

## УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

УДК 628.472.35

### ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ, ПРОШЕДШИХ СТАДИЮ КОМПСТИРОВАНИЯ

© 2025 г. Е. С. Соломатина<sup>1,\*</sup>, Г. А. Зарницын<sup>1</sup>, Т. В. Маликова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН, Уланский пер. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

\*E-mail: baira-lala@mail.ru

Поступила в редакцию 24.10.2024 г.

После доработки 20.11.2024 г.

Принята к публикации 25.12.2024 г.

В статье представлены результаты лабораторных исследований грунтов, полученных при компстировании пищевых и органических отходов. При исследовании рассматривались две валовые пробы грунта, отобранные в мае 2024 г. на комплексе по переработке твердых коммунальных отходов в Московской области. Основная цель — изучение свойств грунта и морфологии твердых частиц после его компстирования. В лабораторных условиях проведено определение естественной влажности грунта, плотности твердых частиц, содержания органических веществ, изучение частиц грунта под бинокуляром.

**Ключевые слова:** полигон ТКО, компстирование, физические свойства органических отходов, органическая составляющая, плотность твердых частиц техногрунта, гранулометрический состав, форма частиц

DOI: 10.31857/S0869780925020068 EDN: EPZDUG

#### ВВЕДЕНИЕ

Формирование и накопление твердых коммунальных отходов (ТКО) является общемировой социальной, экономической и экологической проблемой. Увеличение доли городского населения, рост крупных агломераций, изменение структуры сельского хозяйства в сторону автоматизации, экономический и технологический рост стран приводят не только к росту общего объема коммунальных отходов, но и к изменению их морфологии. Переход к одноразовым изделиям в медицине, общественном питании, быту и других сферах человеческой жизни, широкое распространение полимерных материалов еще более увеличивает количество мусора [2]. По оценкам ООН, объем отходов с начала 1990-х к 2025 г. возрос в 4–5 раз. Так, если в 1950-е годы в мире производилось около 5 млн т. пластиковых материалов, то сейчас — около 100 млн т [1]. В некоторых странах потенциальным решением проблемы складирования и хранения отходов является отправление отходов на вторичную переработку [4]. Несмотря на это, проблема с уже ранее накопленными в течение десятилетий отходами, представляющими собой серьезную угрозу для окружающей среды и здоровья населения, продолжает быть актуальной [5].

В Европе широко используются переработка, компстирование и сжигание мусора с восстановлением энергии. Значительные инвестиции направлены на развитие переработки и технологий WTE (Waste-to-Energy). В США более 50% отходов захоранивается, остальная часть перерабатывается или утилизируется через сжигание с восстановлением энергии. Азия сталкивается с серьезными проблемами в управлении отходами: распространены небезопасные практики, такие как открытое захоронение и сжигание. Развитые страны, например, Япония и Южная Корея, активно используют переработку и технологии WTE [3]. В России преобладает захоронение отходов, при этом начиная с 2019 г. предъявляются строгие требования к сортировке и переработке ТКО. Государственными стандартами уставлено требование к утилизации органических отходов с помощью компстирования. Техногрунт, получаемый после такой обработки, используют в качестве пересыпки отходов при складировании.

Таким образом, в России на текущий момент сформировались два типа полигонов ТКО: “старые”, где отсыпка отходов велась хаотично, и “новые” с выраженным слоистым строением.

Для проектирования и прогноза сценария функционирования “новых” полигонов необходимы сведения о свойствах, строении и типах техногрунтов, используемых в качестве пересыпки.

### СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМАХ КОМПСТИРОВАНИЯ

Оптимальный способ обращения с органическими и пищевыми отходами, содержащимися в ТКО, — утилизация методом компстирования. В современной практике наибольшее распространение получила утилизация органических компонентов ТКО методами аэробного компстирования. В процессе компстирования органические отходы проходят несколько фаз аэробной ферментации и вызревания с получением стабилизированного “зрелого компоста”.

