УДК 656.073: 658.567.1
DOI 10.23968/1999-5571-2026-23-4-158-169

© *В. Г. Маврин*, канд. техн. наук, доцент
© *И. В. Макарова*, д-р техн. наук, профессор
(Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия)
E-mail: vadim_mmite@rambler.ru, kamivm@mail.ru

© *V. G. Mavrin*, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© *I. V. Makarova*, Dr. Sci. Tech., Professor
(Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia)
E-mail: vadim_mmite@rambler.ru, kamivm@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С ПРОМЫШЛЕННЫМИ ОТХОДАМИ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН)

OPTIMIZATION OF PLACING THE FACILITIES OF INDUSTRIAL WASTE HANDLING TRANSPORT AND LOGISTICS SYSTEM BASED ON SIMULATION MODELING (ON THE EXAMPLE OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN)

Рассматривается проблема повышения эффективности транспортно-логистической системы обращения с промышленными отходами. Разработана имитационная модель в среде AnyLogic, использующая реальную дорожную сеть OpenStreetMap для расчета маршрутов и пробегов специализированного автотранспорта и позволяющая определять оптимальную конфигурацию системы (количество, координаты и мощности сортировочных станций и перерабатывающих заводов) с учетом ограничений, накладываемых классом опасности отходов на режимы перевозки. Эксперимент на модели позволил определить оптимизированную конфигурацию системы (на примере Республики Татарстан), обеспечивающую рост доли переработки с 29,8 до 65,5 %.

Ключевые слова: промышленные отходы, транспортно-логистическая система, имитационное моделирование.

The article addresses the problem of improving the efficiency of the transport and logistics system for industrial waste management. A simulation model has been developed in the AnyLogic environment, which uses the real OpenStreetMap road network to calculate the routes and mileage of specialized vehicles and allows to determine the optimal system configuration (number, coordinates and capacities of sorting stations and processing plants), taking into account the restrictions imposed by the waste hazard class on transportation modes. Experiments with the model allowed determining an optimized system configuration (using the Republic of Tatarstan as an example), ensuring an increase in the recycling rate from 29,8 to 65,5 %.

Keywords: industrial waste, transport and logistics system, simulation modeling.

Введение

В Российской Федерации ежегодно образуется около 1 млрд т промышленных отходов (без учета вскрышных и вмещающих пород), из которых менее трети вовлекается в хозяйственный оборот или переводится в безопасное состояние[1]. Соответственно, большая их часть размещается на полигонах (в том числе несанкционированных) либо на объектах временного хранения, что приводит к необратимому загрязнению окружающей среды и отчуждению земель [1].

Ключевым элементом системы обращения с отходами является транспортно-логистическая составляющая. По разным оценкам, на сбор и транспортировку приходится от 50 до 70 % всех эксплуатационных затрат [2]. При этом автомобильный транспорт выступает основным звеном, обеспечивающим

[1] О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2024 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; ФГБУ «ВНИИ Экология», 2025. 721 с.

связность территориально распределенных элементов системы: источников образования, сортировочных станций, перерабатывающих заводов и полигонов.

Эффективность транспортно-логистической системы определяется в том числе рациональным размещением объектов инфраструктуры. Неоптимальное расположение объектов по обращению с отходами ведет к росту пробегов и повышению тарифной нагрузки [3].

Вопросы оптимизации размещения объектов обращения с отходами рассматривались в работах многих отечественных и зарубежных ученых. Как правило, производилась адаптация классических моделей размещения объектов (p-медианы и p-центра, задачи покрытия, метод центра тяжести и т. п.) для различных типов отходов и масштабов территорий [4, 5]. Также развитие получили многокритериальные подходы, учитывающие наряду с экономическими экологические и социальные факторы [6, 7].

Вместе с тем существующие исследования, как правило, либо ограничиваются статической постановкой, либо используют упрощенные метрики расстояний. Недостаточно внимания уделяется учету реальной дорожной сети. Кроме того, остается открытым вопрос о совместной оптимизации количества, мощности и мест размещения сортировочных станций и заводов по переработке отходов. Особый интерес представляет совершенствование методов управления транспортными потоками при обращении с промышленными отходами. Добавление в систему новых объектов по сортировке и переработке отходов неизбежно приведет к увеличению пробегов специализированного автотранспорта, что повысит нагрузку на дорожную сеть и выбросы загрязняющих веществ. Предлагаемый в работе подход к оптимизации размещения объектов инфраструктуры рассматривается как инструмент управления транспортным спросом, позволяющий перераспределять потоки отходов между источниками и объектами обработки таким образом, чтобы минимизировать транспортную работу при заданных ограничениях на мощности объектов.

Целью настоящей работы является разработка имитационной модели для оптимизации размещения объектов транспортно-логистической системы обращения с промышленными отходами и маршрутов движения специализированного автотранспорта, позволяющей повысить эффективность функционирования системы.

