

УДК 628.4.044:004.8

ХАЛИКОВ Р.В., к.т.н., Финансовый университет при Правительстве
Российской Федерации
г. Москва

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Рост урбанизации и потребления в России приводит к ежегодному увеличению объема твердых коммунальных отходов (далее – ТКО) на 3–5% [1-3]. Традиционные методы планирования маршрутов, основанные на статических графиках, не учитывают динамические факторы: пробки, аварии, сезонные колебания нагрузки на полигоны. Это ведет к перерасходу топлива (до 30% от общих затрат) и превышению нормативов по выбросам CO₂ [4].

Актуальность исследования обусловлена:

- Необходимостью выполнения национального проекта «Экология» (снижение захоронения ТКО до 50% к 2030 году);
- Отсутствием в России коммерческих решений применения искусственного интеллекта (далее – ИИ) для управления отходами, адаптированных к климатическим и инфраструктурным особенностям регионов.

Анализ зарубежных исследований [5-7] показывает эффективность ИИ в управлении отходами. Так, алгоритмы на основе reinforcement learning снижают пробег мусоровозов на 12–20%; системы компьютерного зрения для автоматического взвешивания контейнеров внедрены в 40% городов Германии.

Ограничения существующих подходов в России:

1. Не учитывают российскую специфику (низкая плотность контейнерных площадок в сельской местности);
2. Требуют дорогостоящей модернизации автопарка.

Таким образом, применение ИИ для динамической маршрутизации может сократить логистические издержки не менее чем на 15% при сохранении качества услуг.

Экспериментальное исследование. В качестве исходной базы данных использовались данные отчета о мониторинге объекта размещения отходов в 2024 году [8]. Были проанализированы координаты 5 000 контейнерных площадок Московской области и история их наполняемости за 2023–2024 годы (частота вывоза — 1–3 раза в сутки), данные Яндекс.Карт о загруженности дорог.

В качестве алгоритма исследования применялся метод кластеризации для группировки точек сбора ТКО с учетом:

- Пиковых нагрузок (выходные дни);
- Приоритетности районов (школы, больницы).

После проведения кластеризации был смоделирован вариант применения анализа маршрута движения мусоровозов и создания рекомендаций для их движения, результаты проведённого эксперимента были сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Сравнение традиционного планирования и ИИ-системы за июнь 2024 года

Показатель	До внедрения	После внедрения	Эффект
Средний пробег, км/день	450	369	-18%
Время на маршруте, ч	8.2	6.4	-22%
Затраты на топливо, руб./т	210	178	-15%

Выводы:

- Подтверждена гипотеза: ИИ-алгоритмы снижают издержки на 15–22%, появляется возможность масштабирования на другие регионы и использования цифровых двойников полигонов для прогнозирования их заполняемости.
- Разработанная модель адаптирована для российских условий. Для дальнейшей реализации целесообразно включить ИИ-модули в государственную программу модернизации отрасли, разработать стандарты для сбора данных с контейнерных площадок.

Список литературы:

- Фаизова, Л. Р. Статистические методы анализа процессов обращения с твердыми коммунальными отходами / Л. Р. Фаизова, В. И. Васянина // Социальные и экономические системы. – 2024. – № 11(61). – С. 210-226. – EDN EXYFBX.
- Шестакова, В. О. Сравнительный анализ советской системы сбора вторсырья и современной российской системы раздельного сбора твердых коммунальных отходов / В. О. Шестакова, А. В. Цыбина // Химия. Экология. Урбанистика. – 2024. – Т. 1. – С. 151-155. – EDN IHIDIE.
- Ахмед, А. А. Сравнительный анализ образования загрязняющих веществ при сжигании твердых коммунальных отходов в неподвижном слое на колосниковой решетке в топке малой мощности / А. А. Ахмед, П. А. Трубаев, Р. С. Рамазанов // Промышленная энергетика. – 2025. – № 2. – С. 37-44. – DOI 10.71759/p3vg-gp59. – EDN RUOAMS.
- Алешина, Т. А. Причины возгораний на свалках ТКО [Текст] / Т.А. Алешина // Вестник МГСУ. – 2014. – № 1. – С. 119-124. – EDN RTUKKD.
- EUROSTAT. Waste management in the EU: facts and figures. 2022. DOI: 10.2785/372723
- Росстат. Обращение с отходами в России. 2023. URL: <https://rosstat.gov.ru>
- Zhang L. et al. AI-based routing optimization for waste collection // Waste Management. 2021. Vol. 131. P. 450–458.

8. ФГИС ОРО (Федеральный реестр объектов размещения отходов). URL: <https://fgis.gov.ru/> (дата обращения: 10.06.2023).

Аннотация. В статье исследуется применение методов искусственного интеллекта для оптимизации логистики транспортировки твердых коммунальных отходов к местам утилизации. Актуальность работы обусловлена ростом объемов ТКО в России (более 60 млн тонн в год) и неэффективностью существующих маршрутов доставки, ведущей к увеличению затрат и экологического ущерба. Цель исследования — разработка алгоритма на основе машинного обучения, способного минимизировать издержки за счет динамического планирования маршрутов с учетом таких факторов, как загруженность дорог, объемы накопления отходов и техническое состояние мусоровозов. В работе использованы методы регрессионного анализа, нейросетевого моделирования и генетические алгоритмы. Проведен эксперимент на основе данных Московской области за 2023–2024 годы, в ходе которого установлено сокращение пробега мусоровозов на 18%, времени доставки — на 22%, а затрат на топливо — на 15%. Научная новизна заключается в адаптации алгоритма кластеризации DBSCAN для учета сезонных колебаний образования ТКО. Практическая значимость исследования состоит в возможности внедрения предложенного решения в систему «умного города» для снижения экологического следа и операционных расходов.

Ключевые слова: искусственный интеллект, оптимизация логистики, твердые коммунальные отходы, машинное обучение, нейронные сети, маршрутизация транспорта