Отходы укладываются в бурты в закрытых бетонных ваннах. Система закрытого компстирования в ваннах включает установку по аэрации компстируемого сырья как необходимый конструктивный элемент для ускоренного разложения органических веществ. В нижней части ванны установлен аэрационный пол для подачи воздуха под избыточным давлением, технологически совмещенный с системой канализации, обеспечивающей удаление стоков (фильтрата), образующегося в процессе компстирования. Для аэрации используется вентилятор среднего давления, подающий атмосферный воздух через интегрированные в пол площадку аэрационные каналы непосредственно внутрь бурта, т.е. в компстируемый материал.

Контроль процесса компстирования осуществляется по следующим параметрам: влажность,

концентрация кислорода, температура, парциальное давление кислорода. Изоляция процесса и исключение выбросов и сбросов загрязняющих веществ в окружающую среду, достижения параметров регулируемого аэробного процесса достигается путем применения изолирующего материала — полупроницаемой мембраны. Мембрана обеспечивает проницаемость для воздуха (в том числе  $\text{CO}_2$ ) и паров воды, исключая выбросы в окружающую среду углеродородов, микроскопической пыли и бактерий.

Для дальнейшего использования полученный продукт на типовых объектах компстирования просеивают на барабанном грохоте для отделения инородных крупных включений. Результатом данной обработки является производство техногрунта, пригодного для использования только в качестве изолирующего материала для полигонов ТКО.

### МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ

Для исследования в мае 2024 г. были отобраны две валовые пробы на комплексе по переработке твердых коммунальных отходов в Московской области. Первая проба прошла этап компстирования зимой и пролежала в отвале до мая (рис. 1а). Вторая проба отобрана непосредственно после этапа компстирования и грохочения (рис. 1б). Наименование и характеристика отобранных проб приведены в табл. 1.

В лабораторных условиях определены естественная влажность техногрунта и плотность твердых частиц (рис. 2а), содержание органических веществ и крупнообломочной фракции (рис. 2б), а также проведено изучение частиц техногрунта под биноклем.



Рис. 1. Фотографии отобранных проб: а – проба 1, б — проба 2.

Таблица 1. Характеристика отобранных проб техногрунта

Наименование пробы	Характеристика пробы
Проба 1	Этап компостирования пройден зимой, проба отобрана до процесса грохочения
Проба 2	Этап компостирования пройден весной, проба отобрана после процесса грохочения



Рис. 2. Определение: плотности твердых частиц (а) и содержания крупнообломочной фракции ситовым методом (б).

Определения физических свойств грунтов выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ 5180-2015. Определение естественной влажности  $W_e$  осуществлялось методом высушивания до постоянной массы, плотности твердых частиц  $\rho_s$  — пикнометрическим методом, содержания органических веществ — методом прокаливания.

При визуальном анализе установлено преобладание в грунтах песчаной фракции. В связи с этим определение содержания крупнообломочной фракции осуществлялось ситовым методом согласно ГОСТ 12536-2014. Определение содержания проводилось для частиц диаметром  $>10.0$  мм,  $10.0-5.0$  мм,  $5.0-2.0$  мм,  $2.0-1.0$  мм и  $<1.0$  мм. Определение содержания более мелких частиц не осуществлялось в связи с разрушением мелких частиц грунта при интенсивном механическом воздействии.

Метод оптической микроскопии применялся с целью изучения формы, размера частиц, а также для получения сведений о соотношении частиц различного размера в техногрунтах, отобранных до и после процесса грохочения. Исследование частиц грунта под бинокулярным микроскопом Levenhuk DTX 500 LCD проводилось с увеличением до  $\times 500$ , но в основном частицы грунта до и после грохочения из-за их неоднородности и асимметричности анализировались при увеличении  $\times 10$ .

### АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно результатам определения содержания крупнообломочной фракции, в пробе 1 преобладают фракции размером  $<1.0$  мм. В пробе 2 более половины частиц имеют размер от 2.0 до 5.0 мм, и также закономерно выше содержание органических веществ, которые снижают показатели плотности частиц грунта (табл. 2).

