

# ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

## TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 628.4.08; 658.567.1

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-107-118>

### Обоснование и выбор оптимальных вариантов функционирования системы обращения твердых коммунальных отходов для целей эффективной инсинерации



EDN: NHXXNS

Алкинани Фатима Дахил Саидхун

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация

[✉ ciop@misis.ru](mailto:ciop@misis.ru)

#### Аннотация

**Введение.** За последние десятилетия проблема обращения с бытовыми и промышленными отходами в России и мире приобрела повышенную значимость вследствие роста урбанизации, увеличения потребления и ограниченности полигонных площадей. Традиционная модель утилизации — захоронение на полигонах — сопровождается рисками для окружающей среды и общественного здоровья, а также характеризуется низким уровнем восстановления ресурсов. Развиваются альтернативные стратегии, среди которых ключевыми являются раздельный сбор и механико-биологическая обработка (МБО) отходов, а также термические методы утилизации. Обзор литературы показывает, что зарубежные исследования (Европа, Япония) демонстрируют положительный эффект от комбинации раздельного сбора и МБО, а российские исследования акцентируют внимание на барьерах: недостаточной инфраструктуре для раздельного сбора, низком уровне общественного участия и финансовых ограничениях муниципалитетов. Анализ указывает на важность интегрированного подхода, где технологические решения сопровождаются организационными мерами и экономическими стимулами. В настоящее время отсутствуют комплексные оценки внедрения МБО с учётом разных сценариев раздельного сбора и локальной логистики. Существующие исследования часто ограничены технико-технологическими аспектами или представляют расчёты на уровне отдельных пилотных объектов, без оценки системных экономических последствий и детального анализа чувствительности ключевых параметров. Поэтому целью данной работы является определение оптимальных вариантов сортировки ТКО с позиции дальнейшей инсинерации на основе учета теплоты сгорания и выбросов загрязняющих веществ.

**Материалы и методы.** Осуществлен сбор и анализ статистических данных о функционировании системы обращения ТКО на региональном уровне. В качестве источников использовалась открытая информация Федеральной службы государственной статистики и Федеральной службы по надзору в сфере природопользования (Форма 2-ТП (отходы))<sup>1</sup>. Были изучены и проанализированы данные и отчеты IFC (International Finance Corporation)<sup>2</sup> и публичной правовой компании «Российский экологический оператор» (РЭО)<sup>3</sup>. Для решения поставленных задач был разработан алгоритм проведения исследований, включающий применение регрессионного анализа, построение ранжированного ряда удельной теплоты сгорания ТКО по морфологическому составу с последующим разделением на группы I и II, формирование альтернативных вариантов сортировки отходов за счет изменения доли групп ТКО (I и II) в условно принятых сценариях с последующим решением многокритериальной задачи выбора оптимального варианта сортировки ТКО для целей дальнейшей инсинерации. Исследования проводились в программах MS Excel и Statistica.

**Результаты исследования.** Анализ статистических данных системы обращения и состава твердых коммунальных отходов позволил выявить, что морфологический состав для целей дальнейшей инсинерации за последние 5 лет оставался относительно стабильным с незначительными сезонными колебаниями. Наблюдалась четкая корреляция между численностью населения и объемами накопления отходов, а также между объемом отходов и уровнем их сортировки. В результате имитационного моделирования допустимого множества альтернативных

<sup>1</sup> Открытые данные. Росприроднадзор. URL: <https://rpn.gov.ru/opendata/> (дата обращения 05.03.2026).

<sup>2</sup> THE WORLD BANK GROUP ANNUAL REPORT 2025. URL: <https://www.worldbank.org/en/about/annual-report/world-bank-group-downloads> (дата обращения 05.03.2026).

<sup>3</sup> Российский экологический оператор. URL: <https://reo.ru/about#docs> (дата обращения 05.03.2026).

© Алкинани Фатима Дахил Саидхун, 2026

вариантов сортировки ТКО был определен оптимальный баланс между экономической эффективностью от инсинерации и экологическим загрязнением окружающей среды. В такой постановке были имитационно сформированы партии для последующего сжигания с различным соотношением в них твердых коммунальных отходов из групп I и II в соотношении 10/90, 30/70, 50/50, 70/30, 90/10, соответственно. Определены оптимальные варианты сортировки ТКО для целей дальнейшей инсинерации посредством расчета функции, определяющей степень приближения каждой из рассматриваемых альтернатив сортировки к идеальному значению (идеальной точке), в качестве которой были использованы значения минимальных выбросов (летучая зола, оксид серы, оксид азота, оксид углерода) и максимальное значение теплоты сгорания (энергетическая ценность ТКО исходя из морфологического состава), а также рассчитаны коэффициенты чувствительности к изменению базовых значений параметров сортировки и валового выброса загрязняющих веществ. Получены оптимальные варианты сортировки ТКО с позиции дальнейшей инсинерации на основе учета теплоты сгорания и выбросов загрязняющих веществ (в т.ч. показателей углеродного следа).

**Обсуждение.** Основным результатом исследования является разработанный подход к эффективной сортировке твердых коммунальных отходов (ТКО) для целей их последующей термической утилизации. В основу решения поставленной задачи положены принципы, обеспечивающие получение классического решения прямой и двойственной задач оптимизации, направленных на достижение максимальной эффективности процесса инсинерации ТКО при условии минимизации негативного воздействия на окружающую среду. Полученные результаты позволяют осуществить эффективное разделение ТКО с учетом ограничивающих производственных факторов мусоросжигательных заводов на полигонах. Анализ морфологического состава ТКО для целей их последующей сортировки и термической утилизации позволил выявить варианты разделения отходов, обладающие наибольшей энергетической ценностью исходя из теплоты сгорания отдельных компонентов и характеризующиеся минимальным количеством выбросов загрязняющих веществ.

**Заключение.** Проведенный анализ статистических данных системы обращения ТКО позволил выявить преобладание полигонного захоронения и низкую результативность процесса сортировки. Регрессионные модели обнаружили возрастающие тенденции объемов вывозимых и отсортированных отходов, что предопределило необходимость целенаправленного и рационального разделения для целей утилизации. Имитационное моделирование альтернативных вариантов сортировки ТКО и решение оптимизационной задачи позволили определить наилучшие схемы распределения отходов для последующей термической переработки, характеризующиеся минимальными выбросами загрязняющих веществ и максимальными значениями теплоты сгорания. Таким образом, в ходе исследований получены оптимальные варианты сортировки твердых коммунальных отходов на основе учета морфологического состава партий, обеспечивающие наибольшую эффективность термической утилизации и минимизацию выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

**Ключевые слова:** твердые коммунальные отходы, сортировка отходов, инсинерация, морфологический состав, теплота сгорания, выбросы загрязняющих веществ, механико-биологическая обработка, термическая утилизация, оптимизация, регрессионный анализ

**Благодарности.** Автор статьи благодарна заведующему кафедрой «Безопасность и экология горного производства» НИТУ «МИСИС» Коликову Константину Сергеевичу за неоценимую помощь, всестороннюю поддержку и плодотворное сотрудничество при написании основных положений данной работы, а также редакционной коллегии журнала и рецензенту за профессиональный анализ и рекомендации по редактированию статьи.