Методы

В российской научной литературе задачи оптимизации размещения объектов обращения с отходами рассматривались в работах [8–11]. В статье [8] описывается применение прогнозной модели образования отходов городских агломераций как основы разработки практических рекомендаций по оптимизации размещения объектов обращения с отходами в регионе. В работе [9] отмечается, что строительство новых инфраструктурных объектов должно основываться на стратегии развития и прогноза динамики роста рассматриваемого региона. В исследовании [10] основное внимание уделяется использованию методов линейного программирования и геоинформационного моделирования для выбора оптимальных мест размещения мусороперерабатывающих заводов. Формулировке принципов формирования цифровой информационной модели управления развитием территорий посвящена работа [11].

В исследовании [12] авторы рассматривают эволюцию систем обращения с отходами в концепции устойчивого развития и циркулярной экономики, подчеркивая, что эффективная система должна базироваться не только на технологических, но и на организационно-управленческих решениях.

Несмотря на наличие отдельных методик и подходов у отечественных ученых, каждая

из них имеет ограничения: от отсутствия учета транспортной сети и экологических факторов до неадаптированности к специфике отрасли обращения с отходами.

Мировая практика демонстрирует широкий спектр подходов к оптимизации систем обращения с отходами. Эти системы условно можно разделить на три группы: технологические, логистические и регуляторные.

В странах с недостаточно развитой централизованной системой обращения с отходами активно развиваются технологии децентрализованной переработки отходов. В исследовании [13] предложена концепция локально управляемой децентрализованной циркулярной экономики для переработки пластиковых отходов в развивающихся странах. Авторы разработали метрику для идентификации стран с наибольшим потенциалом для такого подхода, используя девять индикаторов, охватывающих экономические, социальные и экологические аспекты.

Важным направлением оптимизации логистики является переход к альтернативным видам транспорта. Так, с точки зрения экологической и экономической эффективности рядом преимуществ относительно автомобильного транспорта обладает железнодорожный. При значительных расстояниях и объемах груза соотношение эффективности составляет примерно 3 : 1 и более в пользу железных дорог [14].

Высокие показатели в области снижения объема захораниваемых отходов демонстрируют города, реализующие концепцию «нулевых отходов». Японский город Камикацу внедрил систему раздельного сбора по 45 категориям отходов, что позволило достичь уровня переработки 80 % уже к 2017 г., а к 2020 г. полностью отказаться от сжигания отходов [15]. Итальянский город Капаннори (Тоскана) внедрил систему поквартирного сбора отходов с оплатой по факту образования, что в сочетании с программой компостирования органических отходов позволило сократить количество отходов на 40 % [16]. В исследовании [17] выявлено, что реализация концепции «нулевых отходов» приносит существенные выгоды: снижение объемов образования отходов и их негативного воздействия, продление срока службы полигонов, повышение эффективности использования сырья, сокращение выбросов парниковых газов, снижение энергопотребления и создание новых рабочих мест.

Наряду с задачами размещения фундаментальное значение для транспортной логистики имеет задача маршрутизации автотранспортных средств, которая заключается в построении оптимальных маршрутов. В системах обращения с отходами задачи размещения и маршрутизации взаимосвязаны: местоположение объектов определяет структуру транспортных потоков, а оптимальные маршруты — итоговые затраты. Однако классические постановки задачи размещения объектов, как правило, используют евклидовы расстояния, что ограничивает их применимость для реальных дорожных сетей [18]. В работе [19] показано, что ошибка при использовании евклидова расстояния для условий крупного города может достигать 25 %, что критически влияет на оптимальное размещение объектов. Развитие геоинформационных систем позволило перейти к расчету расстояний по реальной дорожной сети.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Классические модели размещения объектов создают теоретическую базу для оптимизации систем обращения с отходами, но требуют адаптации с учетом специфики отходов и реальной транспортной сети.

2. Задачи маршрутизации транспортных средств широко применяются за рубежом для оптимизации сбора отходов, однако в отечественной литературе их использование ограничено и, как правило, не интегрируется с задачами размещения объектов.

3. Развитие геоинформационных систем и открытых картографических данных создало предпосылки для перехода от упрощенных метрик расстояний к расчетам по реальной дорожной сети, что критически важно для адекватной оценки транспортных затрат.

4. В отечественных и зарубежных исследованиях накоплен значительный опыт оптимизации региональных систем, однако отсутствуют работы, объединяющие:

- оптимизацию количества, координат и мощности объектов;
- учет реальной дорожной сети;
- экологические коэффициенты при транспортировке;
- имитационное моделирование как инструмент верификации.

Настоящее исследование направлено на восполнение указанных пробелов путем разработки имитационной модели транспортно-логистической системы обращения с промышленными отходами.

Рассматривается региональная транспортно-логистическая система обращения с промышленными отходами. Центральным элементом системы является автомобильный транспорт, обеспечивающий перемещение отходов между источниками образования, сортировочными станциями, перерабатывающими заводами и полигонами. В состав системы входят следующие типы объектов:

- источники образования промышленных отходов с известными координатами, объемами, типами и классами опасности отходов;
- сортировочные станции (их количество, координаты и мощность подлежат оптимизации);
- заводы по переработке отходов (их количество, координаты и мощность подлежат оптимизации);
- существующие полигоны для захоронения промышленных отходов с известной остаточной вместимостью и координатами.

Транспортировка отходов между элементами системы осуществляется автомобильным транспортом по существующей дорожной сети. Стоимость транспортировки зависит от расстояния, объема перевозок и класса опасности отходов.