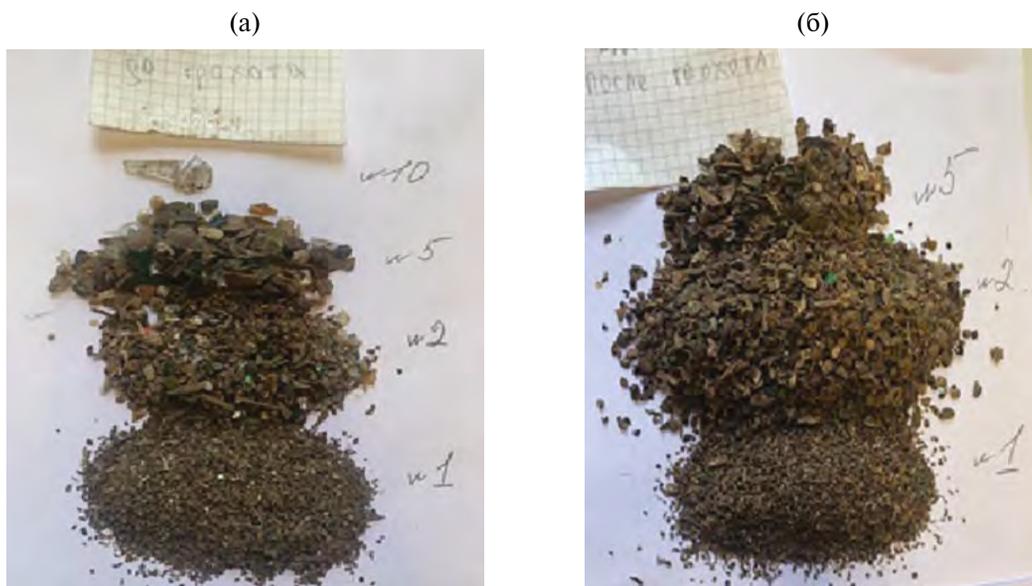
В пробе 1 крупная фракция представлена осколками стекла, обломками пластика, щебнем, кусками строительного мусора, остатками древесины и перегноя (рис. 3а). В пробе 2 крупная фракция более однородная, в основном представлена остатками древесины и перегноя, а остальные компоненты содержатся в значительно меньшем количестве (рис. 3б).

Для лучшего визуального наблюдения морфологии частиц при дальнейшем исследовании использовались грунты без учета частиц диаметром  $>2$  мм при увеличении  $\times 10$ .

Частицы грунта в пробе 1 характеризуются высокой степенью асимметричности и неоднородностью по морфологии (рис. 4). Наблюдается шарообразная, пластинчатая и удлиненная форма частиц. Шарообразная форма встречается наиболее часто и характерна для минеральных частиц, вероятно, с органической пленкой на поверхности

**Таблица 2.** Результаты лабораторных исследований грунтов

Наименование пробы	Содержание частиц различного размера, %					Естественная влажность грунта, %	Плотность частиц грунта, г/см <sup>3</sup>	Потери при прокаливании, %
	>10.0 мм	10.0–5.0 мм	5.0–2.0 мм	2.0–1.0 мм	<1.0 мм			
проба 1	1.2	15.8	15.3	13.6	54.1	74	2.15	27.5
проба 2	0.0	10.6	53.3	17.1	18.9	38	1.91	41.1

**Рис. 3.** Фотографии крупных фракций после проведения гранулометрического анализа: а – проба 1, б – проба 2.

либо для микроагрегатов, состоящих из частиц с органическим цементом. Пластинчатой формой обладают частицы стекла и пластика. Удлиненная форма частиц встречается наиболее редко и характерна для растительных остатков — веток, корней растений. Размер частиц разнообразен и связан с формой рассматриваемых частиц. Диаметр наблюдаемых шарообразных частиц варьирует от 0.1 до 1 см, средняя длина пластинчатых частиц составляет от 0.05 до 1 см, ширина — от 0.05 до 0.5 см, удлиненные частицы имеют длину до 2 см и ширину до 0.1 см. Таким образом, в образце грунта, не прошедшем стадию грохочения, преобладающими являются шарообразные частицы (около 57% от общего количества частиц). Реже встречаются частицы пластинчатой (около 37%) и удлиненной (около 6%) формы. Средний эквивалентный диаметр частиц составляет 0.07–0.8 см.