**Для цитирования.** Алкинани Фатима Дахил Саидхуд. Обоснование и выбор оптимальных вариантов функционирования системы обращения твердых коммунальных отходов для целей эффективной инсинерации. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2026;10(2):107–118. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-107-118>

*Original Theoretical Research*

## Justification and Selection of Optimal Options for the Operation of Municipal Solid Waste Management System in Order to Ensure Effective Incineration

Fatimah Dakhil Saihood Alkinani  

National University of Science and Technology MISIS Moscow, Russian Federation

 [ciop@misis.ru](mailto:ciop@misis.ru)

### Abstract

**Introduction.** Over the past decades, the issue of household and industrial waste management in Russia and worldwide has gained increased importance due to growing urbanization, increased consumption, and limited landfill space. The traditional disposal model — landfilling — is associated with environmental and public health risks and low levels of resource recovery. Alternative strategies are being developed, among which the key ones are separate collection and mechanical-biological treatment (MBT), as well as thermal disposal methods. A literature review shows that

international studies (Europe, Japan) demonstrate the positive effects of a combination of separate collection and MBT, while Russian studies emphasize the barriers: insufficient infrastructure for separate collection, low public participation, and municipal financial constraints. The analysis highlights the importance of an integrated approach, where technological solutions are accompanied by organizational measures and economic incentives. Currently, there is a lack of comprehensive assessments of the MTB implementation, taking into account various separate collection and local logistics scenarios. Existing studies are often limited to technical and technological aspects or present calculations at the level of individual pilot sites, without assessing the systemic economic impacts or providing a detailed sensitivity analysis of key parameters. Therefore, the aim of this study is to identify optimal MSW sorting options for subsequent incineration, based on combustion heat and pollutant emissions.

**Materials and Methods.** The author collected and analyzed statistical data on the functioning of the MSW management system at the regional level using publicly available information from the Federal State Statistics Service and the Federal Service for Supervision of Natural Resources (Form 2-TP (waste)) as sources. Data and reports from IFC (International Finance Corporation) and the public legal company Russian Environmental Operator (REO) were studied and analyzed. To achieve the set goals, the author has developed a research algorithm, including the use of regression analysis, the construction of a ranked series of the specific heat of MSW combustion by morphological composition with subsequent division into groups I and II, the formation of alternative waste sorting options by changing the proportion of MSW groups (I and II) in the conditionally accepted scenarios, followed by solving a multi-criteria problem of choosing the optimal option for MSW sorting for the purposes of further incineration. The research was conducted in MS Excel and Statistica software.

**Results.** An analysis of statistical data on the solid municipal waste management system and composition revealed that the morphological composition for the purposes of further incineration remained relatively stable over the past 5 years with minor seasonal fluctuations. A clear correlation was observed between population size and waste accumulation volume, as well as between waste volume and the level of waste sorting. Simulation modeling of a feasible set of alternative MSW sorting options made it possible to determine the optimal balance between the economic efficiency of incineration and environmental pollution. In this setting, batches were simulated for subsequent incineration with different ratios of solid municipal waste from groups I and II in the ratio of 10/90, 30/70, 50/50, 70/30, 90/10, respectively. Optimal options for MSW sorting for further incineration were determined by calculating a function that determined the degree of approximation of each of the sorting alternatives under consideration to the ideal value (ideal point), which was based on the values of minimum emissions (fly ash, sulfur oxide, nitrogen oxide, carbon monoxide) and the maximum value of the calorific value (the energy value of MSW based on the morphological composition). The sensitivity coefficients to changes in the basic values of the sorting parameters and the gross emission of pollutants were calculated. Optimal options for MSW sorting from the perspective of further incineration were obtained based on the calculation of combustion heat and pollutant emissions (including carbon footprint indicators).

**Discussion.** The main result of the study is a developed approach to the efficient sorting of municipal solid waste for subsequent thermal recycling. The solution to this problem was based on principles that allowed for a classical solution to the direct and dual problem of achieving maximum efficiency from the municipal solid waste incineration process while minimizing the negative impact on the environment. The obtained results will enable the effective separation and sorting of municipal solid waste despite the production constraints of incineration plants at municipal solid waste landfills. The analysis of the morphological composition of municipal solid waste for subsequent sorting and thermal recycling made it possible to identify waste separation options with the highest energy value based on heat of combustion of individual components and characterized by a minimum amount of pollutant emissions.

**Conclusion.** The analysis of statistical data from the municipal solid waste management system revealed the prevalence of landfill disposal and the ineffectiveness of the sorting process. Regression models revealed increasing trends in the volume of waste removed and sorted, necessitating further targeted and effective sorting for recycling purposes. Simulation modeling of alternative MSW sorting options and the solution of an optimization problem made it possible to identify effective MSW sorting options for further thermal disposal, with minimal pollutant emissions and maximum combustion heat values. In conclusion, during the research, optimal options for municipal solid waste sorting were obtained based on the morphological composition of batches for maximum efficiency of thermal disposal and minimum emissions of pollutants into the atmosphere.

**Keywords:** municipal solid waste, waste sorting, incineration, morphological composition, combustion heat, pollutant emissions, mechanical and biological treatment, thermal utilization, optimization, regression analysis

**Acknowledgements.** The author is grateful to Konstantin Sergeevich Kolikov, Head of the Department of Safety and Ecology of Mining Production at NUST MISIS, for his invaluable help, comprehensive support, and fruitful cooperation in writing the main provisions of this work. The author would also like to thank the Editorial board of the Journal and the reviewer for their professional analysis and their recommendations for improving the article.

**For Citation.** Fatimah Dakhil Saihood Alkinani. Justification and Selection of Optimal Options for the Operation of Municipal Solid Waste Management System in Order to Ensure Effective Incineration. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(2):107–118. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-2-107-118>

**Введение.** В современном мире процесс урбанизации населения происходит высокими темпами. По данным ООН на 2024 год уровень урбанизации Европы составил 75,8 %, Северной Америки (США и Канада) — 83,4 %, России — 75 %<sup>4</sup>. Рост городского населения России, согласно Росстату за период 2000–2024 годов, составил 25 %, что однозначно свидетельствует о смещении образа жизни населения в сторону городских агломераций<sup>5</sup>. Современные условия урбанизации, обеспечивая комфорт проживания и формируя возрастающие потребности городского населения, всё чаще требуют соблюдения принципов рационального обращения с образующимися в ходе жизнедеятельности человека твердыми коммунальными отходами — их значительное накопление и недостаточная утилизация способствуют стремительному ухудшению экологической обстановки.