Требуется определить оптимальную конфигурацию системы (число и параметры сортировочных станций, заводов по переработке отходов, а также оптимальные пути транспортировки отходов по автомобильным дорогам), обеспечивающую минимум суммарных затрат (транспортных, инфраструктурных, на хранение и захоронение).

Одним из оптимальных по цели и затратам решений логистических задач и задач территориального размещения объектов является разработка системы поддержки принятия решений, в которой имитационная модель выступает интеллектуальным ядром [20]. Разработаем имитационную модель, включающую многовариантные расчеты с учетом реальной дорожной сети, позволяющую проводить симуляционные и оптимизационные эксперименты. Такая реализация должна обеспечивать визуализацию результатов, возможность изменения параметров, а также интеграцию с оптимизационными алгоритмами. Для программной реализации модели выбрана среда имитационного моделирования *AnyLogic* (версия 8.9.8). Модель реализована как агентная модель, где каждый элемент системы представлен отдельным типом агентов.

В модель загружена ГИС-карта мира. Для расчета расстояний по реальной дорожной сети использован граф автомобильных дорог на основе данных *OpenStreetMap* в формате *PBF* (*Protocolbuffer Binary Format*). Использование реальной дорожной сети, а не евклидовых расстояний является ключевым решением, позволяющим получить адекватные оценки пробега, времени в пути и, соответственно, транспортных затрат. Это принципиально отличает предложенную

модель от известных статических подходов, в которых расстояния рассчитываются по прямой.

Дорожный граф включает информацию о типах дорог (магистрали, региональные дороги, городские улицы), разрешенных направлениях движения, наличии мостов и путепроводов. Это позволяет моделировать маршруты движения с учетом реальных ограничений, что критически важно для адекватной оценки транспортной работы.

Для каждого перемещения отходов от источника до объекта обработки или захоронения в модели используются транспортные средства, характеристики которых соответствуют парку специализированной техники, применяемой в сфере обращения с отходами.

В основу расчета транспортных затрат положена линейная зависимость от объема перевозимых отходов и расстояния перевозки, что соответствует классическим подходам в транспортной логистике. Суммарные транспортные затраты за год определяются как $C_{transport} = \gamma \cdot Q \cdot d$, где γ — удельная стоимость транспортировки, руб./(т · км); Q — годовой объем отходов, т/год; d — расстояние перевозки, км. В имитационной модели параметр γ реализован как переменная *costPerTonKm* и используется во всех расчетах транспортных затрат.

Транспортные затраты корректируются с помощью коэффициентов экологического риска α_c, реализованных в модели как массив *riskFactor*. Для класса опасности c значение коэффициента извлекается как *riskFactor[c–1]* (индексация с нуля). Таким образом, стоимость транспортировки 1 т отходов класса c на расстояние d км составляет $\gamma \cdot \alpha_c \cdot d$ руб., где $a_c = \begin{cases} 10, & c = 1 \\ 5,0, & c = 2 \\ 2,0, & c = 3 \\ 1,2, & c = 4 \\ 1,0, & c = 5 \end{cases}$ — коэффициенты экологического риска для соответствующего класса опасности; γ — стоимость транспортировки 1 т отходов на 1 км, руб./(т · км).

Имитационная модель работает в дискретно-событийном режиме с суточным шагом Δt = 1 день. Каждый прогон модели соответствует одному году (365 дней). На каждом шаге выполняются следующие действия: инициализация и пошаговое моделирование.

Инициализация: на основе значений оптимизируемых параметров (количество, координаты и мощность сортировочных станций J; количество, координаты, мощность и специализация заводов K) создаются соответствующие агенты. Обнуляются счетчики затрат и дохода, а также переменные накопления: начальные запасы отходов на источниках S_i^{init}, текущая загрузка станций $currentLoad_j^s$ и заводов $currentLoad_k^p$, а также начальное заполнение полигонов W_l^{init}.

Цикл по времени (пошаговое моделирование): для каждого дня t_n (n = 1, 2, …, 365) выполняются следующие подэтапы:

1. Расчет образования отходов. Для каждого источника i определяется интенсивность образования $q_i(t_n)$. Образовавшийся за сутки объем добавляется к текущему запасу $Q_i(t_n)$.

2. Принятие решений о вывозе. Для каждого источника i:

– определяется множество доступных сортировочных станций;

– если такие станции существуют, выбирается ближайшая станция j^* (с минимальным d_{ij});

– если станция не найдена, отходы распределяются напрямую на заводы или полигоны в соответствии с совместимостью по типам и классам опасности.

3. Моделирование работы сортировочных станций. Для каждой станции j:

– поступившие отходы увеличивают запас $S_j(t_n)$;

– обработка отходов происходит с интенсивностью $\frac{1}{\tau_j} S_j(t_n)$, где τ_j — время обработки.

4. Моделирование работы заводов. Для каждого завода k:

– поступившие отходы увеличивают запас в переработке $P_k(t_n)$;

– переработка завершается с интенсивностью $\frac{1}{\theta_k} P_k(t_n)$, при этом полученное вторсырье приносит доход $R_{k,t}$.

5. Моделирование работы полигонов. Для каждого полигона l:

– поступившие остатки увеличивают заполнение $W_l(t_n)$;

– если $W_l(t_n) > W_l^{\max}$, начисляется штраф за сверхлимитное размещение.

