Дона, 2023, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8317

References

1. Khantimirova S.B. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2021/7149

2. Khantimirova S.B., Mishustin O.A., Zheltobryukhov V.F. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7520

3. 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

4. Hogland W. Environmental Science & Pollution Research International. 2002. Vol. 1. pp. 49-54.

5. Kurian J., Esakku S., Palanivelu K., Selvam A. Ninth International Waste Management and Landfill Symposium. In Proceedings Sardinia, Sardinia, Italy, 2003. Vol. 3, pp. 248-255. URL:
researchgate.net/publication/242238271_Studies_on_landfill_mining_at_solid_waste_dumpsites_in_India (accessed 12/12/23).

6. Zhao, Y., Song, L., Huang, R., Song L., Li X. Waste Management and Research. 2007. 25(2). pp. 130-138.

7. Using Monte Carlo Analysis in Ecological Risk Assessments URL:
researchgate.net/publication/228836732_Using_Monte_Carlo_Analysis_in_Ecological_Risk_Assessments (accessed 12/12/23).

8. Hommen U., Dülmer U., Ratte H.T. Monte-Carlo Simulations in Ecological Risk Assessment. Grasman J., van Straten G. (eds). Predictability and Nonlinear Modelling in Natural Sciences and Economics. Springer, Dordrecht. URL: doi.org/10.1007/978-94-011-0962-8_39

9. Pawełczyk A., Božek F., Zuber M. Environmental risk - case studies. CZECH-POL TRADE: Prague, 2018. 125 p.

10. Selezneva N.A., Zheltobryukhov V.F., Gracheva N.V., Khantimirova S.B., Mishustin O.A., Okolelova A.A., Dorodnikova I.M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8317

Дата поступления: 11.12.2023

Дата публикации: 23.01.2024