Под твердыми коммунальными отходами (ТКО) понимают отходы, образующиеся в жилых помещениях в процессе потребления физическими лицами, а также товары, утратившие свои потребительские свойства в ходе использования физическими лицами в жилых помещениях для удовлетворения личных и бытовых нужд<sup>6</sup>. В странах ЕС и США доля захоронений не превышает 40 %, а уровень переработки достигает 60 %. Ведущими странами ЕС в сфере переработки отходов являются государства Скандинавии, Нидерланды, Германия и Бельгия — утилизация достигает 50–68 %, при этом захоронение составляет лишь 1 %<sup>7</sup>.

Выбор конкретного способа утилизации ТКО в разных странах определяется особенностями экономического развития, государственной политикой в области раздельного сбора отходов, а также площадью территории государства и плотностью его населения. Основными общепринятыми видами утилизации ТКО являются: полигонное захоронение, биологическая утилизация и сжигание (инсинерация).

Согласно данным Росстата<sup>8</sup> и Росприроднадзора<sup>9</sup> в России на полигонное захоронение направляется в среднем 82 % от общего объёма ТКО. За последние 5 лет доля отсортированных отходов выросла до рекордной отметки и составляет 53 %. Однако следует отметить, что основная масса этих отходов всё равно подвергается захоронению. Приведённые цифры ясно демонстрируют отставание процессов утилизации ТКО в России по сравнению с ведущими мировыми практиками. Следовательно, разработка эффективной системы обращения с ТКО представляет собой важную задачу федерального уровня, что подтверждено отраслевым документом «Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления в России на период до 2030 года»<sup>10</sup>, целью которого является создание эффективной отрасли переработки отходов.

На сегодняшний день теоретические и практические вопросы, связанные с эффективным обращением с ТКО и рассматриваемые в открытой литературе, развиваются в нескольких основных направлениях. Одно из них связано с построением технико-экономической системы обращения с ТКО [1] и созданием организационно-логистической цепочки — от сбора и первичной сортировки отходов в городской агломерации, через транспортировку и вторичную сортировку в специальных сортировочных комплексах до последующей утилизации [2]. В указанных исследованиях основной упор делается на первичную сортировку и своевременный вывоз мусора. Для плотнонаселённых агломераций развитие этого направления остаётся актуальной практической задачей. Несмотря на принимаемые меры по сортировке, они практически не влияют на уменьшение как легальных, так и нелегальных полигонов захоронения отходов [3].

Другое направление направлено на разработку и внедрение технологий переработки ТКО с целью получения вторичного сырья (ткани, строительные материалы и т. п.) и вторичной энергии — альтернативного топлива с высокой теплотой сгорания [4], рассматриваемого как энергоноситель [5]. Наиболее распространённым и технически отработанным методом промышленной переработки ТКО для получения вторичной энергии является сжигание [6]. Основным преимуществом термической переработки отходов является относительно малое воздействие на земельные и водные ресурсы, тогда как основными недостатками являются загрязнение атмосферы

<sup>4</sup> Исследование «Рейтинг стран мира по уровню урбанизации». United National. URL: <http://www.un.org/en/desa> (дата обращения 25.01.2026).

<sup>5</sup> Доля городского населения в общей численности населения на 1 января. ЕМИСС Государственная статистика. URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/36057> (дата обращения 28.01.2026).

<sup>6</sup> Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» от 24.06.1998 N 89-ФЗ URL: <https://docs.cntd.ru/document/901711591> (дата обращения 01.10.2025).

<sup>7</sup> Sustainable waste management: what the EU is doing. URL: <http://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20180328STO00751/eu-waste-management-infographic-with-facts-and-figures> (accessed: 29.09.2025).

<sup>8</sup> Коммунальные отходы. ЕМИСС Государственная статистика. URL: <https://www.fedstat.ru/indicators/search?searchText=коммунальные+отходы> (дата обращения 11.09.2025).

<sup>9</sup> Информация об образовании, обработке, утилизации, обезвреживании, размещении отходов производства и потребления. Федеральная служба по надзору в сфере природопользования. URL: <https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/production-consumption-waste/> (дата обращения 17.09.2025).

<sup>10</sup> Распоряжение Правительства РФ от 25 января 2018 г. № 84-п. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71767672/> (дата обращения 21.01.2026).

сферы значительными объёмами отходящих газов и летучей золы [7], а также негативное влияние выбросов на биоразнообразие. В контексте проблемы сжигания мусора [8] в литературе преимущественно рассматривается строительство мусоросжигательных заводов [9]. Лишь немногие авторы учитывают специфику эффективности инсинерации с учётом морфологического состава ТКО [10]. В то же время недостаточно изучена нестабильность морфологического состава ТКО и взаимосвязь между эффективной сортировкой и последующими вариантами утилизации, включая термическую.

Цель работы — определение оптимальных вариантов сортировки ТКО с позиции дальнейшей инсинерации на основе учёта теплоты сгорания и выбросов загрязняющих веществ.

Исходя из поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- сбор и анализ статистических данных системы обращения и состава ТКО;
- моделирование регрессионных взаимосвязей между объёмами вывозимых и отсортированных отходов и численностью населения;
- имитационное моделирование допустимого множества альтернативных вариантов сортировки ТКО;
- определение оптимальных вариантов сортировки ТКО для целей дальнейшей инсинерации.

**Материалы и методы.** В рамках поставленных задач был осуществлён сбор и анализ статистических данных и функционирования системы обращения ТКО на региональном уровне. В качестве источников использовалась открытая информация Федеральной службы государственной статистики и Федеральной службы по надзору в сфере природопользования. Были изучены и проанализированы данные и отчеты IFC (International Finance Corporation)<sup>11</sup> и публичной правовой компании «Российский экологический оператор» (РЭО)<sup>12</sup>, а также материалы, полученные другими авторами при исследовании в южных [11] и центральных [12] регионах России.

В рамках поставленных задач данного исследования были реализованы следующие процедуры:

- получены зависимости объемов вывозимых и отсортированных отходов от суммарного количества собираемых отходов и численности населения;
- сформировано исходное множество альтернативных вариантов сортировки ТКО в зависимости от их морфологического состава, рассчитаны объёмы выбросов загрязняющих веществ (в т.ч. углеродного следа) для различной производительности установок инсинерации;
- осуществлён поиск оптимальной альтернативы сортировки ТКО по сформированному множеству оценочных критериев энергетической ценности и количеству выбросов загрязняющих веществ при инсинерации методом идеальной точки.