6. Расчет затрат и дохода.

– транспортные затраты: $\gamma \cdot \alpha_{c_i} \cdot d \cdot$ объем для всех перемещений;

– затраты на хранение: $\sum_i h_i \cdot Q_i(t_n)$;

– затраты на захоронение: D_l (объем захороненных отходов);

– доход от вторсырья: $R_{k,t}$ (объем переработанных отходов).

7. Обновление переменных состояния. Пересчитываются запасы на источниках Q_i^{n+1}, станциях S_j^{n+1}, заводах $P_k(t_{n+1})$ и полигонах $W_l(t_{n+1})$.

После завершения цикла по времени (365 дней) производится:

- суммирование всех годовых затрат и доходов;
- добавление эксплуатационных затрат на станции и заводы;
- добавление амортизированных капитальных затрат на строительство новых объектов (станций и заводов);
- расчет чистой приведенной стоимости (*NPV*).

Результаты

Проведем симуляционный эксперимент на модели для оценки эффективности действующей транспортно-логистической системы обращения с промышленными отходами Республики Татарстан и выявим узкие места системы. Выбор Республики Татарстан в качестве объекта для апробации разработанной модели обусловлен совокупностью факторов (один из наиболее развитых субъектов РФ с широким спектром отраслей промышленности), характеризующих регион как репрезентативный для исследования проблем обращения с промышленными отходами в условиях интенсивно развивающегося индустриального центра. Визуализация симуляционного эксперимента представлена на рис. 1.

В модели использованы данные о реально функционирующих мусоросортировочных станциях Республики Татарстан, функционирующих и строящихся заводах по переработке отходов, полигонах, доступных для захоронения промышленных отходов, а также источниках промышленных отходов.

В ходе симуляционного эксперимента получены результаты по балансу отходов (табл. 1) и рассчитаны экономические показатели (табл. 2).

По результатам выполнения симуляционного эксперимента выявлены критические ограничения действующей системы (табл. 3).

Проведенный симуляционный эксперимент показал, что действующая система обращения с промышленными отходами Республики Татарстан характеризуется низкой эффективностью. Ключевым узким местом системы выступают сортировочные станции, суммарная мощность которых (951 тыс. т/год) позволяет обработать лишь 26,8 % от общего объема отходов (3,55 млн т/год). Остальные отходы либо направляются напрямую на полигоны, минуя сортировку, либо накапливаются без возможности извлечения ценных фракций. Мощности перерабатывающих заводов также недостаточны.

Таким образом, для повышения эффективности системы обращения с отхода-

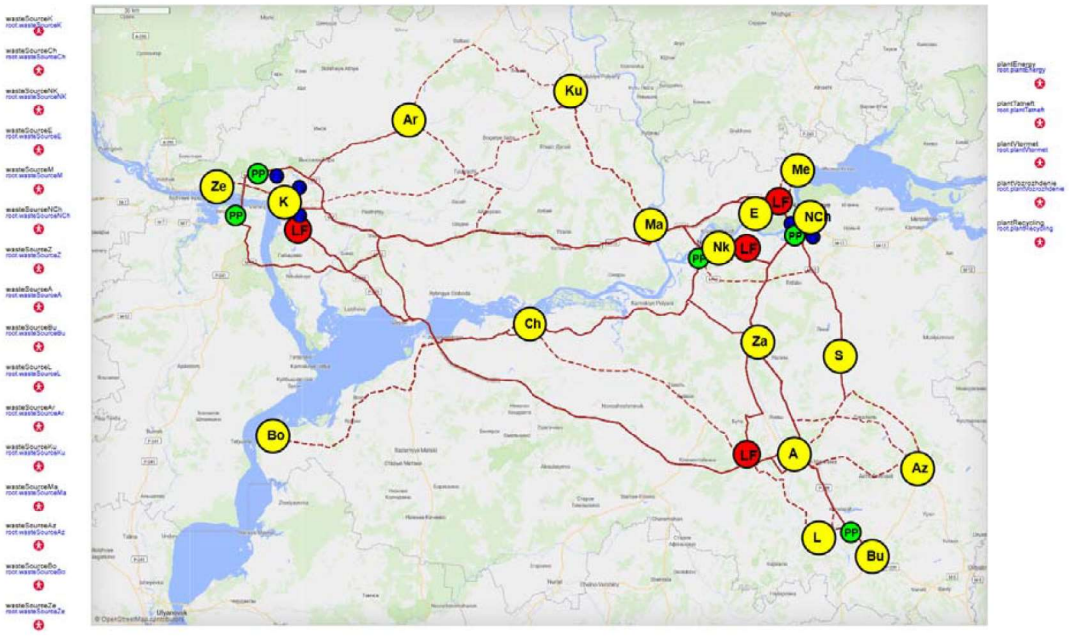

Рис. 1. Визуализация проведения симуляционного эксперимента. На карте обозначены:
— источники образования промышленных отходов; — полигоны для захоронения отходов;
— заводы по переработке отходов; — сортировочные станции

ми требуется комплексная реорганизация ее инфраструктуры. В связи с этим целесообразно проведение оптимизационного эксперимента, направленного на определение оптимального количества, местоположения и мощностей сортировочных станций и перерабатывающих заводов, а также эффективных маршрутов движения транспортных средств, минимизирующих логистические издержки.