Частицы грунта в пробе 2 также неоднородны, но в меньшей степени по сравнению с частицами грунта в первой пробе (рис. 5). Преобладающая форма частиц — пластинчатая, характерная как для частиц стекла и пластика, так и для минеральных зерен с органическим веществом на поверхности. Преобладание такой формы, ве-

роятно, объясняется разрушением микроагрегатов шарообразной формы в процессе грохочения, следовательно, песчаные частицы приобретают форму, наиболее приближенную к истинной. Шарообразные песчаные частицы и удлиненные, представленные растительными остатками, также встречаются, но в меньшей степени. Длина пластинчатых частиц варьирует от 0.1 до 1.2 см, ширина — от 0.1 до 0.6 см, диаметр шарообразных частиц составляет 0.2–0.8 см, удлиненные частицы имеют длину до 2 см и ширину до 0.4 см. Таким образом, в образце грунта после процесса грохочения преобладают пластинчатые частицы (около 62% от общего количества частиц), представленные стеклом, пластиком. Реже встречаются частицы шарообразной (около 31%) и удлиненной (около 7%) формы. Средний эквивалентный диаметр частиц составляет 0.1–0.9 см.

По результатам морфологического анализа установлено, что частицы грунта до процесса грохочения характеризуются более шарообразной формой, после процесса грохочения — более пластинчатой. Сходство грунтов обоих типов заключается в том, что все частицы достаточно неоднородны по своему составу и морфологии. При этом



Рис. 4. Проба 1 под бинокляром (цена деления — 0.05 см).

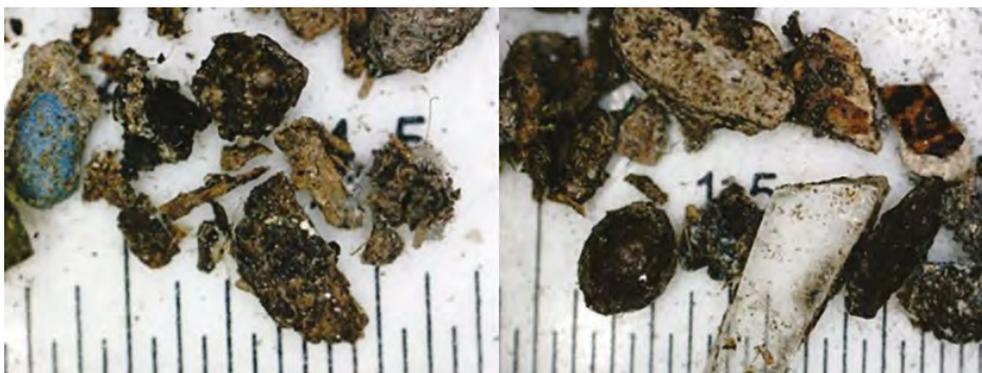


Рис. 5. Проба 2 под бинокляром (цена деления — 0.05 см).

средние размеры частиц также близки. Следовательно, основное различие между техногрунтами (пробами 1 и 2) заключается в процентном содержании частиц различной формы и размера, что связано с разрушением крупных микроагрегатов в результате процесса грохочения.

### ВЫВОДЫ

В ходе работы исследованы два типа техногрунта, отобранные из ванн компостирования: прошедшие только стадию компостирования и прошедшие и стадию грохочения.

Техногрунт, прошедший только стадию компостирования, представляет собой песок гравелистый, наполовину содержащий фракции размером менее 1 мм, с относительно невысоким значением плотности частиц ( $2.15 \text{ г/см}^3$ ) и содержанием органических веществ 27.5%. В целом морфологический состав такого грунта достаточно неоднороден и представлен обломками стекла, пластика, остатками древесины и перегноя. Во фракциях  $<2.0 \text{ мм}$  преобладают частицы шарообразной формы, характерной для минеральных частиц и микроагрегатов, состоящих из частиц с органическим цементом.