Основная последовательность проведения исследований заключалась в следующих действиях:

1. На основе регрессионного анализа значений сформированной статистической выборки были получены регрессионные зависимости объема отходов от численности населения и объема отсортированных отходов от суммарного объема собираемых отходов. Полученные модели проверены на адекватность и статистическую значимость с использованием коэффициентов корреляции ( $R^2 > 0,75$ ), Стьюдента и F-критерия Фишера ( $p > 0,95$ ).

2. На основе использования справочной информации был сформирован ранжированный ряд удельной теплоты сгорания ТКО по морфологическому составу, определенному в рамках сбора статистических данных. Проранжированные значения были разделены на две основные группы: I — теплота сгорания  $22-45 \times 10^3$  кДж/кг; II — теплота сгорания  $17-21 \times 10^3$  кДж/кг (рис. 1).

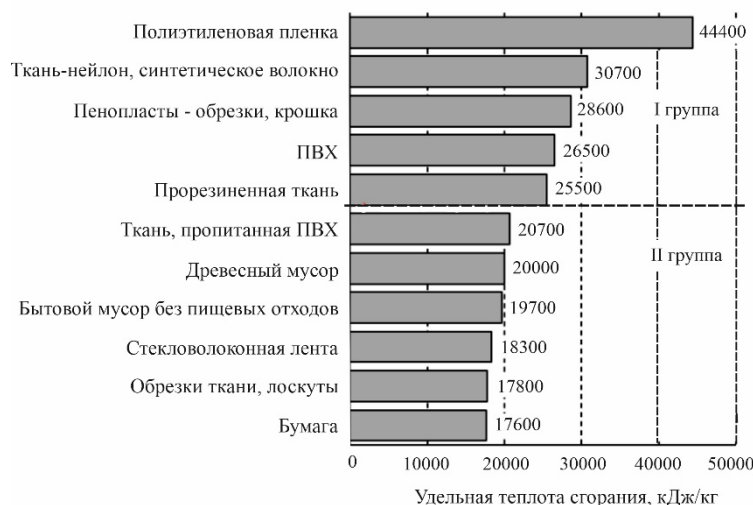


Рис. 1. Удельная теплота сгорания при сжигании ТКО (по морфологическому составу), кДж/кг

<sup>11</sup> Russia Waste Management Market Size and Share Analysis. URL: <https://www.nextmsc.com/report/russia-waste-management-market> (accessed: 26.01.2026)

<sup>12</sup> Российский экологический оператор. URL: <https://reo.ru/about#docs> (дата обращения 05.03.2026).

В такой постановке сжигание всего объема собираемых отходов зачастую является нецелесообразным и неэффективным, поскольку, наряду с экономической выгодой от получаемой энергии, возникает серьезная проблема загрязнения окружающей среды продуктами горения [13].

3. С целью оценки предпочтительности многоальтернативного выбора вариантов сортировки ТКО было сформировано исходное множество критериев оценки выбросов/сбросов загрязняющих веществ, основанное на идее выявления структуры предпочтений вариантов сортировки твердых коммунальных отходов [14]. В качестве альтернативных вариантов сортировки в задаче выбора выступало последовательное изменение доли групп ТКО (I и II группы) соответственно в условно принятых соотношениях (10/90, 30/70, 50/50, 70/30, 90/10).

4. Решена многокритериальная задача выбора оптимального варианта сортировки ТКО для целей дальнейшей инсинерации. Одним из подходов, позволяющих решить данную задачу, является метод построения функций ценности [15], а поиск наилучшей альтернативы осуществлялся на основе метода «идеальной» точки. Функция ценности определяет степень приближения полученного решения к идеальной точке, в качестве координат которой может быть использованы максимальные (минимальные) значения отдельных критериев, т.е. наилучшие значения. Как правило, полученные значения критериев нормируются к единице по следующей формуле (1):

$$Z_{i\text{норм}} = (Z_i - Z_{i\text{мин}}) / (Z_{i\text{макс}} - Z_{i\text{мин}}), \quad (1)$$

где  $Z_{i\text{норм}}$  — нормированное значение критерия  $Z_i$ ;  $Z_{i\text{мин}}$ ,  $Z_{i\text{макс}}$  — максимальное и минимальное значения  $i$ -го критерия соответственно.

Моделирование осуществлялось для определенного морфологического состава твердых коммунальных отходов, в отношении которого были разработаны варианты сортировки и утилизации (инсинерации), характеризующиеся максимальной энергетической ценностью (получение электроэнергии) исходя из теплоты сгорания отдельных компонентов и минимальным объемом выбросов загрязняющих веществ (в т. ч. углеродным следом (парниковые газы)) (таблица 1).

Таблица 1

Формирование исходного множества альтернатив сортировки и оценочных критериев выбросов загрязняющих веществ (в т.ч. углеродного следа) и инсинерации ТКО (базовая производительность установки 0,5 тонн/ч)

| Варианты сортировки ТКО (групп I / группа II), % | Критерии оценки выбросов загрязняющих веществ (в т.ч. углеродного следа (парниковые газы)) и эффективности инсинерации |  |                               |                                |                                   |
|--|--|--|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
|  | Теплота сгорания (энергетическая ценность ТКО (по морфологическому составу сортировки))* (кДж/кг)                      | Валовый выброс загрязняющих веществ (кг/ч) / (т/год) |                               |                                |                                   |
|  |  | Летучая зола   | Оксид серы (SO <sub>2</sub> ) | Оксид азота (N <sub>2</sub> O) | Оксид углерода (CO <sub>2</sub> ) |
| Вар. 1 (10/90)                                   | 4033   | 0,05/0,30  | 0,07/0,36                     | 0,18/1,03                      | 0,40/2,23                         |
| Вар. 2 (30/70)                                   | 5782   | 0,14/0,76  | 0,11/0,59                     | 0,41/2,42                      | 0,79/4,43                         |
| Вар. 3 (50/50)                                   | 8532   | 0,22/1,22  | 0,15/0,82                     | 0,64/3,60                      | 1,18/6,63                         |
| Вар. 4 (70/30)                                   | 11282  | 0,30/1,68  | 0,19/1,05                     | 0,87/4,88                      | 1,57/8,83                         |
| Вар. 5 (90/10)                                   | 14031  | 0,39/2,14  | 0,23/1,28                     | 1,10/6,17                      | 1,96/11,03                        |

*Примечание:* \* Расчет производился исходя из элементарного состава компонентов в рабочей массе твердых коммунальных отходов, выхода летучих веществ, процентного содержания компонента и низшей теплоты сгорания компонентов.

Исследование проводилось в программах MS Excel и Statistica (модули анализ данных и регрессионного анализа).