В качестве целевой функции в эксперименте использовалась чистая приведенная стоимость (*NPV*) проекта за 20 лет:

$$NPV = \sum_{t=1}^{20} \frac{R_t - C_t}{(1+r)^t},$$

где R_t — годовой доход от реализации вторсырья в году t, руб.; C_t — годовые затраты (транспортные, на хранение, захоронение, амортизацию и эксплуатацию объектов)

Таблица 1

Баланс отходов

Показатель	Объем, т	Доля от общего объема, %
Общий объем отходов	3 550 744	100,0
Переработано	1 056 771	29,8
Захоронено	386 905	10,9
На хранении	2 107 068	59,3

Таблица 2

Экономические показатели действующей транспортно-логистической системы обращения с отходами

Показатель	Значение, млн руб./год	Затраты, %
ЗАТРАТЫ		
Сортировочные станции (амортизация + эксплуатация)	254	1,9
Полигоны (эксплуатация)	1120	8,5
Заводы (амортизация + эксплуатация)	1970	14,9
Транспорт	1420	10,8
Хранение	8430	63,8
Итого затраты	13 200	100,0
ДОХОДЫ		
Потенциальный доход от вторсырья	6050	–
ЧИСТЫЙ РЕЗУЛЬТАТ	–7150	–

Таблица 3

Ограничения системы

№	Узкое место	Характеристика	Последствия
1	Дефицит мощности станций	Суммарная мощность 951 тыс. т при объеме отходов 3551 тыс. т	Только 26,8 % отходов проходят сортировку
2	Дефицит мощности завода *pTatneft*	300 тыс. т при объеме отходов химии и нефтехимии 1234 тыс. т	77 % отходов уходит на хранение
3	Дефицит мощности завода *pVtormet*	222,5 тыс. т при объеме металлосодержащих отходов 888 тыс. т	75 % отходов уходит на хранение
4	Высокая стоимость хранения	59,3 % от образованных отходов остается на хранении	8,43 млрд руб./год (63,8 % затрат)
5	Низкая доля переработки	29,8 % от образованных перерабатывается	Система обращения с отходами приносит значительные издержки (7,15 млрд руб. в год)

в году t, руб.; $r = 0{,}10$ — ставка дисконтирования.

В ходе оптимизационного эксперимента было проанализировано 100 000 различных конфигураций системы. Результат выполнения эксперимента в среде *AnyLogic* представлен на рис. 2.

Оптимальная конфигурация предполагает строительство пяти сортировочных станций суммарной мощностью 3,6 млн т/год и двух новых перерабатывающих заводов мощностью 400 тыс. т/год и 200 тыс. т/год.

Распределение отходов в оптимизированной конфигурации представлено в табл. 4.

Обсуждение

Результаты эксперимента показали, что новая конфигурация позволяет улучшить показатели системы. С транспортной точки зрения наиболее значимым результатом является перераспределение потоков отходов: доля отходов, направляемых на переработку, выросла с 29,8 до 65,5 %. Это означает, что транспортная система стала обслуживать больший объем полезных перевозок (вторичного сырья), а не холостых перевозок к полигонам и местам хранения. Соответственно, доля отходов, уходящих на хранение, сократилась с 59,3 до 25,6 %. Это привело к значительному улучшению экономических показателей (табл. 5).

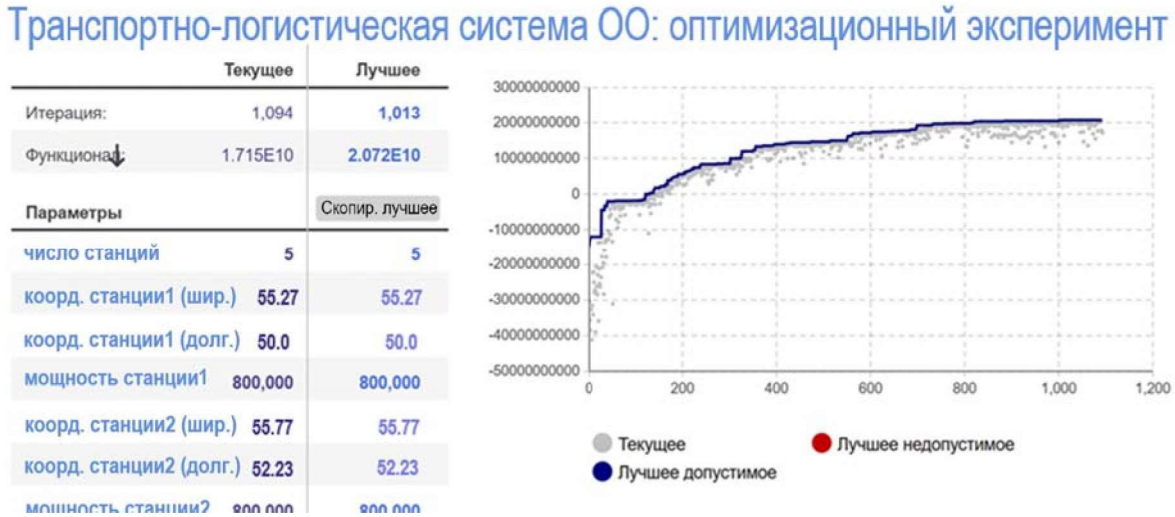

Рис. 2. Результат выполнения оптимизационного эксперимента

Таблица 4

Баланс отходов в оптимальной конфигурации

Показатель	Объем, т	Доля, %
Общий объем отходов	3 550 744	100,0
Переработано	2 325 112	65,5
Захоронено	314 836	8,9
На хранении	910 796	25,6

Полученные результаты оптимизационного эксперимента демонстрируют принципиальную возможность перехода системы от убыточного состояния к прибыльному (*NPV >0*).