Техногрунт, претерпевший и компостирование, и грохочение, более однородный и представляет собой дресвяный грунт с преобладающей фракцией

размером от 2 до 5 мм, с невысоким значением плотности частиц ( $1.91 \text{ г/см}^3$ ) и содержанием органических веществ 41.1%. Его морфологический состав более однородный и в основном представлен остатками перегноя и древесины, а стекла и пластика значительно меньше. Частицы фракции  $<2 \text{ мм}$  характеризуются в основном пластинчатой формой за счет разрушения шарообразных микроагрегатов в процессе грохочения.

Полученные результаты позволяют составить общее представление о типе и особенностях строения техногрунта, образующегося в ходе компостирования органических отходов. Также эти результаты могут быть использованы при изучении физико-механических свойств техногрунтов и оценки напряженно-деформированного состояния тела свалки в процессе эксплуатации и после ее рекультивации.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 24-27-00364.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашихмина Т.В. Геоэкологический анализ состояния окружающей среды и природоохранные рекомендации в районе расположения полигонов ТБО Воронежской области: дис. ...канд. географ. наук. Воронеж, 2014. 122 с.

- <https://www.dissercat.com/content/geoekologicheskii-analiz-sostoyaniya-okruzhayushchei-sredy-i-prirodookhrannye-rekomendatsii->
- Eurostat, 2002. Material use in the European Union 1980–2000: indicators and analysis. Statistical Office of the European Union, Luxembourg, 2001. 241 pp.
  - Islam M.S., Sultana A., Rasheduzzaman M. et al. Assessment of the present state and economical prospects of solid waste at Amin Bazar waste dumping site, Dhaka, Bangladesh // *Journal of Scientific Reseach*. 2015. V. 7. № 3. P. 129–137. <https://doi.org/10.3329/jsr.v7i3.23415>
  - Kannan D., Khademolqorani Sh. et al. Alavi. Smart waste management 4.0: The transition from a systematic review to an integrated framework // *Waste Management*. 2024. № 174. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.08.041>
  - Laner D. et al. A review of approaches for the long-term management of municipal solid waste landfills // *Waste Management*. 2012. № 32. C. 498–512. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.11.010>

## LABORATORY STUDIES OF PHYSICAL PROPERTIES OF PRE-COMPOSTED ORGANIC WASTE

E. S. Solomatina<sup>a,#</sup>, G. A. Zarnitsyn<sup>a</sup>, T. V. Malikova<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per. 13, bld.2, Moscow, 101000 Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: baira-lala@mail.ru*

The article presents the results of laboratory studies of soils obtained during composting of food and organic waste. The study considered two bulk soil samples collected in May 2024 at a municipal solid waste processing complex in the Moscow region. The main objective is to study the soil properties and the morphology of solid particles after soil composting. The natural soil moisture, solid particle density, and organic matter content were determined in laboratory, and soil particle morphology was studied with a binocular microscope.

**Keywords:** *municipal solid waste landfill, composting, physical properties of organic waste, organic component, solid particle density of technogenic soil, particle-size distribution, particle shape*

### REFERENCES

- Ashikhmina, T.V. [Geoecological analysis of the environment and nature-conservation recommendations in the area of allocation MSW landfills in Voronezh region]. *Cand.Sci. (Geogr.) Dissertation, Voronezh, 2014, 122 p. (in Russian)*
- Eurostat, 2002. Material use in the European Union 1980–2000: indicators and analysis. Statistical Office of the European Union, Luxembourg, 2001, 241 pp.
- Islam, M.S., Sultana, A., Rasheduzzaman, M. et al. Assessment of the present state and economical prospects of solid waste at Amin Bazar waste dumping site, Dhaka, Bangladesh. *Journal of Scientific Reseach*, 2015, vol. 7, no. 3, pp. 129–137. <https://doi.org/10.3329/jsr.v7i3.23415>
- Kannan, D., Khademolqorani, Sh. et al. Smart waste management 4.0: The transition from a systematic review to an integrated framework. *Waste Management*, 2024, no. 174, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.08.041>
- Laner, D. et al. A review of approaches for the long-term management of municipal solid waste landfills. *Waste Management*, 2012, no. 32, pp. 498–512. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.11.010>