**Результаты исследования.** Согласно статистическим данным выявлено, что морфологический состав ТКО за последние 5 лет оставался относительно стабильным с незначительными сезонными колебаниями и включал в себя (приведены данные среднего и стандартного отклонения): органических отходов — 49,3±5,4 %; вторичных отходов (пластик — 10,2±2,1 %, бумага — 10,2±5,3 %, металлы — 10,2±3,1 %, стекло — 8,1±2,2 %, другие отходы — 12±4 %). При этом наблюдалась четкая корреляция между численностью населения (ЧН) и объемами накопления отходов (ООт). На основании метода наименьших квадратов, используя данные собранной статистики, была получена зависимость (ООт = 442ln (ЧН) — 5585,5, R<sup>2</sup> = 0,67) с последующим расчетом коэффициента парной корреляции (рис. 2).

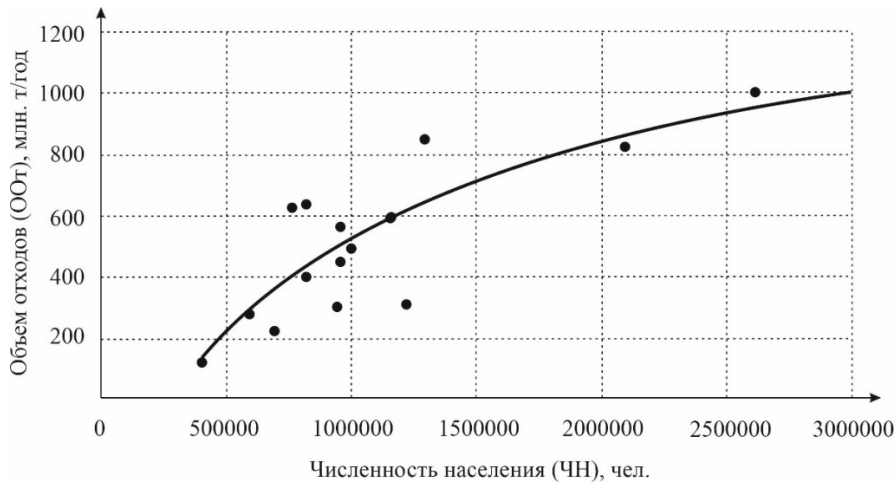


Рис. 2. Зависимость объема вывозимых отходов (ООт, млн. т/год) от численности населения (ЧН, чел.)

Кроме того, на полигонах ТКО была выявлена ещё одна проблема, связанная с процессом сортировки отходов. Проведённый анализ показал, что при объёмах собираемых отходов (СО), превышающих 600 тыс. тонн, количество отсортированных отходов (ОО) практически не изменяется ( $((OO) = 37484(CO)^{0.2062}; R^2 = 0,79)$ ), что, в свою очередь, отражается на показателях эффективности дальнейшей утилизации и рециклинга (рис. 3). Данный вывод дополнительно подтверждает целесообразность и актуальность выполненных прикладных исследований, связанных с анализом системы обращения ТКО, структурной сортировкой по морфологическому составу и адаптивным формированием мусоропотоков.

Как уже отмечалось выше, одним из наиболее распространённых методов промышленной переработки отходов является инсинерация, а базовым показателем её эффективности считается количество получаемой в результате сжигания энергии, характеризуемое удельной теплотой сгорания того или иного вида ТКО [16].

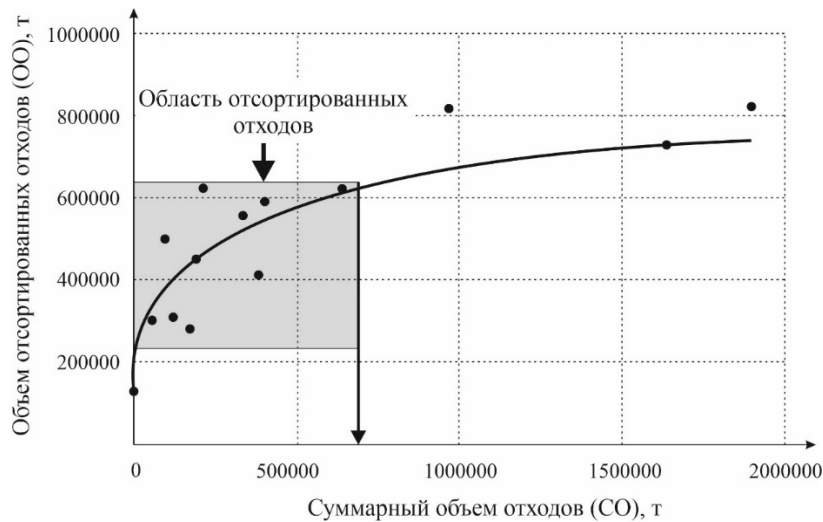


Рис. 3. Зависимость объема отсортированных отходов (ОО, т) от суммарного количества собираемых отходов (СО, т)

В ходе проведённых исследований был выполнен расчёт функции, определяющей степень приближения каждой из рассматриваемых альтернатив сортировки к идеальному значению (идеальной точке). В качестве такого значения использовались минимальные показатели выбросов (летучая зола, оксид серы, оксид азота, оксид углерода), а также максимальная величина теплоты сгорания (энергетическая ценность ТКО, определяемая исходя из морфологического состава). При вычислении расстояния до идеальной точки вес (значимость) каждого из оценочных критериев принимался равнозначным. При необходимости модель может быть дополнена экспертно-моделирующими процедурами, устанавливающими весовые коэффициенты для специфических задач сортировки и инсинерации. В область оптимальных альтернатив по данному методу вошли варианты 3–5 (рис. 4). Ввиду наличия разноразмерных величин предварительно осуществлялась процедура нормировки и расчёт коэффициентов чувствительности модели множественной линейной регрессии — функции теплоты сгорания ТКО при инсинерации от показателей выбросов загрязняющих веществ (таблица 2).

Таблица 2

Функции коэффициентов чувствительности модели эффективности инсинерации (теплоты сгорания (ТСг)) ТКО к изменению значений параметров сортировки и валового выброса загрязняющих веществ

| Параметр                          | Коэффициент чувствительности соотношения ТСг/ X |                  |                    |                   |                   |
|-----------------------------------|---|------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
|                                   | Вар.1<br>(10/90)                                | Вар.2<br>(30/70) | Вар. 3*<br>(50/50) | Вар.4*<br>(70/30) | Вар.5*<br>(90/10) |
| X                                 |   |                  |                    |                   |                   |
| Летучая зола                      | 1681,31   | 2141,82          | 2981,76            | 3167,61           | 3998,43           |
| Оксид серы (SO <sub>2</sub> )     | 2619,16   | 4314,19          | 5514,26            | 6412,13           | 7571,51           |
| Оксид азота (N <sub>2</sub> O)    | 8314,19   | 9368,14          | 11365,91           | 13591,21          | 15910,12          |
| Оксид углерода (CO <sub>2</sub> ) | 1323,12   | 1436,84          | 1509,43            | 1609,19           | 1943,18           |
| Сводный член                      | 1423,12   | 1556,81          | 1919,35            | 2193,45           | 3005,45           |
| Коэффициент корреляции            | 0,79  | 0,89             | 0,82               | 0,76              | 0,81              |

Примечание: \* Оптимальные варианты сортировки ТКО (по данным таблицы 1).