Важно отметить, что оптимизация размещения объектов сортировки и переработки отходов привела к существенному изменению транспортных характеристик системы. Хотя абсолютные транспортные затраты выросли (с 1,42 до 6,34 млрд руб.), этот рост обусловлен кратным увеличением объема перерабатываемых отходов (с 1,06 до 2,33 млн т). 1При этом доля транспортных затрат в общих затратах системы выросла с 10,8 до 47,0 %, что подтверждает гипотезу о том, что в оптимизированной системе именно транспортная логистика становится ключевым фактором эффективности и требует дальнейшего совершенствования.

Таблица 5

Экономические показатели оптимизированной конфигурации

Показатель	Значение, млн руб./год
Затраты на станции (амортизация + эксплуатация)	963
Затраты на полигоны (эксплуатация + захоронение)	896
Затраты на заводы (амортизация + эксплуатация)	1750
Транспортные затраты	6340
Затраты на хранение	3560
Итого затраты	13 500
Доход от вторсырья	15 900
Чистый годовой результат	2380
Чистая приведенная стоимость (*NPV*) за 20 лет	20 720

Полученные результаты приобретают особую значимость в свете наблюдаемого роста стоимости автотранспортных услуг в Российской Федерации. Основными факторами, обусловливающими этот рост, являются:

- повышение утилизационного сбора на автомобильную технику;
- рост таможенных пошлин на ввоз коммерческого транспорта;
- удорожание топлива и запасных частей;
- рост себестоимости производства отечественных автомобилей;
- увеличение стоимости обслуживания и ремонта вследствие ограничения доступа к зарубежным запасным частям и сервисным системам.

Выводы

1. Установлено, что проблема обращения с отходами является одним из наиболее острых экологических и экономических вызовов современности, а транспортно-логистическая составляющая является системообразующим элементом всей системы обращения с отходами. Отмечена критическая важность оптимизации транспортно-логистических процессов для достижения экономической эффективности и экологической безопасности всей системы.

2. На основе анализа отечественного и зарубежного опыта обоснована необходимость перехода от статических моделей размещения объектов к динамическим имитационным моделям, учитывающим реальную дорожную сеть и стохастический характер процессов образования и транспортировки отходов.

3. Разработана агентная имитационная модель в среде *AnyLogic*, интегрирующая расчет маршрутов по реальной дорожной сети; учет дифференцированных по классам опасности коэффициентов экологического риска при транспортировке; возможность совместной оптимизации количества, местоположения и мощности объектов инфраструктуры.

Модель позволяет количественно оценивать влияние конфигурации размещения объектов на транспортную работу системы.

4. Апробация модели для Республики Татарстан показала, что оптимизированная конфигурация позволяет: увеличить долю переработки промышленных отходов с 29,8 до 65,5 %; снизить долю отходов, направляемых на хранение, с 59,3 до 25,6 %; обеспечить переход системы из убыточного состояния в прибыльное.

5. Установлено, что в оптимизированной системе доминирующей статьей затрат становятся транспортные расходы (47 % общих затрат), что актуализирует дальнейшие исследования в области совершенствования маршрутизации и выбора подвижного состава.

Библиографический список

1. *Лопатин В. Л.* Экономическая оценка ущерба от несанкционированных свалок и отходов на землях лесного фонда // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2025. Т. 13, № 1 (68). С. 38–49.

2. *D'Onza G., Greco G., Allegrini M.* Full cost accounting in the analysis of separated waste collection efficiency: A methodological proposal // Journal of Environmental Management. 2016. Vol. 167. Pp. 59–65. DOI 10.1016/j.jenvman.2015.09.002.

3. *Pachakis G., Malamis D., Mai S., Barampouti E. M.* Spatial Influence on Waste-to-Energy Sustainability: A Life Cycle Assessment of RDF Transport and Plant Siting // Energies. 2025. Vol. 18 (23). 6238. DOI 10.3390/en18236238.

4. *Pérez-Mesa J. C., Serrano-Arcos M. M., Jiménez-Guerrero J. F., Sánchez-Fernández R.* Addressing the Location Problem of a Perishables Redistribution Center in the Middle of Europe // Foods. 2021. Vol. 10 (5). 1091. DOI 10.3390/foods10051091.

5. *Duan Y., Hu B., Ri S., Wang L., Zhou M.* A hybrid multi-criteria decision-making model for waste facilities location considering system resilience // Computers & Industrial Engineering. 2024. Vol. 193. 110326. DOI 10.1016/j.cie.2024.110326.

6. *Güler M., Samastı M., Yücesan M., Gül M., Çelik E., Ciner M. N., Algorabi Ö.* Selection of the central composting facility for organic wastes through the Bayesian best worst method and Geographic information system incorporation: The case of Istanbul // Engineering Science and Technology, an International Journal. 2025. Vol. 70. 102175. DOI 10.1016/j.jestch.2025.102175.

7. *Batta R., Lejeune M., Prasad S.* Public facility location using dispersion, population, and equity criteria // European Journal of Operational Research. 2014. Vol. 234 (3). Pp. 819–829. DOI 10.1016/j.ejor.2013.10.032.

8. *Цыпкин Ю. А., Близнюкова Т. В., Фомин А. А., Феклистова И. С., Орлов С. В.* Оптимизации размещения объектов обращения с отходами как фактор экологоустойчивого развития городских агломераций // Московский экономический журнал. 2020. № 8. С. 14.

9. *Авцинова А. А., Макаров И. Н.* Оптимизация пространственного размещения производств как база развития периферийных регионов // Экономика, предпринимательство и право. 2021. Т. 11, № 9. С. 2121–2131.

10. *Папилин Д. В., Проказов М. Ю.* Оптимизация размещения объектов сбора и переработки твердых коммунальных отходов (на примере Балашовского района Саратовской области) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. 2025. Т. 25, № 1. С. 13–19.

11. *Береговских А. Н.* Принципы формирования цифровой информационной модели для эффективного управления развитием территорий на основе комплексного градостроительного проектирования // Вестник Евразийской науки. 2024. Т. 16, № 4. С. 10.

12. *Асаул А. Н., Дроздова И. В., Токунова Г. Ф.* Эволюция устойчивого и циклического управления отходами // Вестник гражданских инженеров. 2025. № 5 (112). С. 121–130.

13. *Joshi C. A., Seay J., Banadda N.* A perspective on a locally managed decentralized circular economy for waste plastic in developing countries // Environmental Progress & Sustainable Energy. 2018. Vol. 38 (1). Pp. 3–11. DOI 10.1002/ep.13086.

14. *Trevisan L., Bordignon M.* Screening Life Cycle Assessment to compare CO_2 and Greenhouse Gases emissions of air, road, and rail transport: An exploratory study // Procedia CIRP. 2020. Vol. 90. Pp. 303–309. DOI 10.1016/j.procir.2020.01.100.

15. *Shenyoputro K., Jones T. E.* Reflections on a two-decade journey toward zero waste: A case study of Kamikatsu town, Japan // Frontiers in Environmental Science. 2023. Vol. 11. Pp. 11–14. DOI 10.3389/fenvs.2023.1171379.

16. *Romano G., Masserini L.* Does a zero-waste strategy in sustainable urban waste management affect hierarchy targets and costs? // Utilities Policy. 2023. Vol. 85. 101659. DOI 10.1016/j.jup.2023.101659.

17. *Pietzsch N., Ribeiro J. L. D., de Medeiros J. F.* Benefits, challenges and critical factors of success for Zero Waste: A systematic literature review // Waste Man-

agement. 2017. Vol. 67. Pp. 324–353. DOI 10.1016/j.wasman.2017.05.004.

18. *Pittayarugsarit J., Song Y.* A comparison of using Euclidean and road distance to solve facility location problems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 639. 012010. DOI 10.1088/1757-899X/639/1/012010.

19. *Liu K., Liu J., Zhang J.* Advanced algorithms for optimal meeting points in road networks // IET Intelligent Transport Systems. 2023. Vol. 17 (5). Pp. 1022–1036. DOI 10.1049/itr2.12323.

20. *Макарова И. В., Маврин В. Г., Бойко А. Д., Габсалихова Л. М.* Совершенствование логистических операций путем разработки имитационных моделей // Воронежский научно-технический вестник. 2025. Т. 2, № 2 (52). С. 46–59.

References

1. Lopatin V. L. *Ekonomicheskaya otsenka ushcherba ot nesanktsionirovannykh svalok i otkhodov na zemlyakh lesnogo* fonda [Economic assessment of damage from unauthorized landfills and waste on the lands of the forest fund]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika – Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice,* 2025, vol. 13, no. 1 (68), pp. 38–49.

2. D'Onza G., Greco G., Allegrini M. Full cost accounting in the analysis of separated waste collection efficiency: A methodological proposal. *Journal of Environmental Management*, 2016, vol. 167, pp. 59–65. DOI 10.1016/j.jenvman.2015.09.002.

3. Pachakis G., Malamis D., Mai S., Barampouti E. M. Spatial Influence on Waste-to-Energy Sustainability: A Life Cycle Assessment of RDF Transport and Plant Siting. *Energies*, 2025, vol. 18 (23), 6238. DOI 10.3390/en18236238.

4. Pérez-Mesa J. C., Serrano-Arcos M. M., Jiménez-Guerrero J. F., Sánchez-Fernández R. Addressing the Location Problem of a Perishables Redistribution Center in the Middle of Europe. *Foods,* 2021, vol. 10 (5), 1091. DOI 10.3390/foods10051091.