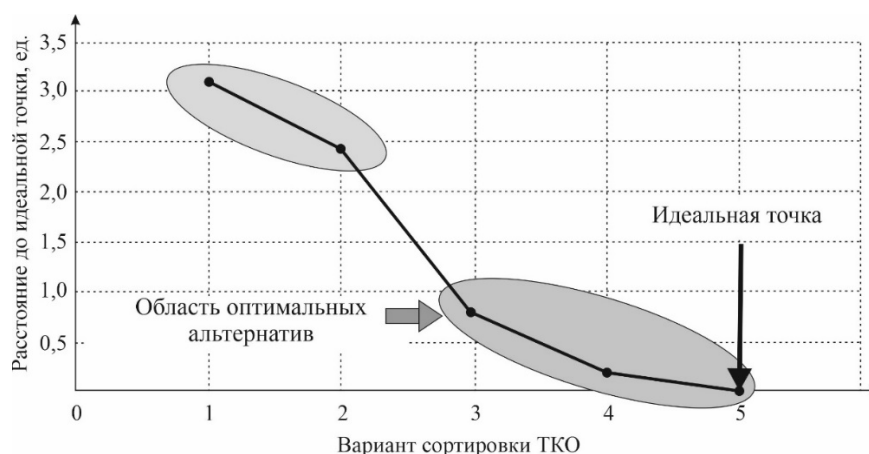


Рис. 4. Определение степени приближения полученных решений вариантов сортировки ТКО к идеальной точке

Таким образом, в ходе проведённых исследований были получены оптимальные варианты сортировки ТКО с позиции дальнейшей инсинерации на основе учёта теплоты сгорания и выбросов загрязняющих веществ (в том числе показателей углеродного следа).

Для формирования совокупности параметров модели эффективности инсинерации, подлежащих, согласно исходной постановке, варьированию по результатам предполагаемой сортировки с учётом морфологического состава ТКО, помимо коэффициентов чувствительности, определены статистические характеристики вариации и корреляции. На основе анализа полученных коэффициентов чувствительности модели эффективности инсинерации ТКО установлены максимально возможные абсолютные значения указанных коэффициентов и сформулированы выводы о необходимости учёта при сортировке ТКО тех структурных элементов морфологического состава, сжигание которых обеспечит наименьшие выбросы загрязняющих веществ в атмосферу.

**Обсуждение.** Полученные в ходе исследования результаты позволяют сформулировать ряд важных положений, касающихся оптимизации процесса сортировки ТКО для целей инсинерации.

Выявленная логарифмическая зависимость между численностью населения и объемом вывозимых отходов ( $R^2 = 0,67$ ) согласуется с результатами исследований других авторов при исследовании в южных [11] и центральных [12] регионах России, в которых также отмечался нелинейный характер накопления ТКО в урбанизированных территориях. Полученный коэффициент корреляции свидетельствует о наличии устойчивой связи, однако значение  $R^2 < 0,7$  указывает на влияние дополнительных факторов (уровень потребления, сезонность, экономическая активность), не учтенных в модели. Это ограничение требует в дальнейших исследованиях расширения набора переменных для повышения точности прогнозирования объемов образования ТКО.

Особый интерес представляет обнаруженная степенная зависимость объема отсортированных отходов от суммарного количества собираемых ( $R^2 = 0,79$ ), демонстрирующая эффект насыщения при превышении порога в 600 тыс. тонн. Данный результат объясняется ограниченной пропускной способностью существующих сортировочных комплексов и недостаточным развитием инфраструктуры переработки в регионах с высоким уровнем образования отходов. Похожие выводы были сделаны в работе [17], где авторы указывали на технологические и организационные барьеры масштабирования процессов сортировки. Выявленное ограничение подчеркивает необходимость не только наращивания мощностей сортировочных станций, но и внедрения системы раздельного сбора на уровне первичных источников образования ТКО.

Относительная стабильность морфологического состава ТКО за пятилетний период (органические отходы —  $49,3 \pm 5,4$  %; вторичные материалы — около 50 %) соответствует общемировым тенденциям для стран с развивающейся системой обращения с отходами [5]. Преобладание органической фракции характерно для регионов с невысоким уровнем раздельного сбора, что отличает российскую практику от стран Скандинавии и Западной Европы, где доля органики снижена до 20–30 % благодаря активному компостированию и биологической переработке [11]. Это различие объясняет более низкую среднюю теплоту сгорания российских ТКО по сравнению с европейскими аналогами.

Применение метода идеальной точки для многокритериального выбора оптимальных вариантов сортировки представляет собой адаптацию классического подхода теории принятия решений к специфической задаче управления отходами. Полученные оптимальные варианты (соотношения I/II группы: 50/50, 70/30, 90/10) демонстрируют компромисс между максимизацией энергетической ценности (теплота сгорания от 8532 до 14031 кДж/кг) и минимизацией экологического ущерба от выбросов. Важно отметить, что увеличение доли высококалорийных фракций (I группа) приводит к пропорциональному росту валовых выбросов загрязняющих веществ — летучей золы с 0,22 до 0,39 кг/ч; SO<sub>2</sub> с 0,15 до 0,23 кг/ч; N<sub>2</sub>O с 0,64 до 1,10 кг/ч и CO<sub>2</sub> с 1,18 до 1,96 кг/ч. Это согласуется с фундаментальными закономерностями термической переработки, описанными в работах Хантимирова [6], Коновалова [7], Вайтикунене [13] и других авторов, где показано, что материалы с высокой теплотой сгорания (пластик, резина) генерируют больше токсичных продуктов горения.

Рассчитанные коэффициенты чувствительности модели (таблица 2) позволяют количественно оценить влияние каждого типа выбросов на энергетическую эффективность инсинерации. Наибольшую чувствительность теплота сгорания демонстрирует к изменению выбросов оксида азота (коэффициенты от 8314,19 до 15910,12), что объясняется спецификой окислительных процессов при высокотемпературном горении азотсодержащих компонентов ТКО. Полученные значения коэффициентов корреляции моделей (0,76–0,89) свидетельствуют о достаточной надежности регрессионных зависимостей, хотя вариант 4 показал относительно более низкое значение (0,76), что может указывать на нелинейные эффекты при данном соотношении компонентов.

Принятое в исследовании допущение о равнозначности весовых коэффициентов всех оценочных критериев является упрощением, которое может быть оправдано на начальном этапе анализа, но требует уточнения для конкретных практических задач. В зависимости от региональных экологических приоритетов и нормативов качества атмосферного воздуха может потребоваться дифференцированный подход к учету различных видов выбросов. Например, в городских агломерациях с напряженной экологической обстановкой критерий выбросов CO<sub>2</sub> (углеродный след) может иметь больший вес в связи с климатическими обязательствами России.

Ограничением представленной модели является базовая производительность установки инсинерации (0,5 т/ч), которая характерна для малых и средних мусоросжигательных комплексов. При масштабировании на крупные заводы (производительность 10–50 т/ч) потребуются корректировка параметров выбросов с учетом эффекта масштаба и применения современных систем газоочистки. Кроме того, в модели не учтены экономические аспекты сортировки и инсинерации — капитальные и операционные затраты, стоимость электроэнергии, что ограничивает возможности практического применения результатов без дополнительного технико-экономического обоснования.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их использования при планировании и оптимизации системы обращения с ТКО на региональном уровне. Определенные оптимальные варианты сортировки могут служить целевыми ориентирами для операторов по обращению с отходами при формировании технических заданий для сортировочных комплексов и согласовании мусоропотоков между сортировочными станциями и мусоросжигательными заводами. Рассчитанные коэффициенты чувствительности позволяют оперативно оценивать изменение экологических и энергетических показателей при корректировке морфологического состава сортируемых ТКО.

Сравнение полученных результатов с международной практикой показывает, что предложенный подход соответствует тенденциям интеграции экологических критериев в процесс управления отходами [8]. Однако для достижения показателей ведущих европейских стран (утилизация 50–68 %, захоронение 1 %) необходима комплексная трансформация всей системы обращения с ТКО, включающая не только оптимизацию сортировки для инсинерации, но и развитие альтернативных методов переработки — компостирования органики, рециклинга вторичных материалов, производства RDF-топлива.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку динамических моделей, учитывающих сезонную изменчивость морфологического состава ТКО, а также на интеграцию экспертных оценок для определения весовых коэффициентов критериев в зависимости от региональной специфики. Перспективным направлением является создание цифровых платформ для мониторинга и управления мусоропотоками в режиме реального времени с использованием полученных регрессионных зависимостей и оптимизационных моделей.

**Заключение.** В ходе выполнения работы достигнута поставленная цель — определены оптимальные варианты сортировки твердых коммунальных отходов для целей инсинерации на основе учета теплоты сгорания и выбросов загрязняющих веществ.

Решены следующие задачи:

1. Собраны и проанализированы статистические данные системы обращения с ТКО, установлена относительная стабильность морфологического состава отходов за пятилетний период (органические — 49,3±5,4 %, вторичные материалы — около 50 %).

2. Получены регрессионные зависимости объема вывозимых отходов от численности населения (логарифмическая,  $R^2 = 0,67$ ) и объема отсортированных отходов от суммарного количества собираемых (степенная,  $R^2 = 0,79$ ), выявлен эффект насыщения сортировочных мощностей при объемах свыше 600 тыс. тонн.

3. Сформировано множество из пяти альтернативных вариантов сортировки ТКО по соотношению групп с различной теплотой сгорания (I группа:  $22-45 \times 10^3$  кДж/кг; II группа:  $17-21 \times 10^3$  кДж/кг), рассчитаны объемы выбросов загрязняющих веществ (летучая зола,  $SO_2$ ,  $N_2O$ ,  $CO_2$ ) для каждого варианта при базовой производительности установки 0,5 т/ч.

4. С применением метода идеальной точки определены три оптимальных варианта сортировки ТКО (соотношения групп I/II: 50/50, 70/30, 90/10), обеспечивающие компромисс между максимизацией энергетической ценности (теплота сгорания 8 532–14 031 кДж/кг) и минимизацией экологического воздействия.

Рассчитаны коэффициенты чувствительности модели эффективности инсинерации, показывающие наибольшее влияние выбросов оксида азота на энергетические характеристики процесса. Полученные регрессионные модели обладают достаточной статистической значимостью (коэффициенты корреляции 0,76–0,89).

Результаты исследования могут быть использованы региональными операторами по обращению с отходами при планировании работы сортировочных комплексов и мусоросжигательных заводов, а также при формировании стратегий развития инфраструктуры переработки ТКО в соответствии с целями «Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов до 2030 года»<sup>13</sup>.

Перспективы дальнейших исследований включают разработку динамических моделей с учетом сезонной изменчивости состава ТКО, внедрение экспертных процедур определения весовых коэффициентов критериев и технико-экономическое обоснование полученных вариантов сортировки для различных масштабов производства.

#### Список литературы / References

1. Цыпкин Ю.А., Близнюкова Т.В., Фомин А.А., Феклистова И.С., Орлов С.В. Эффективная структура системы обращения с твердыми коммунальными отходами городских агломераций. *International Agricultural Journal*. 2020;5:13–27. <http://doi.org/10.24411/2588-0209-2020-10208>

Tsyarkin YuA, Bliznukova TV, Fomin AA, Feklistova IS, Orlov SV. Effective Structure of the Municipal Solid Waste Management System in Urban Agglomerations. *International Agricultural Journal*. 2020;5:13–27. (In Russ.) <http://doi.org/10.24411/2588-0209-2020-10208>

2. Олифиренко А.В., Бобренко Е.Г. Анализ системы обращения с твердыми коммунальными отходами в Омской области. *Экологические чтения 2025 Материалы XVI Национальной научно-практической конференции (с международным участием)*. Омск: Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина; 2025. С. 386–390.

Olifirenko AV, Bobrenko EG. Analysis of the Municipal Solid Waste Management System in the Omsk Region. In: *Ecological Readings 2025. Proc. XV National Scientific and Practical Conference (with International Participation)*. Omsk: Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin; 2025. P. 386–390. (In Russ.)

3. Ильяшова Ю.А., Батавина М.А. Создание устойчивой системы обращения с твердыми коммунальными отходами в Курской области: проблемы и перспективы. *Политика, экономика и инновации*. 2023;1:1–8.

Ilyashova YuA, Batavina MA. Creation of a Sustainable Solid Municipal Waste Management System in the Kursk Region: Problems and Prospects. *Management, Economics and Innovation*. 2023;1:1–8. (In Russ.)

4. Краснопева Н.А., Еремина Е.А., Ермоленко Б.В. Использование основных видов твердых коммунальных отходов в качестве вторичного сырья для производства продукции товарного вида как способ решения проблемы накопления отходов. *Успехи в химии и химической технологии*. 2021;247(12):84–86.

Krasnopeeva NA, Eremina EA, Ermolenko BV. The Use of the Main Types of Solid Municipal Waste as Secondary Raw Materials for the Production of Marketable Products as a Way to Solve the Problem of Waste Accumulation. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2021;247(12):84–86. (In Russ.)

<sup>13</sup> Правительство Российской Федерации, распоряжение. URL: <http://static.government.ru/media/files/y8PMkQGZLfbY7jhn6QMruaKoferAowzJ.pdf> (дата обращения 15.02.2026).