5. Duan Y., Hu B., Ri S., Wang L., Zhou M. A hybrid multi-criteria decision-making model for waste facilities location considering system resilience. *Computers & Industrial Engineering*, 2024, vol. 193, 110326. DOI 10.1016/j.cie.2024.110326.

6. Güler M., Samastı M., Yücesan M., Gül M., Çelik E., Ciner M. N., Algorabi Ö. Selection of the central composting facility for organic wastes through the Bayesian best worst method and Geographic information system incorporation: The case of Istanbul. *Engineering Science and Technology, an International Journal,* 2025, vol. 70, 102175. DOI 10.1016/j.jestch.2025.102175.

7. Batta R., Lejeune M., Prasad S. Public facility location using dispersion, population, and equity criteria. *European Journal of Operational Research*, 2014, vol. 234 (3), pp. 819–829. DOI 10.1016/j.ejor.2013.10.032.

8. Tsypkin Yu. A., Bliznyukova T. V., Fomin A. A., Feklistova I. S., Orlov S. V. *Optimizatsii razmeshcheniya ob"ektov obrashcheniya s otkhodami kak faktor ekologoustoychivogo razvitiya gorodskikh aglomeratsiy* [Optimizing the placement of waste management facilities as a factor in the environmentally sustainable development of urban agglomerations]. *Moskovskiy ekonomicheskiy zhurnal – Moscow Economic Journal*, 2020, no. 8, pp. 14.

9. Avtsinova A. A., Makarov I. N. *Optimizatsiya prostranstvennogo razmeshcheniya proizvodstv kak baza razvitiya periferiynykh regionov* [Optimization of spatial location of production as a basis for the development of peripheral regions]. *Ekonomika, predprinimatel'stvo i pravo – Economy, Entrepreneurship and Law*, 2021, vol. 11, no. 9, pp. 2121–2131

10. Papilin D. V., Prokazov M. Yu. *Optimizatsiya razmeshcheniya ob"ektov sbora i pererabotki tverdykh kommunal'nykh otkhodov (na primere Balashovskogo rayona Saratovskoy oblasti)* [Optimization of the placement of facilities for the collection and processing of municipal solid waste (on the example of the Balashovsky district of the Saratov region)]. *Izvestiya Saratovskogo un-ta. Novaya seriya. Seriya Nauki o Zemle – Bulletin of Saratov University. New series. Earth Science Series*, 2025, vol. 25, no. 1, pp. 13–19.

11. Beregovskikh A. N. *Printsipy formirovaniya tsifrovoy informatsionnoy modeli dlya effektivnogo upravleniya razvitiem territoriy na osnove kompleksnogo gradostroitel'nogo proektirovaniya* [Principles for the formation of a digital information model for effective management of the development of territories on the basis of integrated urban planning]. *Vestnik evraziyskoy nauki – Bulletin of Eurasian Science,* 2024, vol. 16, no. 4, pp. 10.

12. Asaul A. N., Drozdova I. V., Tokunova G. F. *Evolyutsiya ustoychivogo i tsiklicheskogo upravleniya otkhodami* [Evolution of sustainable and cyclic waste management]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers,* 2025, no. 5 (112), pp. 121–130.

13. Joshi C. A., Seay J., Banadda N. A perspective on a locally managed decentralized circular economy for waste plastic in developing countries. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2018, vol. 38 (1), pp. 3–11. DOI 10.1002/ep.13086.

14. Trevisan L., Bordignon M. Screening Life Cycle Assessment to compare CO_2 and Greenhouse Gases emissions of air, road, and rail transport: An exploratory

study. *Procedia CIRP*, 2020, vol. 90, pp. 303–309. DOI 10.1016/j.procir.2020.01.100.

15. Shenyoputro K., Jones T. E. Reflections on a two-decade journey toward zero waste: A case study of Kamikatsu town, Japan. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, vol. 11, pp. 11–14. DOI 10.3389/fenvs.2023.1171379.

16. Romano G., Masserini L. Does a zero-waste strategy in sustainable urban waste management affect hierarchy targets and costs? *Utilities Policy,* 2023, vol. 85, 101659. DOI 10.1016/j.jup.2023.101659.

17. Pietzsch N., Ribeiro J. L. D., de Medeiros J. F. Benefits, challenges and critical factors of success for Zero Waste: A systematic literature review. *Waste Management,* 2017, vol. 67, pp. 324–353. DOI 10.1016/j.wasman.2017.05.004.

18. Pittayarugsarit J., Song Y. A comparison of using Euclidean and road distance to solve facility location problems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 639, 012010. DOI 10.1088/1757-899X/639/1/012010.

19. Liu K., Liu J., Zhang J. Advanced algorithms for optimal meeting points in road networks. *IET Intelligent Transport Systems*, 2023, vol. 17 (5), pp. 1022–1036. DOI 10.1049/itr2.12323.

20. Makarova I. V., Mavrin V. G., Boyko A. D., Gabsalikhova L. M. *Sovershenstvovanie logisticheskikh operatsiy putem razrabotki imitatsionnykh modeley* [Improving logistics operations by developing simulation models]. *Voronezhskiy nauchno-tekhnicheskiy vestnik – Voronezh Scientific and Technical Bulletin,* 2025, vol. 2, no. 2 (52), pp. 46–59.