5. Малистина А.Л., Еремина Е.А., Ермоленко Б.В. Некоторые подходы к анализу использования полимерных отходов в качестве вторичного сырья. *Успехи в химии и химической технологии*. 2022;261(12):59–62.
- Malistina AL, Eremina EA, Ermolenko BV. Analysis of the Use of Polymer Waste as Secondary Raw Materials. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2022;261(12):59–62. (In Russ.)
6. Хантимирова С. Б., Мишустин О.А., Грачева Н.В., Желтобрюхов В.Ф. Анализ и обоснование выбора способа переработки отходов производства и потребления. *Инженерный вестник Дона*. 2019;52(1).
- Khantimirova SB, Mishustin OA, Gracheva NV, Zheltobryukhov VF. Analysis and Justification of the Choice of Method of Processing Waste Production and Consumption. *Engineering Bulletin of the Don*. 2019;52(1). (In Russ.)
7. Коновалова Ю.Б., Черкашина М.П. Воздействие на земельные ресурсы и почвенный покров загрязняющих веществ полигона ТКО. *Сборник трудов конференции «Материалы и методы инновационных научно-практических исследований и разработок (Самара-2022)»*. Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Омега Сайнс»; 2025. С.188–190.
- Konovalova YuB, Cherkashina MP. Impact of Pollutants from MSW Landfill on Land Resources and Soil Cover. In: *Proceedings of the Conference “Materials and Methods of Innovative Scientific and Practical Research and Development (Samara-2022)”*. Ufa: Omega Sciences Limited Liability Company; 2025. P. 188–190. (In Russ.)
8. Седаш Т.Н. Зарубежная и российская практика использования механизмов финансирования в системе твердых коммунальных отходов. *Экономика. Налоги. Право*. 2021;14(2):109–118.
- Sedash TN. Foreign and Russian Practice of Using Financing Mechanisms in the Municipal Solid Waste System. *Economics, Taxes & Law*. 2021;14(2):109–118. (In Russ.)
9. Шубов Л.Я., Доронкина И.Г., Борисова О.Н. Оптимизация процессов управления твердыми бытовыми отходами как единая технологическая и экономическая система. *Вестник ассоциации туризма и сервиса*. 2009;4:24–32.
- Shubov LYa, Doronkina IG, Borisova ON. Economic Aspects of Service and Management of Municipal Waste. *Universities for Tourism and Service Association Bulletin*. 2009;4:24–32. (In Russ.)
10. Сивков Ю.В., Шкилева А.А. *Управление твердыми коммунальными отходами*. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2022. 160 с.
- Sivkov YuV, Shkileva AA. *Solid Municipal Waste Management*. Tyumen: Tyumen Industrial University, 2022. 160 p. (In Russ.)
11. Абрамов В.Н. Результаты исследований морфологического состава твердых коммунальных отходов жилого фонда в южных регионах России. *Отходы и ресурсы*. 2023;10(4). <https://doi.org/10.15862/19INOR423>
- Abramov VN. Results of Research on the Morphological Composition of Solid Municipal Waste in Residential Buildings in Southern Regions of Russia. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2023;10(4). (In Russ.) <https://doi.org/10.15862/19INOR423>
12. Абрамов В.Н. Результаты исследований морфологического состава твердых коммунальных отходов жилого фонда в центральных регионах России. *Отходы и ресурсы*. 2024;11(1). <https://doi.org/10.15862/07INOR124>
- Abramov VN. Results of Research on the Morphological Composition of Solid Municipal Waste in Residential Buildings in Southern Regions of Russia. *Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2024;11(1). (In Russ.) <https://doi.org/10.15862/07INOR124>
13. Вайतिकунене Е.Л., Пинчук И.А., Семенова Е.И. Имитационное моделирование как инструмент поддержки принятия управленческих решений. *Наука и бизнес: пути развития*. 2023;148(10):8–10.
- Vaitikunene EL, Pinchuk IA, Semenova EI. Simulation Modeling as a Tool to Support Management Decision Making. *Science and Business: Ways of Development*. 2023;148(10):8–10. (In Russ.)
14. Ratković B, Dimitrijević B, Popović D, Bjelić N. Bi-Objective Approach for Designing a Regional Waste Management System: A Case Study of Vojvodina (Serbia). *Waste Management & Research*. 2022;41(2):303–311. <http://doi.org/10.1177/0734242X221105446>
15. Покровская Н.Н., Молодкова Э.Б., Снисаренко С.О., Онуфриева А.М. Экономические факторы социально-экологической повестки в концепции ESG. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент*. 2022;12(2):22–34. <http://doi.org/10.21869/2223-1552-2022-12-2-22-34>
- Pokrovskaja NN, Molodkova EB, Snisarenko SO, Onufrieva AM. Economic Factors of the Socio-Environmental Agenda in the ESG Concept. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Economics. Sociology. Management*. 2022;12(2):22–34. (In Russ.) <http://doi.org/10.21869/2223-1552-2022-12-2-22-34>

16. Бартенев О.А. Возобновляемая энергетика на производственных и бытовых отходах. *Управление техносферой*. 2021;4(3):378–388. <http://doi.org/10.34828/UdSU.2021.91.82.004>

Bartenev OA, Lipaev AA. Renewable Energy in Industrial and Household Waste. *Upravlenie Tekhnosferoi*. 2021;4(3):378–388. (In Russ.) <http://doi.org/10.34828/UdSU.2021.91.82.004>

17. Троянская М.А., Симонова Е.Д. Мониторинг системы обращения с твердыми коммунальными отходами. *Естественно-гуманитарные исследования*. 2023;4:337–343.

Troyanskaya M.A., Simonova E.D. Monitoring sistemy obrashcheniya s tverdymi kommunal'nymi otkhodami. *Estestvenno-gumanitarnye issledovaniya*. 2023;4:337–343.

**Об авторе:**

**Алкинани Фатима Дахил Саидхуд**, аспирант кафедры «Безопасность и экология горного производства» Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» (119049, Российская Федерация, г. Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1), [ORCID](https://orcid.org/), [ciop@misis.ru](mailto:ciop@misis.ru)

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

**About the Author:**

**Fatimah Dakhil Saihood Alkinani**, Postgraduate Student of the Department of Safety and Ecology of Mining Production, National University of Science and Technology MISIS (4, Leninsky Avenue, building 1, Moscow, 119049, Russian Federation), [ORCID](https://orcid.org/), [ciop@misis.ru](mailto:ciop@misis.ru)

**Conflict of Interest Statement:** the author declares no conflict of interest.

*The author has read and approved the final version of manuscript.*

**Поступила в редакцию / Received** 06.03.2026

**Поступила после рецензирования / Reviewed** 27.03.2026

**Принята к публикации / Accepted** 03.04.2026